



CENTRE DE DOCUMENTATION

DE RECHERCHE ET D'EXPERIMENTATIONS

SUR LES POLLUTIONS ACCIDENTELLES DES EAUX



### RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL



Avec le soutien de :

**TOTAL PETROCHEMICALS**

**TOTAL GAZ ET ENERGIES NOUVELLES**

**Convention ANR 0594C0065**

**R.09.46/C. 3278**

**FC'H/va Octobre 2009**



## RÉSUMÉ OPÉRATIONNEL GÉNÉRAL

Le projet GALERNE vise avant tout à produire des fiches d'intervention pour les personnels des Équipes d'Évaluation et d'Intervention de la Marine nationale hélicoptères sur un navire sinistré transportant un gaz liquéfié. Pour ce faire, il nous a fallu définir des scénarios d'accidents, objet de la Tâche 1 du projet, et approfondir nos connaissances pratiques et théoriques sur le comportement des substances définies dans cette Tâche.

La première partie (Tâche 1) du projet GALERNE a été consacrée à la définition et au cadrage des besoins exprimés par les premiers intervenants lors d'un accident sur un navire transportant du gaz ou une substance évaporante. Ces besoins concernent des **opérations quasi-réflexes**, pour lesquelles la réflexion doit être **antérieure** à l'évènement.

Si, lors d'accidents maritimes mettant en jeu des navires spécialisés (hors porte-conteneurs qui présentent d'autres caractéristiques de risque), les cargaisons sont connues (gaz liquéfiés ou substances liquides évaporantes), les opérationnels ont alors des informations contrastées sur la nature de l'accident et les conséquences de ce dernier. Un navire chimiquier pouvant transporter plusieurs substances, les cuves touchées et la nature précise des produits mis en cause, la taille des brèches et les débits de fuite constituent des inconnues que les premiers intervenants doivent intégrer dans leurs procédures, afin, avant toute autre action, de sécuriser la situation en mesurant les prises de risques.

Les dites fiches opérationnelles que nous appelons ici « **fiches-Interventions** » permettent cette **prise de risque calculée** et, dans le même temps, une cellule d'experts est mise en place. Cette **Cellule d'Expertise d'Urgence** (C.E.U, armée par le Ceppol, les marins-pompiers, les chimistes du LASEM et le *Cedre*) reçoit les informations de l'équipe d'évaluation par l'intermédiaire du PC Opérations (PCOPS).

Dans un délai de **quelques heures après l'évènement**, les premiers résultats de modélisations d'urgence parviennent aux intervenants. Ces simulations de comportement (devenir des produits dans l'atmosphère, dans la masse d'eau...), sont effectuées à l'aide de modèles peu sophistiqués, **faciles à mettre en œuvre** et dont les données d'entrée fluctuent en fonction des informations qui parviennent du site de l'accident.

Une partie importante de la Tâche 1 a été de décrire le mode de transport des Gaz liquéfiés et des substances chimiques évaporantes. Méthaniers, GPLiers pressurisés, semi-pressurisés et réfrigérés, sont décrits en terme de types de citerne et de protection de celles-ci.

La résistance à la collision et à l'échouement a été analysée en terme de type de construction des citernes, de la plus sécurisée (1G) au standard minimum (3G). Enfin, la sécurité à bord des gaziers est décrite de manière simple.

Neuf gaz liquides et substances liquides flottantes évaporantes ont ainsi été considérés, aboutissant à l'élaboration de 15 scénarios d'accidents :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL) : cinq scénarios
- Ammoniac : un scénario
- Chlorure de vinyle : un scénario
- Butane ou Propane ou Propylène : un scénario
- Ethylène réfrigéré : un scénario
- Xylènes : deux scénarios
- Benzène : quatre scénarios

A chaque produit correspondent plusieurs scénarios correspondant à des conditions météorologiques variées et trois diamètres de brèche dans la coque du navire : 20 cm<sup>2</sup>, 5 dm<sup>2</sup> (500 cm<sup>2</sup>), 2 m<sup>2</sup> (20 000 cm<sup>2</sup>).

Quatre niveaux d'événement ont été définis :

- facteur initiateur ;
- conséquences immédiates ;
- facteurs aggravants ;
- risque à moyen terme.

Les études sur le comportement des gaz liquéfiés et des substances liquides évaporantes, les expérimentations en bassin, construit pour l'occasion au centre d'essai de l'INERIS, ont permis de mesurer le comportement des gaz liquéfiés libérés en surface, avec 23 tirs effectués à l'aide d'un dispositif expérimental très complet.

### La dispersion atmosphérique dans le « champ proche »

Les gaz réfrigérés se comportent pendant une première phase comme des gaz denses, se traduisant par un nuage s'étalant en surface sous l'effet de la gravité et par la réduction du mélange avec l'atmosphère ambiante du fait de la stratification.

Le comportement dans le champ proche (moins d'un kilomètre de la source) des gaz libérés a été modélisé à l'aide de trois logiciels :

PHAST, (développé par le DNV) est un logiciel de dispersion dit « intégral » des gaz lourds provenant de la vaporisation de gaz liquéfiés ou de l'évaporation de liquides

EVOLCODE (développé par GDF SUEZ) dispose d'un logiciel de calculs d'étalement et de vaporisation de nappes liquides (EVANUM) et d'un modèle de dispersion de GNL/GPL (EOLE).

MERCURE (développé par EdF) est un modèle complexe traitant de la dispersion des gaz lourds. Il prend en compte des équations complètes de mécanique des fluides.

Les simulations concernant le GNL donnent des distances à la LII (Limite Inférieure d'Inflammabilité) légèrement supérieures à l'aide d'EVOLCODE pour les scénarios de brèche jusqu'à 2 m.

Sans entrer dans le détail des résultats qui sont précisés dans les « fiches intervention » de la partie 3 du projet, il faut retenir les points suivants :

- l'importance fondamentale des conditions de stabilité atmosphérique sur les zones d'exclusions. Les distances dangereuses peuvent varier d'un facteur 10 à 30 entre des conditions stables (ciel couvert, vents faibles) et instables (vent fort, ensoleillement important) ;
- les gaz réfrigérés se comportent comme des gaz denses tant qu'ils sont froids. Les gaz froids restent visibles dans un premier temps du fait de la condensation de l'humidité de l'air ;
- une cuve de 40 000 m<sup>3</sup> se déversant en mer par l'intermédiaire d'une brèche de 2 m<sup>2</sup> entraînerait une zone d'extension de nuage correspondant à 50% de la LII au maximum de 7 500 m par atmosphère stable (vents faibles) et de 1 300 m pour une atmosphère plus instable (conditions météorologiques du 17/10/1985)
- un déversement d'Ammoniac (le plus toxique des gaz choisis) en surface présente des zones de danger très importantes, allant bien au-delà du champ proche (10 km) pour les Seuils d'Effets Réversibles (30') ;
- l'impact de l'Ammoniac est tempéré par le fait de sa solubilité importante dans l'eau, non prise en compte dans les modèles. En cas de fuite sous la ligne de flottaison, certaines sources mentionnent que plus de la moitié de l'ammoniac libéré se dissoudra avant d'atteindre la surface. De même la pluie, les embruns, la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, joueront un rôle important dans sa dissolution. Si la modélisation présentée dans ce rapport prend en compte uniquement un transport pressurisé à température ambiante, un transport d'Ammoniac réfrigéré impacté au dessus de la ligne de flottaison, verra la création d'une flaque en



surface de l'eau, flaque qui se dissoudra en grande partie, ce qui limitera la propagation du nuage gazeux toxique ;

- l'impact réel des substances cryogénées (GNL, Ethylène, Ammoniac sous certaines formes de transport...) sur la structure du navire, n'est pas défini avec certitude (pas de cas survenu dans le passé), surtout en cas de fuite de substance dans les ballasts ou d'irruption d'eau de mer dans une cuve qui, même « vide », contient encore plus de 1000 m<sup>3</sup> de produit (cas du GNL). Nous assisterions alors à une Transition Rapide de Phase, c'est à dire le passage de manière quasi-instantanée d'une phase liquide à une phase gazeuse avec une expansion du volume de l'ordre de 600 fois dans le cas du GNL.

### La dispersion des gaz dans le champ lointain

Pour ce qui concerne les **gaz liquéfiés**, Météo France a utilisé le modèle de grande échelle PERLE couplé au modèle PHAST qui donne les termes sources dans le champ proche.

La méthode a été appliquée sur l'Ammoniac (3 600 tonnes) qui possède des seuils de toxicité notoire à faibles concentrations, soit une valeur ERPG1 (Emergency Response Planning Guidelines) de 25 ppm. Deux types de rejets ont été simulés : 70mn et 100s.

Le tableau 1 est édifiant sur les risques présentés par un déversement d'Ammoniac. Les autres gaz toxiques (y compris le Chlorure de Vinyle) donnent des valeurs inférieures aux concentrations dangereuses (y compris en atmosphère stable) au-delà de 10 kilomètres.

Date	Scénario	Rejet + 2h		Rejet + 4h		Rejet + 6h	
		Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)
04/07/79	B	900	20	577	40	428	75
	C	752	20	614	40	318	75
17/10/85	B	227	20	146	50	88	70
	C	190	30	254	60	169	80
23/04/91	B	366	20	149	60	144	100
	C	189	40	144	75	116	100

*Tableau 1 : rejet accidentel de 3 600 t d'Ammoniac. Concentration maximale et distance du centre du panache au point de rejet, à différentes échéances, pour les différentes simulations. Scénario B rejet de 70mn (5dm<sup>2</sup>), scénario C rejet instantané (100 s pour une brèche de 2 m<sup>2</sup>).*

Pour le cas des liquides **Flottants/Evaporants (Xylènes)** Météo France a procédé au couplage des modèles MOTHY et PERLE. L'influence des vents, prépondérante par rapport à la température lors des phénomènes d'évaporation de substances liquides, est quantifiée dans le modèle. Météo France propose une méthode pour déterminer les surfaces de nappes à partir des sorties du modèle MOTHY

Que ce soit en cas de déversement instantané (15 minutes) ou prolongé (24 heures), les concentrations dans l'atmosphère (moyenne dans la couche 0-10 mètres) restent en deçà de

100 ppm. Pour mémoire la valeur AEGL1- 60minutes (Acute Exposure Guidelines Levels) est de 130 ppm), même en cas d'atmosphère stable.

## **Les expérimentations : mesure des panaches et des comportements**

L'Inéris a procédé à des expérimentations qui ont nécessité la mise au point d'une infrastructure importante et de moyens de mesure originaux. Ce bassin de 100m<sup>3</sup> d'eau salée doté d'un générateur de vent et de vagues a fait l'objet de 23 « tirs ». Ceux-ci ont concerné des produits non toxiques. Le GNL, interdit de roulage routier en France, a été remplacé par de l'azote liquide à -190°C.

D'autres gaz liquides ont été testés, tels le Butane (T ébullition =-42°C), le Propane (Teb=-1°C) et le Pentane (Teb=+36°C).

Il apparaît que le nuage dense s'effondre sous l'effet de la densité, prioritairement par rapport aux turbulences de surface générées par le vent (des ventilateurs dans notre cas). Cet effet de densité fait que les zones explosibles ne dépassent pas 1 mètre d'épaisseur au dessus de l'eau. Par ailleurs, il a été montré que le nuage visible (du fait de la condensation des vapeurs d'eau, des aérosols d'eau entraînés par le bouillonnement...) ne correspond pas à la zone dangereuse du nuage et que les zones inflammables peuvent être mesurées en aval du nuage visible.

Ces expérimentations montrent que les phénomènes d'évaporation et de dispersion de gaz en mer sont régis par des lois de comportement différentes de celles appliquées pour un déversement sur un sol.

## **La pénétration d'un gaz dans un aéronef**

Dans l'impossibilité de reprendre des expérimentations de gaz traceur, nous avons comparé les résultats effectués lors de campagnes Pollutmar des années 1990 à 1992 avec des modélisations réalisées à l'aide de deux modèles : Chemmap, modèle d'urgence disponible au *Cedre*, et Phast.

Les aéronefs survolant une nappe (hélicoptères en vol stationnaire) ou en dynamique (avions de surveillance) ont cette particularité soit d'être ouverts sur l'extérieur, soit de n'être pas pressurisés. Nous considérons donc que la pénétration d'un gaz dans un habitacle est quasi instantanée.

Un hélitreuillage étant très délicat à opérer par grands vents au-delà d'une hauteur de 30 mètres une intervention sur un navire transportant de l'Ammoniac et présentant des fuites, sera à envisager avec une très grande prudence, si l'équipage n'est plus à bord ou n'est plus en état de renseigner les sauveteurs sur les concentrations en substance à bord.

Beaucoup de points restent à creuser, non pas uniquement par manque de temps mais parce qu'ils constituent des projets de recherche en eux même. Les expérimentations faites à l'Inéris ont été aux frontières des connaissances des phénomènes se produisant dans les couches limites et sur les facteurs conditionnant le devenir des produits évaporants et des liquides cryogénés.

De même, dans un domaine plus appliqué, il y aurait un intérêt à rendre opérationnel le couplage des modèles de champ proche et de champ lointain.

La perturbation d'un nuage gazeux suite à la présence d'un aéronef reste à quantifier avec précision.

Enfin, il existe un besoin criant de validation des modèles, soit en milieu contrôlé soit en mer ouverte, à l'aide soit de gaz marqueurs en mer ouverte ou de substances dangereuses à l'aide d'un pilote correctement adapté et sécurisé.

### **Les fiches-Intervention**

La **tâche 3** de GALERNE, les «méthodes d'intervention» met à disposition des intervenants, les « fiches-intervention » relatives à l'intervention **d'urgence** en mer sur quelques gaz liquides et deux substances liquides évaporantes.

Il s'agit des substances suivantes :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL)
- Propane
- Ethylène
- Ammoniac
- Chlorure de Vinyle Monomère (CVM)
- Benzène
- Xylènes

Chaque fiche propose :

- Une identification rapide des risques basée sur la classification du Guide ORange des SAPeurs pompiers de Genève (GORSAP).
- Les symboles de danger (code du travail, Transport)
- les risques spécifiques liés au transport maritime
- Les pages concernées de différents guides d'intervention
- Les caractéristiques techniques des navires
- Les risques liés au produit : propriétés, Limites d'inflammabilité, Limites d'exposition...
- L'intervention : premiers secours, détection, équipements spécifiques, mesures de lutte contre l'incendie

- Le descriptif des scénarios et les zones d'exclusion
- Une annexe comprenant les équivalences Beaufort et vitesse du vent, la définition de la classification SEBC, la signification des phrases de risque R/S.

Ces fiches sont précédées d'une « Fiche-Généralités » destinée à recueillir le maximum d'informations pertinentes sur le navire et l'accident, afin d'aborder toute la chaîne d'intervention dans les conditions optimales ;

- Envoi d'une Equipe Evaluation Intervention (EEI)
- Composition de l'EEI
- Conditions de sécurité de l'EEI,
- Zones d'exclusion
- Possibilités d'atteinte des populations côtières.

Ce travail restera cependant à compléter au vu des nouveaux moyens de détection autonomes disponibles sur le marché, des possibilités de traitement des données à bord du navire de commandement sur zone, de transfert de ces données par satellite vers un PC à terre pour être incluses dans un système cartographique complet transférable par Internet.

Le Cedre  
715 Rue Alain Colas, CS 41836  
29218 BREST Cedex 2- France

Tél. 33 (0)2 98 33 10 10  
Fax 33 (0)2 98 44 91 38  
Courriel : [contact@Cedre.fr](mailto:contact@Cedre.fr)  
<http://www.Cedre.fr>

Références Contrat : convention ANR 0594C0065

## GALERNE

### Tâche 1 : transport et définition des scénarios d'accident

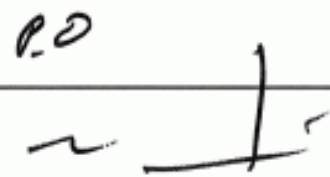
Rédigé par :

Fanch CABIOC'H



Relu par :

Xavier KREMER



Contrôlé par :

Georges PEIGNÉ



Mots clefs : Gaz Liquides, Transport, Accidents, Fiches Réflexes.

Nombre de pages : 192

Hors page de garde / annexes

Nombre de pages annexes : 4

Diffusion :

ANR : 2 CD

Participants au projet : 1 CD pour chacun

Nom du fichier électronique / date de sauvegarde : N:/rapports/2007/R\_07\_37\_C.doc  
Juin 2007

Classement / copie interne : Intervention, Direction, Documentation, Recherche & Développement.

Références internes : R.07.37.C/4216

**AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE**  
**Financement PRECODD**  
**ANR-05-ECOT-008-01**  
**Projet GALERNE**  
**Rapport Scientifique n°1 (juin 2007)**

**1- OBJECTIF GENERAL DU PROJET**

Le projet GALERNE vise à :

- \* obtenir de nouvelles données sur le comportement des gaz liquéfiés et sur les produits évaporants déversés en mer,
- \* calculer et mesurer des taux d'évaporation,
- \* améliorer les connaissances sur la dispersion atmosphérique,
- \* fournir des recommandations sur l'approche d'un chimiquier ou d'un transport de gaz en difficulté,
- \* donner des éléments pour l'adaptation éventuelle des réglementations.

**2- MEMBRES DU CONSORTIUM**

- \* Bureau Enquête Accidents Mer
- \* Bureau Véritas
- \* *Cedre* (Chef de projet)
- \* Gaz de France
- \* Institut National de l'Environnement et des Risques Industriels (INERIS)
- \* Marine Nationale (Commission d'Etude Pratique antiPollution, Marins Pompiers de Brest)

**3- MEMBRE ASSOCIE (non financeur)**

- \* Sécurité Civile, Bureau des Risques Majeurs

**4- MEMBRES ASSOCIES (financeur)**

- \* Total Gaz et Electricité
- \* Total Petro Chemicals

**5- OBJECTIF DE LA TACHE 1 ET CONTENU**

La tâche 1 du projet a pour objectif de cadrer l'étude et les objectifs des opérationnels (tâche 1.1) et de définir les scénarios d'accident (tâche 1.5), nécessaires aux modélisations des tâches 2 et 3.

Pour ce faire, nous avons défini les produits à prendre en compte (initialement prévu en tâche 1.4, nous l'avons fait apparaître juste après les besoins opérationnels). Nous avons effectué un point sur les modes de transport maritime des substances sélectionnées et analysé les accidents maritimes passés ayant impliqué ces substances.

Cette modification dans la succession des sous tâches de tâche 1 nous a paru à l'usage, plus logique.

**Brest, le 29 juin 2007**  
**Fanch CABIOC'H**

## RESUME

*Dans le cadre des actions qui sont définies au cours de la première année du projet Galerne, nous nous sommes intéressés à la définition et au cadrage des besoins exprimés lors d'un accident par les premiers intervenants sur un navire transport de gaz ou de substances évaporantes. Il s'agit avant tout d'opérations quasi-réflexes, c'est-à-dire des phases pour lesquelles la réflexion est antérieure à l'évènement.*

*Si, lors d'accidents maritimes mettant en jeu des navires spécialisés, hors des porte-conteneurs qui présentent d'autres caractéristiques de risque, les cargaisons sont connues (nature des gaz liquides transportés et des substances liquides évaporantes présentes à bord), les opérationnels ont alors des informations contrastées sur la nature de l'accident et les conséquences de ce dernier. Un navire chimiquier pouvant transporter plusieurs substances, les cuves touchées et la nature précise des produits mis en cause, la taille des brèches et les débits de fuite constituent des inconnues que les premiers intervenants doivent intégrer dans leurs procédures, afin, avant toute autre action de sécuriser la situation en mesurant et pesant les prises de risques.*

*Les fiches opérationnelles permettent cette prise de risque calculée et, dans le même temps une cellule d'experts est mise en place. Cette Cellule d'Expertise d'Urgence (C.E.U, armée par les marins-pompiers, les chimistes du LASEM, et le Cedre) reçoit les informations de l'équipe d'évaluation par l'intermédiaire du PC Opérations (PCOPS).*

*Dans un délai de quelques heures après l'évènement, les premiers résultats de modélisations d'urgence parviennent aux intervenants. Ces simulations de comportement (devenir des produits dans l'atmosphère, dans la masse d'eau...), sont effectuées à l'aide de modèles peu sophistiqués, facile à mettre en œuvre et dont les données d'entrée fluctuent en fonction des informations qui parviennent du site de l'accident. Remarquons qu'à ce stade de l'intervention, un support nautique digne de ce nom (PC Avancé) devrait pouvoir transmettre au PCOPS et à la CEU des informations en temps quasi réel et déjà numérisées : mesure des polluants dans l'atmosphère, dans la masse d'eau, météo sur zone....*

*La liste des polluants qui nous intéresse dans le cadre de cette étude est constituée de gaz transportés à l'état liquide et de produits liquides aux conditions normales et évaporants.*

*Le premier groupe de substances, dont la liste est définie dans le Code IGC de l'OMI, comporte 32 produits. Nous avons retenu le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) pour ses propriétés de transport (-162°C) et l'augmentation actuelle et future de sa production et de son transport maritime (plus de 10% par an jusqu'en 2010-2015).*

*Le Gaz de Pétrole Liquide (GPL), du fait de la fréquence de transport et des risques engendrés, est le deuxième produit retenu parmi les gaz liquéfiés.*

*Les produits liquides évaporants sont au nombre d'une cinquantaine, parmi les 600 répertoriés dans le guide IBC de l'OMI. En croisant les listes des tonnages transportés et des accidents passés, nous sommes parvenus à définir deux types de produits : les xylènes et le benzène. Les xylènes (ortho, méta et para) sont des produits flottants dont l'évaporation n'est pas instantanée. Les scénarios pourront ainsi prendre en compte le couplage entre Mothy, logiciel de nappe flottante en dérive et Perle, logiciel simulant le déplacement de nuages gazeux dans le champ lointain.*

*A l'autre extrémité des produits liquides évaporants, nous avons retenu le benzène, qui s'évapore très rapidement. L'étude de la dispersion de ce gaz est particulièrement précieuse par le fait qu'il s'agit d'un gaz inflammable et cancérigène avéré.*

## SOMMAIRE GENERAL

CHAPITRE 1	
Besoins opérationnels.....	2
CHAPITRE 2	
Retour d'expérience .....	32
CHAPITRE 3	
Les gaz liquéfiés .....	78
CHAPITRE 4	
Etablissement des scénarios d'accident .....	140
CONCLUSION DE LA TACHE 1 .....	192



# CHAPITRE 1

# SOMMAIRE

<b>1- GALERNE : besoins opérationnels et choix des substances étudiées</b>	<b>5</b>
<b>1.1- Cadrage des objectifs et des besoins</b>	<b>5</b>
<b>1.1.1- Objectifs de la sous tâche</b>	<b>5</b>
<b>1.1.2- L'intervention sur navire en difficulté</b>	<b>6</b>
<i>1.1.2.1- La protection des premiers intervenants</i>	<i>6</i>
<i>1.1.2.2- La protection des populations et la prise de décision</i>	<i>8</i>
<b>1.1.3- Les deux niveaux d'intervention</b>	<b>11</b>
<b>1.1.4- Schéma de la fiche opérationnelle d'urgence</b>	<b>11</b>
<b>1.1.5- Points particuliers</b>	<b>14</b>
<b>1.2- Choix des substances à prendre en compte</b>	<b>16</b>
<b>1.2.1- Les gaz liquéfiés en vrac</b>	<b>16</b>
<b>1.2.2- Les produits liquides Flottants - Evaporants</b>	<b>16</b>
<b>2- Analyse du trafic maritime de substances chimiques</b>	<b>20</b>
<b>2.1- Introduction</b>	<b>20</b>
<b>2.2- Evolution du trafic de gaz naturel liquide</b>	<b>20</b>
<b>2.3- Trafic maritime en Manche</b>	<b>22</b>
<b>2.4- Trafic mondial des produits chimiques en vrac</b>	<b>24</b>
<b>3- Accidentologie maritime et produits chimiques</b>	<b>25</b>
<b>3.1- Types de navires impliqués</b>	<b>26</b>
<b>3.2- Mode de conditionnement des substances</b>	<b>27</b>
<b>3.3- Substances chimiques déversées</b>	<b>27</b>
<b>3.4- Tonnage des déversements</b>	<b>29</b>
<b>3.5- Comparaison avec les résultats de l'US Coast Guard et Environnement Canada</b>	<b>30</b>
<b>4- Conclusion : -Etude des scénarios et travail expérimental</b>	<b>31</b>
<b>-Sélection des produits chimiques</b>	<b>31</b>

## RESUME DE LA TACHE 1

*Dans le cadre des actions qui sont définies au cours de la première année du projet Galerne, nous nous sommes intéressés à la définition et au cadrage des besoins exprimés lors d'un accident par les premiers intervenants sur un navire transport de gaz ou de substances évaporantes. Il s'agit avant tout d'opérations quasi-réflexes, c'est-à-dire des phases pour lesquelles la réflexion est antérieure à l'évènement.*

*Les fiches opérationnelles dont nous proposons une première mouture permettent cette prise de risque calculée, la tâche 3 permettra de compléter ces fiches après étude des scénarios.*

*La liste des polluants qui nous intéresse dans le cadre de cette étude est constituée de gaz transportés à l'état liquide et de produits liquides évaporants aux conditions normales.*

*Le premier groupe de substances, dont la liste est définie dans le Code IGC de l'OMI, comporte 32 produits. Nous avons retenu le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) pour ses propriétés lors du transport (-162°C) et l'augmentation actuelle et future de sa production et de son transport maritime (plus de 10% par an jusqu'en 2010-2015). L'augmentation du nombre de navire (plus de 150 jusqu'à 2011) posera la question de la formation des équipages, critère de base en terme de sécurité.*

*Le Gaz de Pétrole Liquide et tout particulièrement le butane, (ou le propane), et éthylène/propylène.*

*Les produits liquides évaporants sont au nombre d'une cinquantaine, parmi les 600 répertoriés dans le guide IBC de l'OMI. En croisant les listes des tonnages transportés et des accidents passés, nous sommes parvenus à définir deux types de produits : les xylènes et le benzène. Les xylènes (ortho, méta et para) sont des produits flottants dont l'évaporation n'est pas instantanée. A l'inverse, nous avons retenu le benzène, qui s'évapore très rapidement, sans produire de nappe flottante, au-delà de quelques heures.*

*Le retour d'expérience des accidents (dénombrement, analyse) ayant mis en jeu des méthaniers et des GPLiers montre que le nombre de ces navires (respectivement 176 et 235 navires en 2006, GWT supérieur à 12500 t,) est relativement peu important pour en tirer des conclusions statistiques alors que les chimiquiers et les GPLiers (GWT inférieur à 12 500 t) se comptent respectivement à 1400 et 850 navires. Sur ces deux derniers types de navire, 30% des chimiquiers subissant un accident présentent des fuites, contre 8% pour les GPLiers (GWT inférieur à 12 500t).*

*La collision reste le type d'accident le plus fréquent pour tous les types de navires concernés par l'étude. Dans le cas de GPLiers pressurisés, il n'y a eu de fuite que dans le cas d'une collision. Les chimiquiers par contre peuvent être l'objet de fuite dans tous type d'accident (collision, explosion, naufrage).*

*Une partie importante de la tâche 1 a été de décrire le mode de transport des Gaz liquéfiés et des substances chimiques évaporantes. Méthaniers, GPLiers pressurisés, semi-pressurisés et réfrigérés, sont décrits en terme de définitions des types de citerne et de protection de celle-ci.*

*La résistance à la collision et à l'échouement a été analysée en terme de type de construction des citernes, de la plus sécurisée (1G) au standard minimum (3G). Enfin, la sécurité à bord des transports de gaz est décrite de manière simple.*

*Les 15 scénarios que nous avons pris en compte sont le résultat des quatre chapitres précédents et se comptent comme suit :*

<i>GNL.</i>	<i>5 scénarios : 3 collisions, 1 échouement et une fuite de pont</i>
<i>GPLiers.</i>	<i>4 scénarios</i>
	<i>Type C, collision, Ammoniac</i>
	<i>Type C, collision, Chlorure de vinyle,</i>
	<i>Type C, Collision, Butane ou Propane</i>
	<i>Type C, Collision, Ethylène</i>
<i>Chimiquiers</i>	<i>6 scénarios,</i>
	<i>Collision, Xylène, deux scénarios</i>
	<i>Collision, Benzène, deux scénarios,</i>
	<i>Explosion, Benzène, un scénario</i>
	<i>Incendie, Benzène</i>

# **1. GALERNE : BESOINS OPERATIONNELS ET CHOIX DES SUBSTANCES ETUDIEES.**

Le projet GALERNE est un projet de recherche de trois ans relatif aux comportements des liquides flottants évaporants et gaz transportés à l'état liquide, tels que définis dans le code IBC de l'Organisation Maritime Internationale, en cas d'épandage et de fuite accidentels. L'aspect risques de nuisances doit être ainsi pris en compte, tant sur la plan de la protection des intervenants que sur celui des populations éventuellement atteintes par un nuage gazeux généré par un accident à proximité des côtes (cas des rails de navigation dans un détroit). Les navires qui sont pris en compte dans cette étude sont les chimiquiers tels que définis dans le code IBC de l'OMI et les transports de gaz définis dans le code IGC. Ce premier paragraphe est le fruit d'une réflexion à laquelle les intervenants en cas d'incident maritime ont été étroitement associés. Il nous apparaît en effet important de définir, dès le début de l'étude, ce dont ceux-ci ont besoin afin d'intervenir dans de bonnes conditions, c'est-à-dire en minimisant les risques autant que faire se peut, chaque intervention en mer étant par définition difficile et pleine d'imprévis.

Dans ce rapport, nous abordons les aspects ayant trait à la définition des besoins des organismes opérationnels et au choix des substances à prendre en compte dans les scénarios. Les scénarios d'accident découlent directement de l'accidentologie et seront traités ultérieurement par le Bureau Veritas.

## **1.1. CADRAGE DES OBJECTIFS ET DES BESOINS**

*(partenaires : Cedre, Ineris, Ceppol, Marins Pompiers)*

### **1.1.1. OBJECTIFS DE LA SOUS-TACHE**

Les objectifs qui suivent constituent des fils conducteurs que les partenaires du projet doivent garder à l'esprit. Ils ont été rappelés et précisés lors de la réunion de lancement de projet le 27 janvier 2006 à Brest et lors de la seconde réunion plénière du 14 septembre 2006 au siège de la Direction de la Défense et de la Sécurité Civile à Asnières.

Il s'agit de :

- Bien cadrer les nécessités de l'intervention d'urgence à caractère réflexe.
- Réfléchir aux données de première urgence.
- Fournir des fiches scénarios à utiliser par défaut.
- Contribuer à lister les moyens pour permettre de recueillir des données « terrain ».
- Contribuer à passer de la phase « intervention réflexe » à la phase « intervention réfléchie ».
- Définir et valider les outils indispensables au traitement de la crise par une expertise plus précise mais plus longue à mettre en œuvre.
- Rester dans un cadre opérationnel.

## 1.1.2. L'INTERVENTION SUR NAVIRE EN DIFFICULTE

Décider, c'est faire un choix souvent en situation d'incertitude. C'est pour limiter ces incertitudes qu'une mission d'évaluation à bord est mise en oeuvre très rapidement par les autorités maritimes en mobilisant une équipe **d'Evaluation/Intervention**, disponible 24h/24. Des instructions fixent la composition des équipes, les procédures de mise en oeuvre et les équipements de mesure et de protection indispensables, suivant le type d'avarie (feu, voie d'eau, risque chimique).

Par essence délicate, cette mission d'Evaluation/Intervention prend en compte deux aspects :

**a) L'évaluation** de la situation par une équipe hélicoptérisée dont la composition est définie dans les plans Polmar Mer, en fonction des différentes situations. L'investigation par cette équipe permet de renseigner le PC Opérations (Centre Opérationnel de la Marine basé dans une Préfecture Maritime) sur l'état du navire, tant pour ce qui concerne le risque propre au navire que le risque de pollution, avéré ou possible. Les décisions relatives au navire (remorquage vers telle ou telle zone abri, éventuellement vers un port si le navire est sécurisé), ou aux mesures antipollution seront prises à partir des informations fournies par l'équipe d'évaluation.

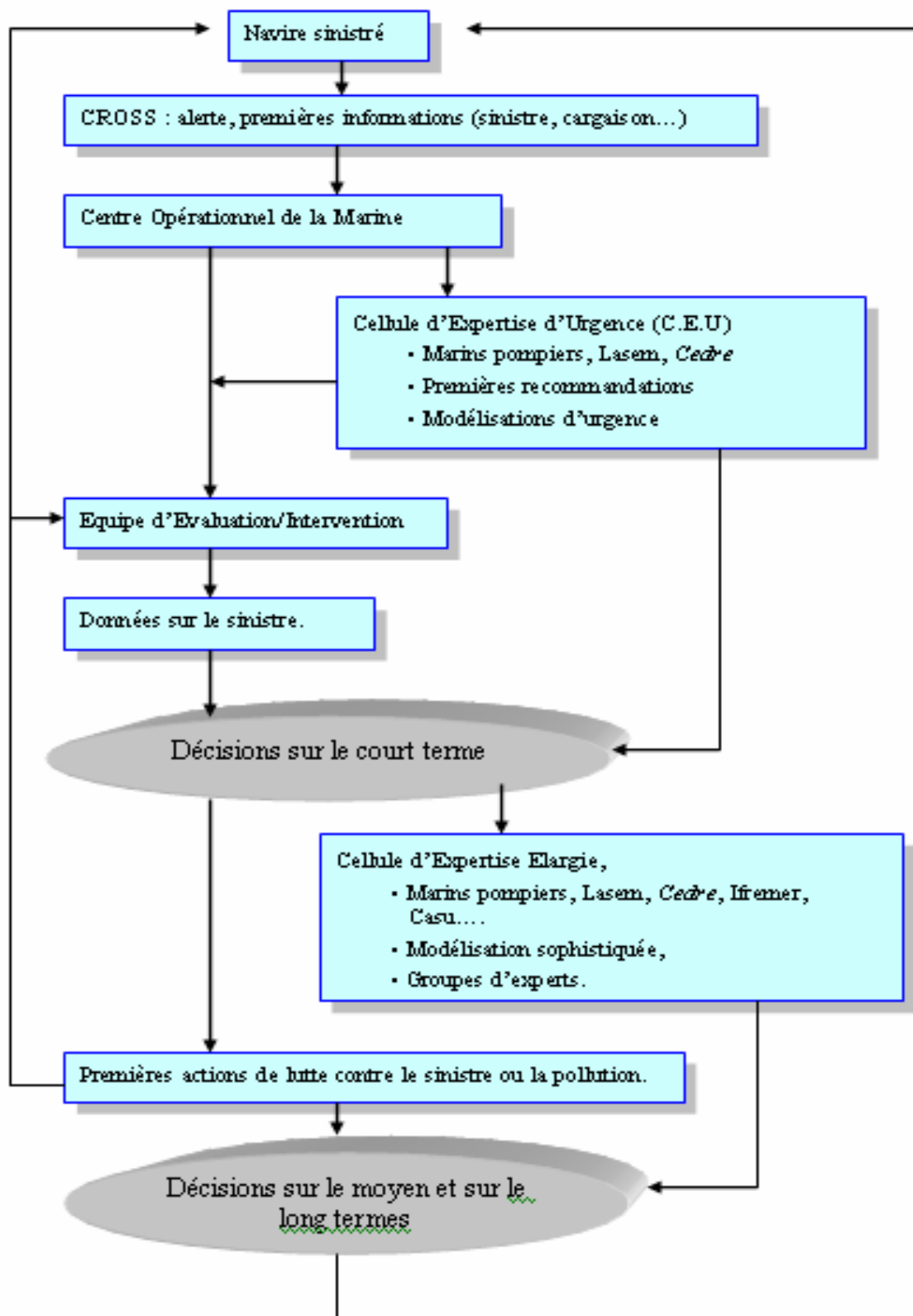
**b) La lutte** contre un sinistre déclaré, l'équipage du navire n'étant pas en mesure d'y faire face seul, soit parce qu'il a quitté le bord (il se peut que le capitaine, son second et le chef mécanicien restent à bord pour guider l'équipe d'Evaluation), soit parce qu'il a été victime lui-même du sinistre.

En préalable à cette mission, la nature de la cargaison du navire est recherchée par les Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage (cette recherche sera par la suite effectuée par les services de l'Action de l'Etat en Mer). L'information est en général très rapidement accessible dans le cas des chimiquiers, plus longue à obtenir dans le cas des porte-conteneurs. Ces derniers ne sont pas inclus dans Galerne.

### *1.1.2.1. La protection des premiers intervenants : la Phase Réflexe*

Une fois la cargaison connue, les CROSS ou les AEM demandent alors aux experts de la Marine (Marins- pompiers, chimistes du LASEM) ou aux conseillers techniques (*Cedre*) de fournir une première évaluation des dangers afin de prémunir les équipes d'intervention contre les risques toxiques et d'inflammation (voir diagramme n°1 "Schéma des actions")

Plusieurs niveaux d'informations sont demandés à la **Cellule d'Expertise d'Urgence** par le Centre Opérationnel de la Marine :



**Diagramme 1 : L'intervention sur navire en difficulté : schéma des actions**

**a) Le comportement du produit.**

S'agit-il d'un produit qui génère des gaz (évaporation) ou qui reste flottant ? Quels sont les risques de réaction tels la polymérisation brutale en cas d'incendie à bord d'un navire transportant un monomère ou une réaction violente avec l'eau de mer... ?

**b) Les dangers propres au produit.**

La classification de danger (corrosivité, inflammabilité, brûlures par le froid, asphyxie, toxicité...) constitueront ensuite un élément de décision important.

**c) Les Limites d'Exposition en Situation d'Urgence (LESU).**

Dans le cas de produits évaporants (toxiques, corrosifs, asphyxiants) les valeurs relatives à l'intervention seront à fournir :

➤ L'**IDLH** (Immediately Dangerous for Life and Health) valeur anglo-saxonne qui présente l'avantage d'être connue de tous les sapeurs pompiers.

➤ La **VLE** (Valeur Limite d'Exposition) constitue une donnée française qui n'existe malheureusement pas pour tous les produits.

➤ La **TLV-STEL** (Threshold Limit Value-Short Time Exposure Limit) constitue une moyenne sur 15mn qu'il ne faut jamais dépasser sans protection)

Ces valeurs correspondent à des seuils au dessous desquels un ensemble de symptômes ne surviendra pas, compte tenu d'une exposition relativement brève. Ces valeurs ne conviennent pas aux populations.

Les Limites d'explosivité (ou d'inflammabilité) seront aussi des éléments à fournir.

*Attention aux problèmes de conversion : certaines données sont en pourcentage (explosivité), d'autres en ppm (partie par million) ou en mg/m<sup>3</sup> d'air. Il faut être précis sur ces points d'unité.*

### **1.1.2.2. La protection des populations et la prise de décision**

Nous ne sommes plus dans l'urgence proprement dite mais dans la réflexion et la prise de décision sur le devenir du navire. Le navire sinistré doit être pris en remorque soit pour l'éloigner d'une zone sensible et urbanisée soit au contraire pour le rapprocher d'une zone abri où il sera sécurisé voire allégé. Les routes maritimes font passer ces navires dans des détroits, à proximité de côtes ayant une forte densité de population. Les autorités se basent sur des scénarios et des calculs mis au point par les experts pour fonder leur décision. Or, renseigner ces scénarios c'est déjà bien comprendre le comportement du produit une fois libéré en mer.

Les valeurs LESU à prendre en compte dans la protection des populations sont les **ERPG** (Emergency Response Planning Guidelines) ou les **TEELs** (Temporary Emergency Exposure Limit). Cette recommandation des Centres Antipoison permet de définir les seuils en dessous desquels une population sera confinée ou au contraire évacuée. On imagine sans peine que l'évacuation d'une grande quantité de personnes est une mesure lourde à mettre en œuvre, compte tenu de la logistique qu'elle implique mais aussi des effets psychologiques induits (panique, colère...)



Ainsi, nous voyons que dans les deux cas de figure que nous venons d'évoquer, le problème n'est pas tant dans la lecture des FDS (Fiches de Données Sécurité) dont les 16 rubriques ne sont pas adaptées à l'intervention sur un sinistre, que dans le comportement du produit lui-même.

Les questions suivantes restent posées :

- Comment va se faire l'approche par hélicoptère ?
- La zone d'évacuation autour du navire est-elle suffisante ?
- Comment effectuer une surveillance par aéronef et à quelle hauteur se placer ?
- Que faire du navire ?
- Les populations (même distantes de plusieurs dizaines de kilomètres) vont-elles ressentir quelque chose et en particulier une odeur qui elle-même peut être le signe d'une concentration très faible au regard des concentrations dangereuses ? Comment dans ce cas expliquer aux personnes exposées à ces faibles teneurs de ne pas se précipiter dans le service d'urgence de l'hôpital le plus proche ?





## FICHE 1 : RENSEIGNEMENTS SUR LE SINISTRE

	<b>Méthode d'intervention "POLLUTION AQUATIQUE CHIMIQUE"</b> <b style="background-color: yellow;">Fiche guide n°1 : « Renseignements »</b>	 Cedre
--	---	--

### Source

Origine	Phase	Importance	Localisation
<input type="checkbox"/> Echouement <input type="checkbox"/> n <input type="checkbox"/> Collision <input type="checkbox"/> Navire coulé <input type="checkbox"/> Autre : .....	<input type="checkbox"/> Solide, vrac, ou poudre <input type="checkbox"/> Liquide <input type="checkbox"/> Gazeuse <input type="checkbox"/> Biphasique	<input type="checkbox"/> Filet <input type="checkbox"/> Goutte à goutte <input type="checkbox"/> Brèche <input type="checkbox"/> Jet sous pression <input type="checkbox"/> Fuite alimentée : débit : ..... <input type="checkbox"/> Autre : .....	<input type="checkbox"/> Bride <input type="checkbox"/> Vanne <input type="checkbox"/> Trou d'homme <input type="checkbox"/> Paroi <input type="checkbox"/> Autre : ..... .....

### Environnement

Air	Eau
<input type="checkbox"/> Pluie <input type="checkbox"/> Soleil  T° de l'air : ..... °C Vitesse du vent (unité): .....	<input type="checkbox"/> Maritime T° de l'eau : ..... °C Profondeur : ..... mètres Distance à la côte (unité) : ..... Vitesse du courant (unité) : ..... Direction du vent :  Direction du courant : 

### Cibles recensées













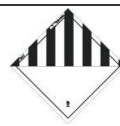

Population     Environnement     Intervenants     Autre : .....

### Substance

Inconnue     Connue → nom commercial : ..... nom chimique : .....  
 Prélèvement effectué  
 Volume déjà déversé (unité) : .....    Volume pouvant encore se déverser (unité) : .....

#### Aspect de la substance au premier abord

Couleur : .....    Odeur : .....  
 Viscosité apparente : .....    La substance s'étale rapidement ?     Oui     Non  
 Densité apparente : .....    La substance semble flotter ?     Oui     Non  
 Solubilité apparente : .....    La substance semble se dissoudre dans la colonne d'eau ?     Oui     Non  
 Toxicité apparente : .....    Poissons ou autres organismes morts ?     Oui     Non  
 Autre observation : .....

Plaque orange	Pictogrammes (entourer)						
Inscrivez ici les numéros :  <div style="border: 2px solid red; width: 100px; height: 100px; margin: 10px auto; background-color: red; display: flex; align-items: center; justify-content: center; color: white; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">             CODE DANGER           </div> <div style="border: 2px solid red; width: 100px; height: 100px; margin: 10px auto; background-color: red; display: flex; align-items: center; justify-content: center; color: white; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">             N° ONU           </div>	 N° 1 Explosif	 N° 2 Gaz non infla.	 N° 2 Gaz inflamm.	 N° 3 Liquide inflam.	 N° 4.1 Solide inflam.	 N° 4.2 Inflam. spont.	 N° 4.3 Hydroréactif
	 N° 5 Comburant	 N° 6.1 Toxique	 N° 6.2 Infectieux	 N° 7 Radioactif	 N° 8 Corrosif	 N° 9 Divers	 Chaud

#### Caractéristiques de la substance

Toxique pour l'homme    → valeur seuil (SES, IDLH, VLE, ...) : .....  
 Toxique pour l'environnement    → valeur seuil (SES, IDLH, VLE, ...) : .....  
 Inflammable ou explosif    → LIE / LSE : .....    Point éclair : .....  
 Réactif avec l'eau  
 Corrosif / Valeur de pH : .....  
 Concentration [si acide ou base] : .....

Solubilité (% massique) : .....  
 Densité relative / eau : .....  
 Pression de vapeur (préciser bars ou kPa) : .....

### 1.1.3. LES DEUX NIVEAUX D'INTERVENTION

L'intervention d'urgence à bord (Equipe d'Evaluation/Intervention) et la prise de décision sur le devenir du navire posent les mêmes questions mais le facteur temps varie, ce qui implique l'utilisation d'outils différents :

**Pour l'intervention réflexe**, il faut, une fois le produit connu et les fiches de sécurité obtenues, avoir accès à des fiches actions regroupant les consignes d'approche et d'investigation en fonction d'un produit évaporant donné.

Il faut considérer les paramètres suivants :

- Nature du produit
- Volume estimé
- Typologie de l'accident (échouement, collision...)
- Stabilité atmosphérique
- Conditions météo-océaniques sur zone

Ces données permettent l'accès aux fiches scénarios réflexes et à la modélisation d'urgence effectuée à l'aide de modèles simples de type Chemmap (ASA).

**L'intervention réfléchie** permet aux appareils de mesure et aux modélisateurs d'entrer en jeu. Les intervenants ne sont plus laissés à eux-mêmes et les experts de différents horizons peuvent discuter entre eux. Les scénarios peuvent aller de la rupture partielle d'une cuve de transport de gaz liquéfié à la dérive en surface d'un produit évaporant (référence Ievoli Sun et les nappes de Styrène).

Les données d'entrées sont plus précises que précédemment :

- Définition du terme source
- Données et prévisions météo-océaniques plus fines
- Modélisation du champ proche possible (INERIS)
- Modélisation du champ lointain associée à la dérive de nappes possible (Météo France)

### 1.1.4. SCHEMA DE LA FICHE OPERATIONNELLE D'URGENCE

Les fiches opérationnelles telles que définies dans la tâche 3 de Galerne doivent permettre aux intervenants d'avoir :

- 1- Une meilleure connaissance des risques liés aux produits.
- 2- Une meilleure connaissance des risques liés à l'intervention.

La fiche Intervention doit être spécifique à une famille de produits afin de pouvoir balayer en **une dizaine de fiches** une majorité des produits transportés par les chimiquiers et par les transports de gaz liquéfiés.

La première partie de la fiche intégrera **l'identification, la description, les dangers et les premiers secours** pour la famille considérée. Par exemple on y trouvera :

- ✓ quelques propriétés physico-chimiques pouvant s'avérer utiles en intervention (par exemple la tension de vapeur afin de savoir si le produit s'évapore rapidement),
- ✓ les symboles de danger,
- ✓ les éventuels produits de décomposition (produit de désagrégation chimique ou thermique d'une substance),
- ✓ les réactions dangereuses (polymérisation...),
- ✓ le comportement (réaction, évolution... de la substance en cas de choc, de contact avec l'eau...),
- ✓ les risques de pollution environnementale.

Une seconde partie sera davantage liée à l'intervention :

- ✓ **les moyens d'approche et de détection** (les appareils de détection utilisables pour la substance donnée et disponibles auprès des intervenants). Deux catégories pourront être données : la méthode directe (mesure du produit) et la méthode indirecte (mesure d'un produit de dégradation ou d'un paramètre (par exemple une mesure d'explosimétrie).
- ✓ **l'intervention en cas d'incendie** : les moyens d'extinction appropriés, les mesures d'extinction à éviter, les risques particuliers lors d'un incendie, les instructions...
- ✓ **l'intervention en cas de dispersion**. En plus des éventuelles mesures de protection, il sera indiqué les zones d'effet pour des risques toxiques et d'explosion au vu de certains scénarios caractéristiques.

Suivant les types de fuite (sous le niveau de flottaison, fuite bi-phasique...), on retrouvera, suivant les conditions météo :




- ✓ la forme du nuage,
- ✓ la hauteur,
- ✓ l'éventuelle dispersion du nuage et de la nappe (les deux n'étant pas forcément dans la même direction).

Dans l'ensemble des cas, on tiendra compte de l'exposition des personnes intervenant soit par voie aérienne (pilote d'hélicoptère et personne hélitreuillée) soit par voie maritime (zodiac).

Les turbulences dues à l'hélicoptère devront également être prises en compte selon les référentiels disponibles.

Une annexe pourra regrouper l'ensemble des produits faisant référence à la fiche sous forme d'un tableau indiquant le n° ONU, le n° CAS, le n° CANUTEC et le code danger.

## FICHE 2 : Synthèse données Urgence sur le benzène

# BENZENE : UN 1114


- **PHYSICO CHIMIE**
  - LIQUIDE DANS LES CONDITIONS AMBIANTES
  - MASSE MOLECULAIRE
  - POINT EBULLITION
  - POINT DE FUSION
  - POINT ECLAIR : -11,1°C
  - DENSITE
  - PRESSION DE VAPEUR
  - VISCOSITE
  - SOLUBILITE
  - SEUIL OLFACTIF
- **RISQUES**
  - TOXICITE :
    - 25 ppm pas d'effet
    - 50-100 ppm céphalées
  - IDLH : 500 ppm
  - TLV-TWA : 0,5 ppm
  - **Forme des mélanges explosifs avec l'air**
    - Limites explosivité 1,2%-8% (12000ppm/80000 ppm)
    - Combustion CO, CO2, H2O, NOx
    - Réaction dangereuses avec K, les oxydants (Cl2, Acides, peroxydes)

**SEBC : E**

**MARPOL : Y**

**CONVERSION : 1ppm = 3,5 mg/m3**

R45 : peut causer le cancer  
 R23/24/25 : toxique par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion



## FICHE 3 : Synthèse des résultats de modélisation

# MODELISATION

- Scénario : 100 t/h en 5 heures vent 10m/s

**Résultats du scénario "Manche"**

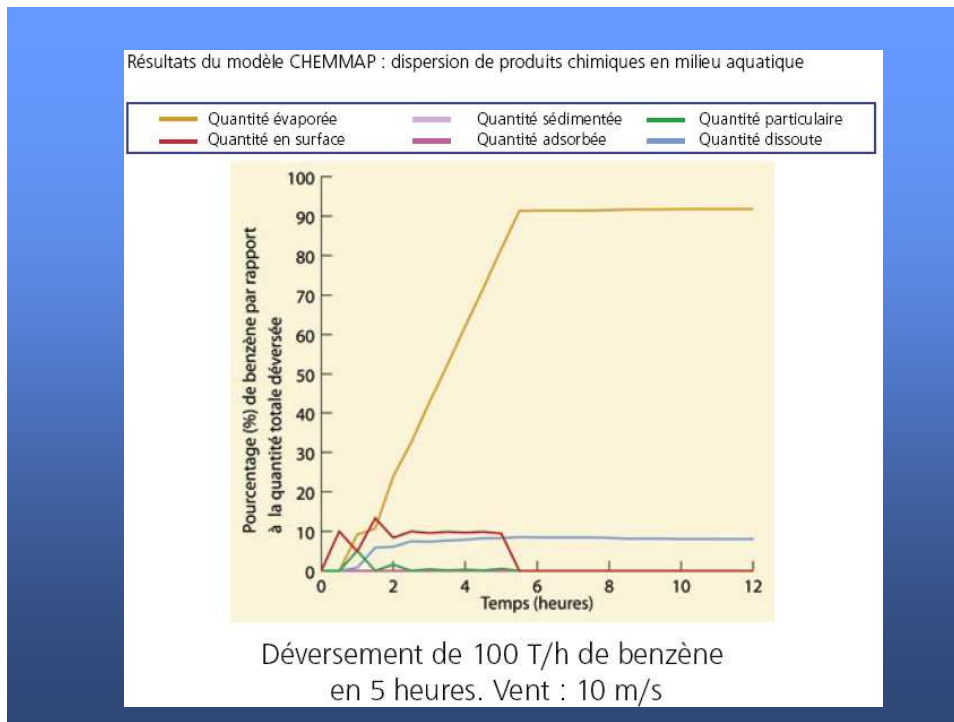
Résultats du modèle ALOHA : dispersion atmosphérique

Quantité déversée	Vent	Concentration (ppm)	Distance maximale atteinte Longueur sur largeur	Protection
100 t/h	10 m/s	0,5 (TLV-TWA)	> 10 km sur 8 km	B
		2 (seuil olfactif)	9,5 km sur 6 km	B
		500 (IDLH)	550 m sur 400 m	C
		12 000 (LIE)	100 m sur 60 m	D

<b>A</b>	Pas de danger.	<b>C</b>	Se munir d'Equipements de Protection Individuelle. Utiliser un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA).
<b>B</b>	Se munir d'Equipements de Protection Individuelle. Utiliser un masque à gaz.	<b>D</b>	Zone où la concentration en benzène atteint les limites d'explosivité. Se munir d'un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) et utiliser du matériel antidéflagrant.

## FICHE 4 : Synthèse graphique du comportement du benzène



### 1.1.5. POINTS PARTICULIERS

#### *-Nombre de fiches*

Il faut compter environ une dizaine de fiches. Chacune doit être associée à une famille de produits ou à un produit représentant une famille de produits (même comportement, même danger...). Les sous-tâches 1.3 et 1.5 du projet doivent permettre de voir si le nombre de fiches est réaliste en s'assurant que les produits qui seront regroupés dans la même famille aient les mêmes propriétés " générales " : réactivité avec l'eau, propriétés....

Il est possible qu'au vu de ces opérations :

- ✓ les fiches soient typiques d'un produit si les produits transportés ou mis en cause lors d'accidents se réduisent à une dizaine de produits.
- ✓ le regroupement en une dizaine de familles ne soit pas possible (du fait du nombre de produits ou de leurs caractéristiques). Dans ce cas, il conviendra de réduire la spécificité des fiches afin de pouvoir effectuer seulement une dizaine de fiches.

#### *-Stratégie des marins pompiers de Brest*

Ce paragraphe a pour but d'indiquer certains points particuliers de l'intervention des marins pompiers de Brest lors d'accident de navires :

1. L'hélicoptère du personnel sur le navire en détresse s'effectue uniquement si le pont du bateau est sûr.

2. Un hélitreuillage peut s'effectuer entre 10 et 30 mètres d'altitude.
3. La tenue de protection du personnel, lors d'un hélitreuillage, est une tenue de protection légère et avec un masque à cartouche. Le pilote ne peut être équipé comme le reste de l'équipage (son éventuel équipement de protection reste à étudier).
4. L'utilisation d'un bateau relais (navire de la Marine ou non) avant l'intervention permet aux intervenants de s'équiper avec des tenues de protection spécifiques au risque chimique. Cette intervention se fait en bateau pneumatique.
5. Des lots d'équipements pour l'intervention chimique sont définis, préemballés en conteneur et pesés en avance afin d'assurer une mise à disposition rapide en cas d'accident.
6. Lors d'un accident, les différentes questions permettant aux marins pompiers de définir leur mode d'intervention sont : l'information sur le produit en cause et sur la fuite, le comportement de l'équipage du navire en difficulté, l'état du bateau et de la mer et la présence d'un autre bateau à proximité (bateau relais).

#### ***-Dispersion due à l'hélicoptère***

Deux cas peuvent être notés lors de l'intervention de l'hélicoptère au-dessus d'un nuage explosible ou toxique :

- ✓ l'hélicoptère intervient en présence d'un vent fort (environ 30 nœuds) : la dispersion se fait parallèlement au niveau de la mer,
- ✓ l'hélicoptère intervient en présence d'un vent faible (10 nœuds) : du fait des turbulences de l'appareil une re-circulation du produit gazeux peut s'effectuer et entraîner une dispersion au niveau de l'hélicoptère (autour de l'appareil ou/et dans l'habitacle).

Cependant, les données précises manquent sur l'élévation du nuage gazeux en fonction de la densité du gaz et des conditions des vents. Mais on sait que la pénétration dans les habitacles se fait très rapidement (moins d'une minute). En tout état de cause, l'approche ne devrait pas se faire à une altitude inférieure à 40 mètres.

#### ***-Scénarios***

Il est souhaitable que les scénarios soient accessibles sous Excel, pour une meilleure exploitation ultérieure par les participants et utilisateurs.

Ces scénarios vont constituer les références opérationnelles des fiches d'intervention. Il a été défini que les scénarios ne prennent en compte que des accidents maritimes, en dehors de ports ou terminaux

## FICHE 5 : Synthèse des actions

# FICHES INTERVENTION

**Caractéristiques physico-chimiques de la classe définie**

**Risques majeurs**

**Indication sur le comportement attendu**

E: Évaporant  
F: Flottant  
S: Coulant  
D: Soluble

**Actions prioritaires**

**Définition de la stratégie globale d'intervention**

**Technique d'intervention**

## 1.2. CHOIX DES SUBSTANCES A PRENDRE EN COMPTE

### 1.2.1. LES GAZ LIQUEFIES EN VRAC

Galerie s'adresse en priorité à la problématique des gaz transportés à l'état liquide. La liste de ces produits est donnée dans le code IGC édité par l'Organisation Maritime Internationale. 32 produits sont répertoriés dans le guide (10 produits apparaissent aussi dans la classification IBC, produits liquides transportés en vrac). Nous nous intéresserons en particulier au méthane ou Gaz Naturel Liquéfié, transporté à la température de -142°C et au Gaz de Pétrole Liquéfié. Ces substances sont classées E par la classification SEBC, c'est-à-dire des produits exclusivement évaporants.

Cependant, certaines substances listées dans le code IGC sont caractérisées par un pouvoir de dissolution dans l'eau supérieure à 10%. Il faut prendre en compte cette dissolution en particulier quand on a affaire à une épave ou lors de l'intervention (protection par rideaux d'eau, ou par murs d'eau). Nous pensons en particulier au Chlore et à l'Ammoniac, notés ED dans la classification SEBC. Ces produits gazeux Solubles sont au nombre de 3 : le Chlore, l'Anhydride arsénieux et l'Ammoniac.

### 1.2.2. Les produits liquides Flottants-Evaporants (FE)

Produits listés dans le code IBC (résolution du Maritime Safety Committee 176(79) adoptée le 10 décembre 2004).



Les substances retenues seront celles dont les propriétés en font une substance dite Evaporante, Evaporante Dissolvante, Flottante Evaporante, Flottante Evaporante Dissolvante respectivement notées, E, ED, FE, FED, selon la classification SEBC (Standard European Classification System (voir diagramme n°2, schéma de la classification, p18).

Parmi ces 545 produits présentant un risque pour la santé humaine ou un risque de pollution, certains sont susceptibles de flotter et s'évaporer en produisant des vapeurs inflammables et/ou toxiques.

Cependant, après avoir examiné les propriétés de ces produits (densité, solubilité et tension de vapeur), le nombre de substances classées Evaporantes, y compris les comportements hybrides, s'élève à 67.

Or, si dans le cadre de notre travail, nous ne nous intéresserons qu'aux substances flottantes, donc de densité inférieure à celle de l'eau de mer, dont la densité est en moyenne de 1,025 sous nos climats, il s'avère que d'autres substances évaporantes ont des propriétés hybrides.

➤ **Evaporants (E) : 13**

Benzène, Cyclopentane, Ethyl tert-butyl Ether, Hexane, heptène, Isoprène, Pentène, Toluène...

➤ **Flottant-Evaporants (FE) : 31**

Acrylonitrile, Alkanes, Alkylbenzènes, Methacrylate de Butyle, Cycloheptane, Cyclohexanone, Dimethyldisulfure, Ethylbenzène, Nonène, Octane, Octène, Propylbenzène, Styrene, Triméthylbenzène, Xylènes...

➤ **Flottants-Evaporants-Dissolvants (FED) : 23**

Amylalcool, Amylacetate, Butylacétate, Butylacrylate, Butylpropionate, Cyclohexylacetate, Diisobutylamine, 1,4, Dioxane Dipropylamine, 1,6 hexanediol, Methylbutyl cétone, Méthylisobutylcétone, ...

➤ **Dissolvants-Evaporants (DE) : 33**

Ammoniac en solution aqueuse à moins de 28%, Sulfure d'ammonium en solution à moins de 45%, Butylene oxide, Butyraldéhyde, Diéthylamine, Diisopropylamine, Diméthylamines, Ethylamines, Acide hydrochlorique, Isopropylamine, Methylacetate, Methylalcool, MethylEthylcétone, Vinyl acetate...

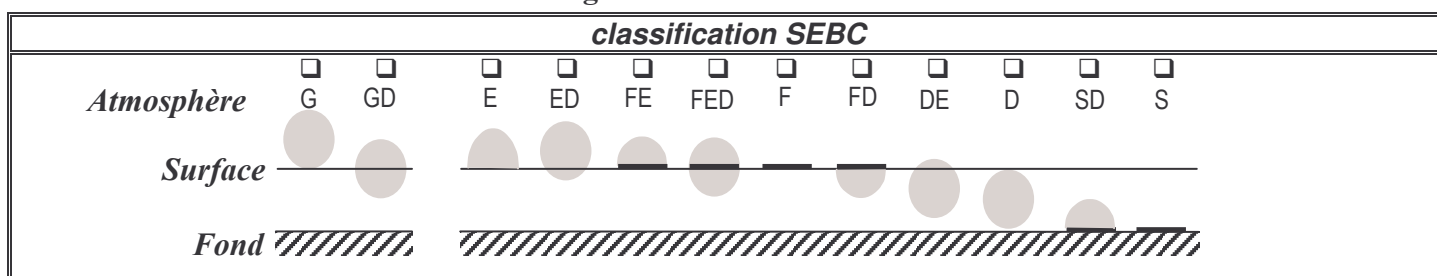
***Les produits présentant un risque particulier***

Pour ce qui concerne les risques particuliers, peu de produits (une quinzaine au total) produisent des vapeurs particulièrement dangereuses, soit :

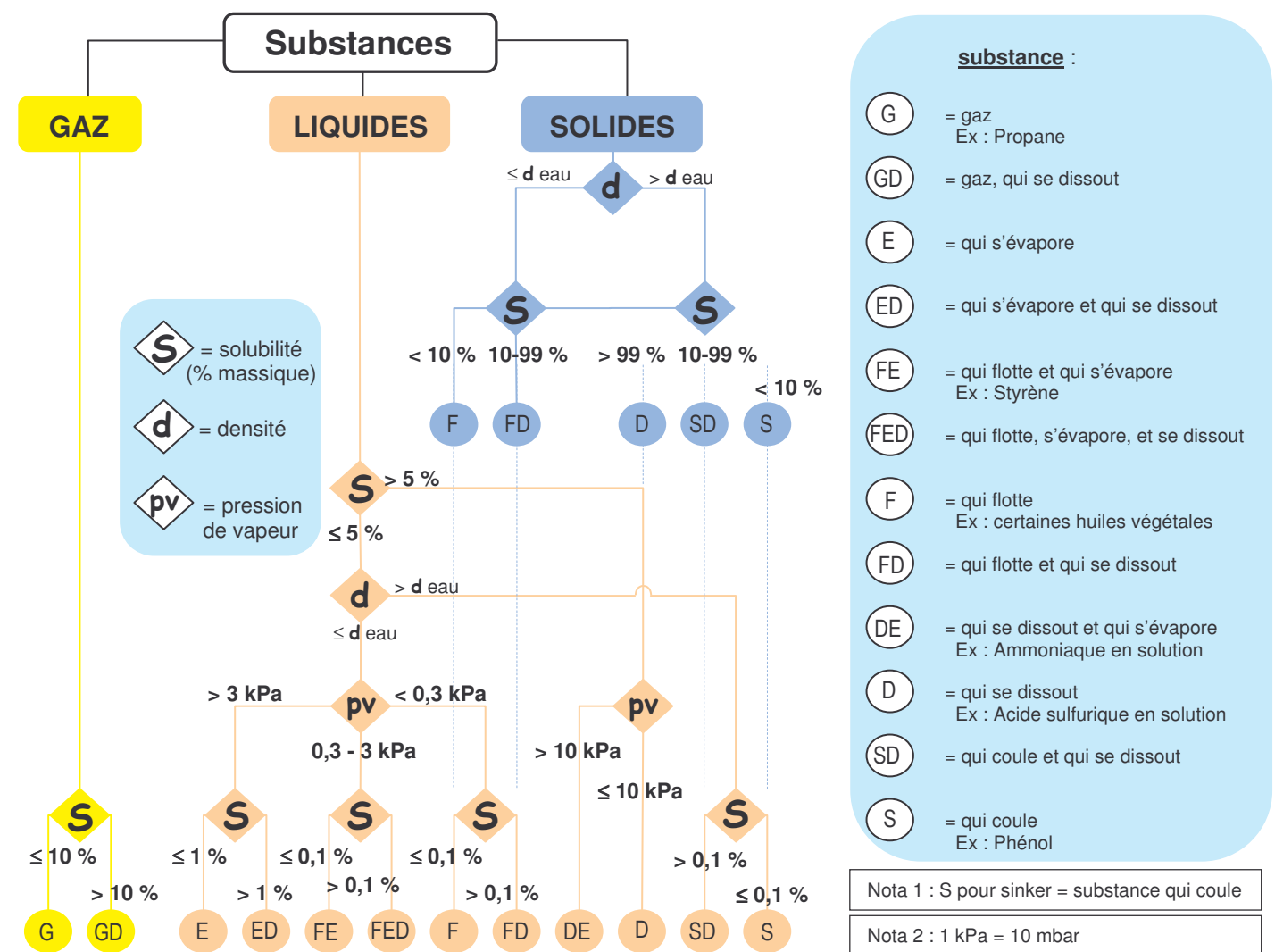
- ✓ en réagissant avec l'eau tel l'acide chlorosulfonique,
- ✓ en produisant des vapeurs toxiques en présence d'incendie tel le nitropropane
- ✓ en émettant des vapeurs particulièrement dangereuses tels la méthylpyridine, le nitrobenzène, le pentadiène...



Diagramme 2: Classification SEBC



Arbre de définition de la classe SEBC d'une substance



Rappels sur la solubilité, la densité et la pression de vapeur

**Solubilité d'un produit dans l'eau :** quantité maximale en pourcentage de ce produit que l'on peut dissoudre dans un litre d'eau (pour une température donnée). Le produit dissous est appelé le soluté.

Exemple : dans un litre d'eau douce à 20°C (masse = 1 000 g), on peut dissoudre au maximum 360 g de chlorure de sodium (NaCl). La solubilité du NaCl est donc de 360 g/l et la solution ainsi obtenue pèse 1 000 g + 360 g = 1 360 g.

Pour obtenir la solubilité en % massique :  $\% (masse / masse) = \frac{masse\ soluté}{masse\ solution\ saturée} \times 100$

Pour le NaCl, le pourcentage massique de solubilité est  $(360 / 1\ 360) \times 100 = 26,4 \%$

**Densité relative :** bien prendre en compte soit l'eau de mer (densité de 1,032 en moyenne), soit l'eau douce suivant le milieu considéré (densité de 1), ou éventuellement de l'eau saumâtre en estuaire (densité à demander aux autorités portuaires).

**Pression de vapeur saturante (dite aussi tension de vapeur) :** représente la quantité de produit qui s'évapore naturellement dans un volume fermé, ce qui caractérise sa facilité d'évaporation. Elle s'exprime le plus souvent en kiloPascal, notés kPa (1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 100 kPa = 1000 mbars).

Exemple : la pression de vapeur de l'eau douce à 20°C est de 2,3 kPa, alors que celle du benzène à 20°C est de 10 kPa. Le benzène émet donc plus de vapeurs que l'eau.

**Tableau 1 : Attribution, par classe de comportement SEBC, des fiches – réflexes, fiches – guides de décision et d’action et fiches "stratégie et moyens"**

		GAZ		LIQUIDE					
Classification SEBC →		G	GD		E	ED	FE	FED	DE
Fiches		Gaz	Gaz Soluble		Evaporant	Evaporant Soluble	Flottant Evaporant	Flottant Evaporant Soluble	Soluble Evaporant
<b>I</b>	<b>Fiches – réflexes "produits"</b>								
<b>I.1</b>	Gaz	X	X		x	x	x	x	
<b>I.2</b>	Liquide "atmosphère & surface"	x	x		X	X	X	X	x
<b>I.3</b>	Liquide "colonne d'eau & fond"		x			x		x	X
<b>II</b>	<b>Fiches – guides de décision et d’action</b>								
<b>II.1</b>	Questionnaire d’information	X	X		X	X	X	X	X
<b>II.2</b>	Première approche et lutte sur le plan d’eau								
	Produits qui s’évaporent : Étape 1	X	X		X	X	X	X	X
<b>II.3</b>	Lutte en milieu aquatique								
	Produits qui flottent : Étape 2						X	X	
	Produits qui se dissolvent: Étape 3		X			X		X	X
<b>III</b>	<b>Fiches "stratégies et moyens"</b>								
<b>III.1</b>	Analyse de la situation et des risques	X	X		X	X	X	X	X
<b>III.2</b>	Sécurité & protections individuelles	X	X		X	X	X	X	X
<b>III.3</b>	Sécurité & protections collectives	X	X		X	X	X	X	X
<b>III.4</b>	Obturation & colmatage	X	X		X	X	X	X	X
<b>III.5</b>	Détection, modélisation et repérage	X	X		X	X	X	X	X
<b>III.8</b>	Confinement et lutte dans l’atmosphère	X	X		X	X	X	X	x

Guide de lecture : ce tableau permettra de retrouver rapidement les fiches adaptées à un produit particulier, dont la classification SEBC est connue ou approchée.

Il faut alors :

- ✓ chercher la colonne correspondant à la classe SEBC du produit étudié ou déversé et consulter tout d'abord les fiches affectées d'un **X**, qui correspondent au comportement principal,
- ✓ consulter ensuite les fiches affectées d'un **x**, qui correspondent au(x) comportement(s) secondaire(s), ou qui peuvent apporter des informations complémentaires utiles.

## **2. ANALYSE DU TRAFIC MARITIME DE SUBSTANCES CHIMIQUES**

### **2.1 INTRODUCTION**

Au cours des vingt dernières années, le transport maritime et le stockage des matières chimiques se sont considérablement développés. Bien que dominé par les échanges d'hydrocarbures, le trafic maritime est confronté à cette augmentation de la part des produits chimiques. Ainsi, le trafic en Manche est passé de 30 millions de tonnes en 1988 à 150 millions de tonnes en 2000, ce qui représente une multiplication par cinq en douze ans (*Cedre*, 2001a). Cette croissance soulève la question du risque d'accidents, qui est d'autant plus important que la fréquentation augmente. On peut par exemple citer les naufrages en mer des chimiquiers « Ievoli Sun » (Manche, octobre 2000), « Balu » (Golfe de Gascogne, mars 2001) et « ECE » (Manche Janvier 2006) ainsi que des accidents en zone portuaire comme les déversements répétés d'huile de colza dans le port de Vancouver (1978) qui ont provoqué la mort de plus 500 oiseaux par engluement (Mc Kelvey et al., 1980 ; *Cedre*, 1989). Les oiseaux englués peuvent également mourir de froid, de faim ou de prédation étant donné qu'ils perdent leur mobilité (Crump-Wiesner and Jennings, 1975).

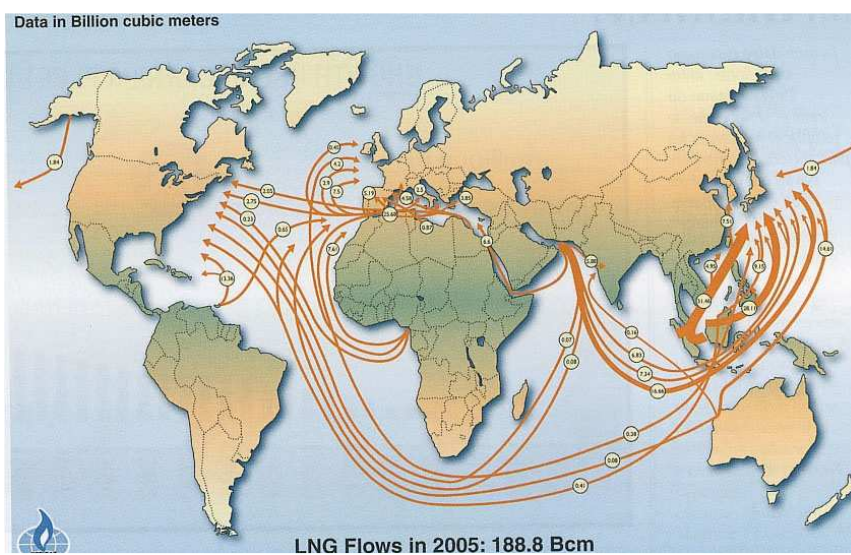
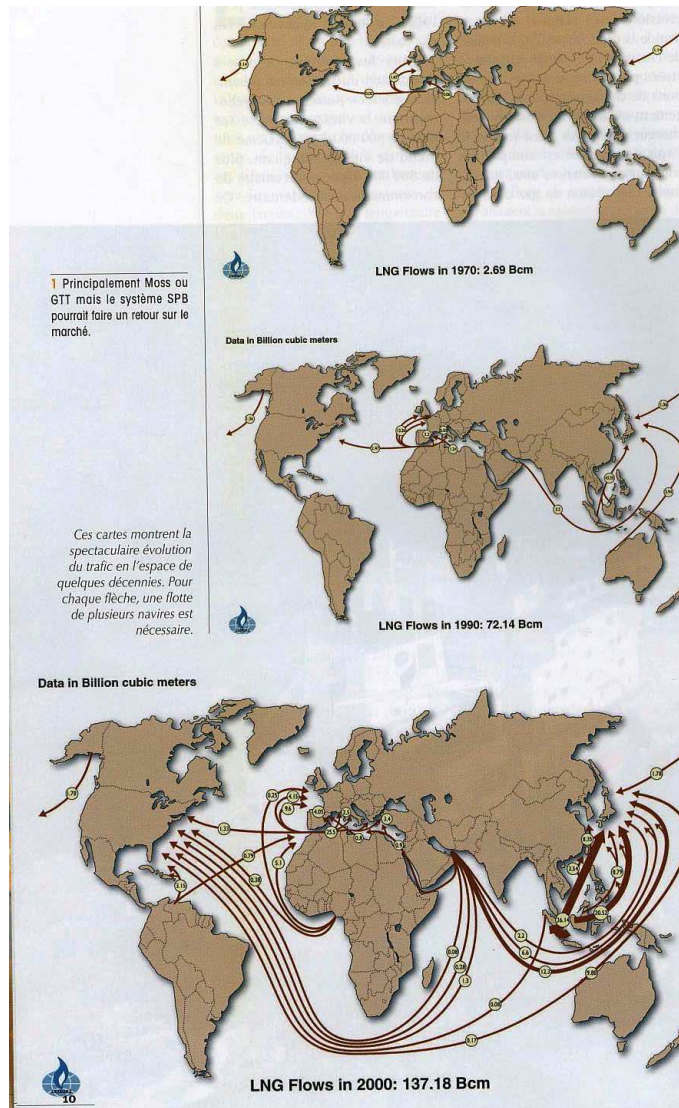
Pour prévenir et intervenir au mieux lors d'accidents ou d'incidents de ce genre, il faut connaître le trafic maritime des produits chimiques. Pour ce faire, une étude statistique a été réalisée afin d'identifier les produits chimiques les plus transportés en terme de fréquence et de tonnage. Les données nécessaires à ce travail ont pu être recueillies en consultant les données des Centres Régionaux Opérationnels de Surveillance et de Sauvetage (CROSS) relatives au trafic en Manche (*CEPPOL*, 2001).

### **2.2 EVOLUTION DU TRAFIC DE GAZ NATUREL LIQUIDE**

Source d'énergie alternative au pétrole, à la fois moins polluant et meilleur marché, le Gaz naturel (ou méthane), dont la consommation croît de 3% par an environ constitue un produit dont le trafic annuel est en augmentation de près de 10% par an. Au-delà de quelques milliers de kilomètres et les problèmes de géopolitique en moins (les gazoducs sont souvent les otages des négociations internationales voire infra étatiques), ce gaz est transporté à l'état liquide à -160°C dans des navires spécialisés. La carte 1 met en évidence le développement de ce trafic mondial.

Sans entrer dans le détail de la flotte qui sera fait dans la partie 1.3 du projet, le nombre de navires GPLiers en commande est actuellement de plusieurs dizaines avec une augmentation constante des capacités. Des premiers transports de 5000 m<sup>3</sup> dans les années 1950, on en est maintenant à près de 200 000 m<sup>3</sup> (154 000 m<sup>3</sup> pour les tout récents Provalys/Gaselys).

Ces navires sont très spécialisés et demandent un savoir-faire certain de la part des officiers et des équipages, ce qui inquiète les compagnies d'assurance quand elles se réfèrent à la formation des nouveaux équipages.



Carte 1 : évolution du trafic mondial de GNL (in Navires et Marine marchande n°31, avril 2007)



### 2.3. TRAFIC MARITIME EN MANCHE

Au niveau de la Manche, une analyse des statistiques élaborées par la CEPPOL (CEPPOL, 2001 ; Cedre, 2001b), d'après les données fournies par les différents CROSS de la Manche sur ces dix dernières années, permet de dresser une liste de tous les produits chimiques qui ont pu entrer ou sortir de la Manche en empruntant le rail d'Ouessant.

La Manche représente un couloir par lequel transite un quart du trafic maritime mondial. Tout le long de sa côte française, le trafic des matières dangereuses est surveillé par les différents CROSS. Notamment lors du passage du rail d'Ouessant, les navires sont invités à signaler au CROSS Corsen la nature de leur cargaison.

Grâce à ces données, il est possible d'établir une liste des produits rencontrés, de leurs tonnages et de leurs fréquences de passage respectifs. Au cours des dix dernières années, 164 produits chimiques différents ont transité en Manche (Cedre, 2003). Les plus rencontrés (en terme de fréquence et de tonnage cumulés sur dix ans) sont le benzène, les huiles végétales et animales (V&A), les oléfines (ou alcènes), le xylène, les alcools et le styrène. Pour ces substances, il a été possible de suivre l'évolution du trafic en Manche entre 1994 et 2001 (Figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6).

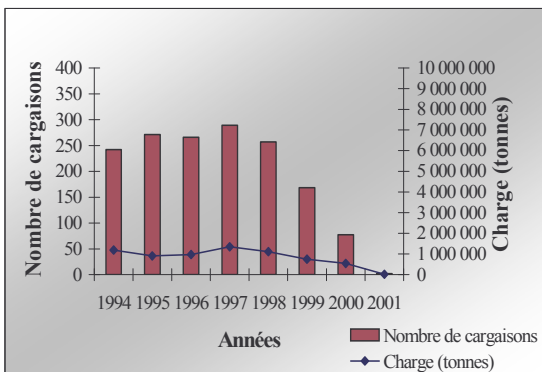


Figure 1 : Évolution du trafic du benzène

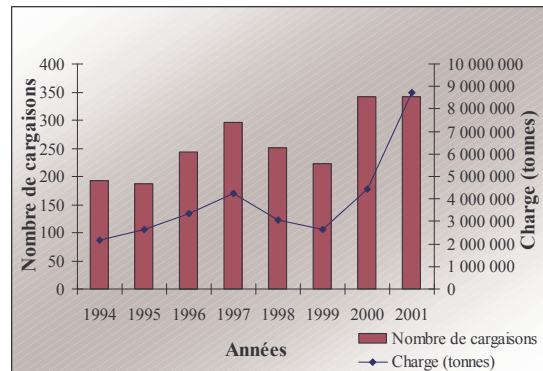


Figure 2 : Évolution du trafic des huiles (V&A)

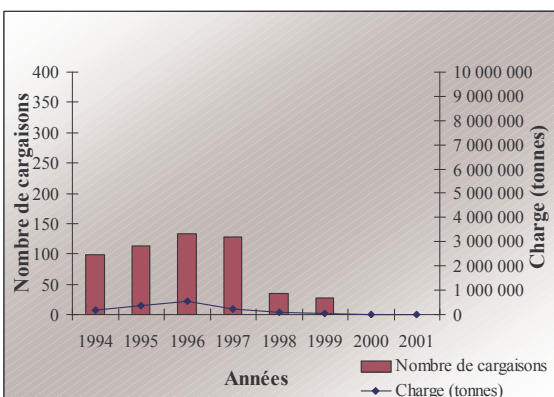


Figure 3 : Évolution du trafic des oléfines

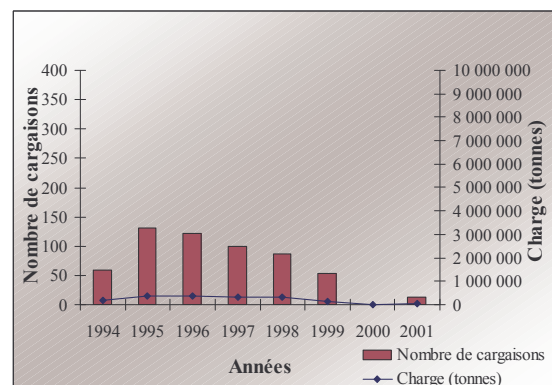


Figure 4 : Évolution du trafic du xylène

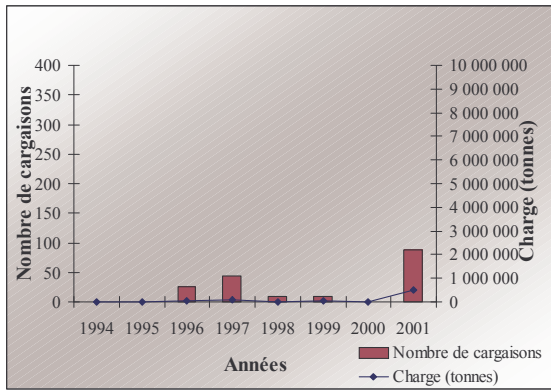


Figure 5 : Évolution du trafic des alcools

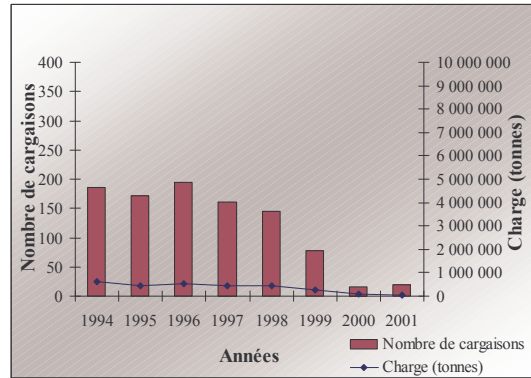


Figure 6 : Évolution du trafic du styrène

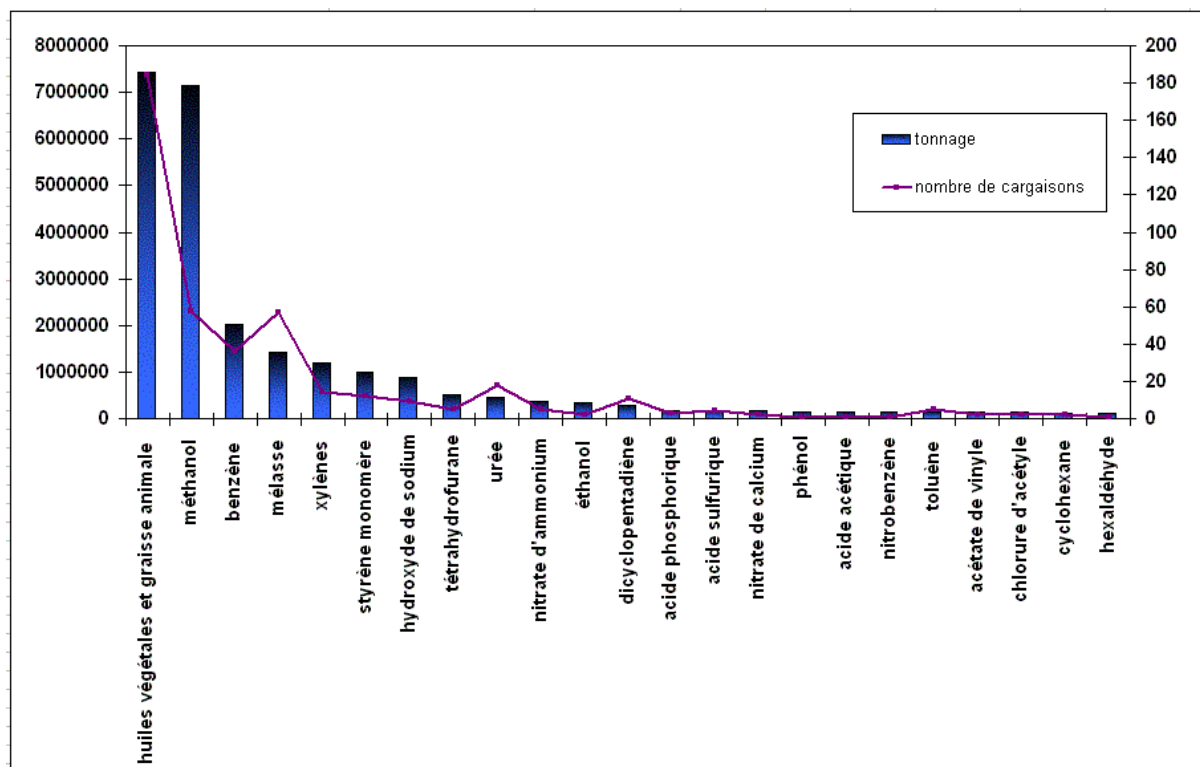


Figure 7 : Trafic au large du CROSS Griz Nez

En conclusion, ces figures montrent que ce sont les **huiles végétales et animales** qui sont les plus rencontrées en Manche (aussi bien en nombre de cargaisons qu'en tonnage). De plus, le trafic des huiles, comme celui des **alcools**, tend à augmenter, contrairement à celui des autres produits cités qui baisse et ce malgré l'augmentation du trafic global des produits chimiques. Le xylène, par exemple, n'a pas été répertorié en 2000 et 2001. Par contre, pour les huiles, le tonnage comme le nombre de cargaisons augmentent : de 192 cargaisons et 2,2 millions de tonnes d'huiles transportées en 1994, on passe à 341 cargaisons et 8,2 millions tonnes en 2000.

Cependant, il est à préciser que cette analyse ne prend pas en compte le type de conditionnements (conteneurs, fûts, vraquiers...). Il serait intéressant de les connaître, car les risques encourus ne sont pas les mêmes en cas d'incident avec un chimiquier ou un porte-conteneurs transportant quelques tonnes de produits chimiques. Aussi, il a été décidé de procéder à l'analyse de l'accidentologie maritime ayant entraîné des déversements de produits chimiques afin d'obtenir une information complémentaire sur les modes de conditionnements et sur les types de navires impliqués dans des accidents.

## 2.4 TRAFIC MONDIAL DES PRODUITS CHIMIQUES EN VRAC

INTERTANKO a soumis à l'OMI en 2004 une étude visant à définir les « Big Movers », c'est-à-dire les produits les plus transportés par mer. Il est apparu que 33 produits représentent environ 78% des échanges par mer. Parmi ces 33 produits, 14 sont des composés organiques, les huiles animales et végétales étant classées à part. Sur ces 14 produits, 8 possèdent la caractéristique de s'évaporer, même s'ils sont en général associés à une autre caractéristique : D (Dissolver) et F (Flottant)

La liste de ces produits est la suivante (tableau 2), par ordre de tonnage estimés en 2007 :

<b>Produit</b>	<b>Tonnage 2003</b>	<b>Tonnage 2007</b>	<b>Catégorie Marpol</b>	<b>Catégorie SEBC</b>
<b>Styrène</b>	<b>5.1</b>	<b>5.4</b>	<b>Y</b>	<b>FE</b>
<b>MethylTertButylEther (MTBE)</b>	<b>5.3</b>	<b>3.5</b>	<b>Z</b>	<b>DE</b>
<b>Xylène</b>	<b>5.1</b>	<b>5.4</b>	<b>Y</b>	<b>FE</b>
<b>Benzène</b>	<b>2.4</b>	<b>2.6</b>	<b>Y</b>	<b>E</b>
<b>Toluène</b>	<b>1.4</b>	<b>1.6</b>	<b>Y</b>	<b>E</b>
<b>Acrylonitrile</b>	<b>0.7</b>	<b>0.8</b>	<b>Y</b>	<b>DE</b>
<b>Acetone</b>	<b>0.3</b>	<b>0.4</b>	<b>Z</b>	<b>DE</b>
<b>Propylbenzène</b>	<b>0.2</b>	<b>0.2</b>	<b>Y</b>	<b>FE</b>

**Tableau 2 : Produits Evaporants parmi les « big movers » (Intertanko) : trafic mondial en Millions de tonnes**

Dans l'étude HAZREP coordonnée par la société hollandaise Amrie ([www.amrie.org](http://www.amrie.org)) en 2005, nous retrouvons, que cela soit dans les ports Méditerranéens, Atlantiques ou de la Manche le groupe de tête suivant :

- 1. Benzène
- 2. MTBE
- 3. Styrène
- 4. Xylène
- 5. Toluène

### **3. ACCIDENTOLOGIE MARITIME ET PRODUITS CHIMIQUES**

Le développement du transport maritime au cours du siècle passé a engendré une augmentation du nombre et du type de navires sur nos océans : porte-conteneurs, cargos, chimiquiers, gaziers, vraquiers, ferries... La diversité des navires et des modes de conditionnements ont rendu nécessaire une étude a posteriori sur les multiples accidents afin de déterminer la catégorie de navires la plus souvent impliquée dans des pollutions chimiques, ainsi que le type de déversements.

Cette étude a été réalisée en procédant à un recensement des principales pollutions chimiques survenues ces dernières années à travers le globe et en les répertoriant dans un tableau où apparaissent les rubriques suivantes :



- type et nom du navire,
- date et zone maritime de l'accident,
- quantité déversée,
- réponse apportée,
- zone (portuaire ou littorale).

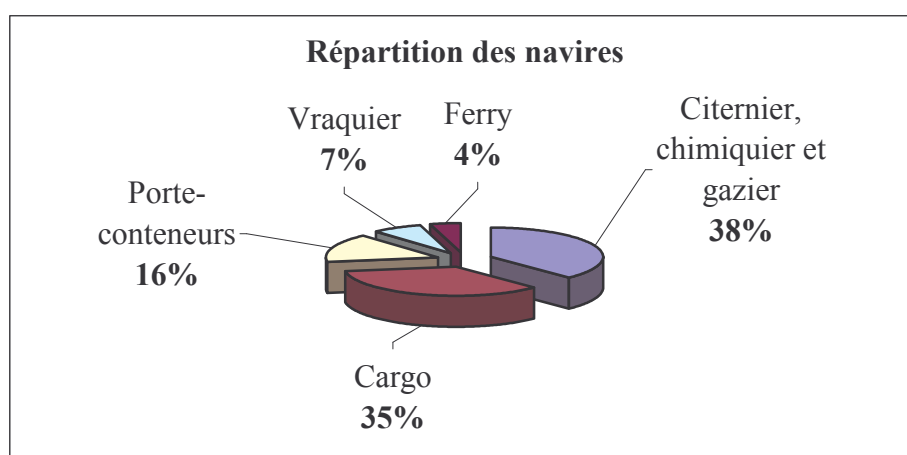
Ainsi, de 1947 à 2002, 69 accidents maritimes ayant entraîné une pollution chimique ont pu être identifiés, dans le monde entier (Cedre, 2000a et 2000b ; Internet, Presse).

### 3.1. TYPES DE NAVIRES IMPLIQUÉS

L'analyse des 69 accidents a montré que les navires citernes et les cargos sont les navires qui ont été le plus souvent impliqués dans un accident ayant entraîné des déversements de substances chimiques en mer (Tableau 3 et Figure 8).

Type de navires	Nombre d'accidents
Citernier, chimiquier, gazier	26
Cargo	24
Porte-conteneurs	11
Vraquier	5
Ferry	3
<b>TOTAL</b>	<b>69</b>

**Tableau 3 : Catégories de navires impliqués dans des accidents ayant entraîné des déversements de produits chimiques.**



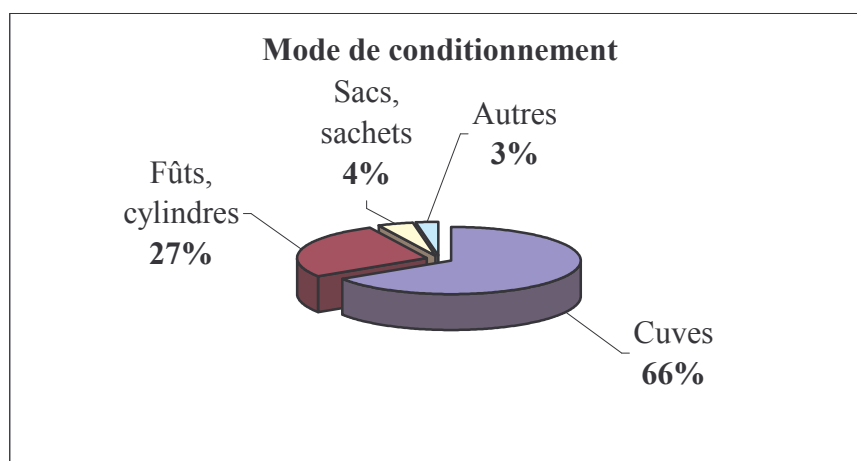
**Figure 8 : Répartition en pourcentage des types de navires impliqués dans des accidents ayant entraîné des déversements de produits chimiques.**

### 3.2. MODE DE CONDITIONNEMENT DES SUBSTANCES

En complément à l'analyse des types de navires impliqués dans les accidents, une analyse du mode de conditionnement des produits chimiques déversés en mer a été réalisée. Les résultats sont présentés dans le tableau 4 et, ils sont exprimés en pourcentage sur la figure 9.

Mode de conditionnement	Nombre de navires
Cuves (en vrac)	46
Fûts, cylindres	19
Sacs et sachets	3
Autres (boîtes, ...)	1

**Tableau 4 : Les différents modes de conditionnement des produits chimiques déversés en mer.**



**Figure 9 : Répartition en pourcentage des différents modes de conditionnement.**

De cette analyse, il ressort que la majorité des pollutions chimiques sont dues à la rupture des cuves des navires suite à une collision, à un échouement ou à une explosion à bord. Ce genre d'accident, qui est le plus fréquent, est généralement à l'origine d'un déversement important de produits chimiques à la mer et, de ce fait, à l'origine de pollutions majeures. C'est le conditionnement en fûts, cylindres ou petites citernes qui arrive en seconde position. Ces conditionnements sont le plus souvent transportés à bord de cargos et de porte-conteneurs, et les accidents correspondent à des pertes en mer de ces fûts suite à des conditions météo-océaniques défavorables.

### 3.3. SUBSTANCES CHIMIQUES DEVERSEES

L'analyse de l'accidentologie maritime a également traité de la nature chimique des substances mises en cause. Ainsi, le tableau 5 présente la liste des produits chimiques qui ont été déversés lors des accidents survenus au cours de ces 50 dernières années.

1	acétate de vinyle	1
2	acétate d'éthyle	1
3	acétone	1
4	acide chlorhydrique	2
5	acide nitrique	1
6	acide phosphorique	1
7	acide sulfurique	3
8	acrylonitrile	3
9	alcool iso propylique	1
10	aluminium phosphide (ALP)	2
11	ammoniac	2
12	aniline	1
13	arsenic mercuric	1
14	arsenic trioxide	1
15	bromure d'hydrogène	1
16	butadiène	1
17	butane	1
18	carbure de calcium	2
19	chlorate de sodium	2
20	chlorine	1
21	chlorure de vinyle	1
22	coprah	1
23	cyanure	2
24	cyperméthrine	1
25	dichlorobenzidine	1
26	dichloroéthane	1
27	dichromate de sodium	1
28	diisocyanate de toluène	1
29	diphénylméthane di-isocyanate	1
30	DNBP	1
31	dodécylbenzène	1
32	épichlorhydrine	1
33	étain	1
34	fluorspar	1
35	huile de colza	1
36	huile de noix de coco	1
37	huile de palmiste	2
38	huile de tournesol	1
39	hydroquinone	1
40	isononanol	1
41	lindane	1
42	magnesium phosphide	1
43	malathion	2
44	méthyl éthyl cétone	1
45	monoammonium phosphate	1
46	naphta	2
47	naphtalène	1
48	naphtol	1
49	nitrate d'ammonium	4
50	nitrate mercurique	1
51	nitrocellulose	2
52	orthocrésol	1
53	oxyde de chrome	1
54	perméthrine	1
55	peroxyde de sodium	1
56	pesticides	1
57	phénol	3
58	phosphore	1
59	plomb tétra éthyl	2
60	plomb tétra méthyl	1
61	propane	1
62	propylène	1
63	résine	1
64	sodium	1
65	solvant	1
66	soufre	1
67	styrène	2
68	sulfure de plomb	1
69	sulfure de sodium	1
70	trichloréthylène	1
71	uranium hexafluoride	1
72	white-spirit	1
73	xylène	1
74	zinc	1

**Tableau 5 : Liste des substances chimiques déversées accidentellement en mer au cours de ces 50 dernières années.**

En tenant compte uniquement du nombre de fois où un produit chimique donné a été déversé, il est possible d'identifier parmi les 74 substances du tableau 5 celles qui ont donné lieu au minimum à deux pollutions (Tableau 6).

<b>Produits chimiques</b>	<b>Nombre de déversements</b>	<b>Code SEBC</b>
nitrate d'ammonium	4	D
acide sulfurique	3	D
acrylonitrile	3	DE
phénol	3	S
acide chlorhydrique	2	D
aluminium phosphide	2	*
ammoniac	2	DE
carbure de calcium	2	*
chlorate de sodium	2	D
cyanure	2	*
huile de palmiste	2	F
malathion	2	*
naphta	2	*
nitrocellulose	2	*
plomb tétra-éthyl	2	*
styrène	2	FE

**Tableau 6 : Produits chimiques impliqués au minimum dans deux accidents.**

Dans le tableau 6 apparaît également le comportement des substances chimiques une fois déversées dans l'environnement marin qui est déterminé à partir de la classification européenne issue du code SEBC ( voir diagramme n°2).

### 3.4. TONNAGE DES DEVERSEMENTS

Afin d'identifier plus précisément les produits chimiques ayant entraîné une pollution majeure, il a été décidé d'associer aux produits déversés les quantités rejetées dans l'environnement marin. Ce paramètre a permis l'élaboration d'un nouveau classement présenté dans le tableau 7.

<b>Produits chimiques</b>	<b>Quantités déversées (en Tonnes)</b>	<b>Code SEBC<sup>(*)</sup></b>
acide sulfurique	20 000	D
nitrate d'ammonium	8 000	D
soufre	4 200	S
xylène	3 017	FE
dichloroéthane	3 000	SD
flurospar	2 430	*
propylène	1 800	F
sulfure de plomb	1 600	S
huile de tournesol	1 500	F
chlorure de vinyle	1 324	*

**Tableau 7 : Les produits chimiques les plus déversés en terme de tonnage.**

En recoupant les informations obtenues dans le tableau 6 avec celles du tableau 7, deux substances se détachent : l'**acide sulfurique** et le **nitrate d'ammonium**. Parmi les substances FE, les Xylènes apparaissent en quatrième position (tableau 7).

### 3.5. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS DE L'US COAST GUARD ET D'ENVIRONNEMENT CANADA

Les États-Unis et le Canada ont également procédé à l'analyse des accidents maritimes impliquant des produits chimiques. Ces analyses ont permis d'identifier les produits chimiques présentés dans le tableau 8.

<b>États –Unis</b> <i>Source : US Coast Guard, 1999</i>	<b>Code SEBC</b>	<b>Canada</b> <i>Source : Environnement Canada (Fingas, 2001)</i>	<b>Code SEBC</b>
Acide sulfurique	D	Acide sulfurique	D
Toluène	E	Acide chlorhydrique	D
Soude caustique	D	Biphényles polychlorés	*
Benzène	E	Ethylèneglycol	D
Styrène	FE	Hydroxyde de sodium	D
Acrylonitrile	DE	Ammoniac	DE
Xylène	FE	Acide nitrique	D
Acétate de vinyle	ED	Chlore	*
Acide phosphorique	D	Hydroxyde d'ammonium	D

**Tableau 8 : Produits chimiques les plus impliqués en terme de fréquence dans les accidents maritimes aux États-Unis et au Canada**

Ce tableau 8 montre que pour les États-Unis les substances chimiques considérées comme étant prioritaires sont différentes de celles identifiées par le Canada. Seul l'**acide sulfurique** apparaît dans les deux listes, produit également identifié dans notre étude (voir paragraphe 3.4).

#### **Cette analyse des accidents maritimes a permis de souligner les points suivants :**

- Les déversements accidentels de produits chimiques en mer ont essentiellement lieu à partir de navires spécialisés dans le transport de produits chimiques (38%) et à partir de cargos (35%),
- Dans 66% des cas, les déversements ont pour origine des fuites au niveau des cuves des navires,
- Parmi la multitude de substances transportées quotidiennement, l'acide sulfurique est le produit chimique le plus impliqué dans les accidents aussi bien en terme de fréquence qu'en terme de quantités déversées.

Très schématiquement, il est possible de discerner deux types de risques liés à des incidents chimiques, d'une certaine manière indépendamment de la forme du transport maritime des produits, en vrac ou en colis : ceux touchant les personnes (équipage, personnel d'intervention, population environnante) et ceux concernant plus spécifiquement l'environnement.

## 4. CONCLUSION : ETUDE DES SCÉNARIOS ET TRAVAIL EXPERIMENTAL

### SELECTION DES PRODUITS CHIMIQUES

Le choix des produits a été réalisé en prenant en compte :

- l'analyse du trafic maritime qui avait pour objectif de sélectionner les produits chimiques régulièrement transportés et donc, en terme de probabilité, les produits les plus susceptibles d'être déversés en cas d'accident ;
- l'analyse de l'accidentologie afin d'identifier les substances qui ont été le plus souvent déversées ;
- la toxicité des produits, ils doivent être pas ou très peu toxiques pour l'environnement marin du fait de la validation *in situ* prévue ultérieurement ;
- leur comportement une fois déversé dans l'environnement marin.

Les substances suivantes ont été retenues dans le cadre de notre étude :

- Gaz Naturel Liquéfié (gaz liquéfié transporté à -160°C)
- Gaz de Pétrole Liquéfié (gaz liquéfié transporté soit sous pression soit refroidi)
- Benzène (substance liquide évaporante)
- Xylènes (substance flottante évaporante)

Il n'y aura pas d'expérimentation sur le benzène pour des questions de dangerosité du produit. Par contre, le GPL sera évalué dans le parc d'essais de l'INERIS, et les xylènes au sein des cellules flottantes du *Cedre*. Le dispositif expérimental n'est pas encore établi.

## **CHAPITRE 2**



ATA 1160A  
Rapport DEL-1.5-02  
DR/ABr-DdC

GALERNE  
T1.2 Retour d'Expérience  
Rapport final



## Retour d'Expérience

### Méthaniers GPLiers Chimiquiers

Issue	0	1	2
Date	04/01/2007	15/06/2007	
Author	A. Breuillard	A. Breuillard	
Verified by	D. de Castelet	D. de Castelet	



## TABLE DES MATIERES

<b>SECTION 1. INTRODUCTION</b>	<b>37</b>
1.1. Rappel des Objectifs de la Sous-tâche dans le Projet	37
1.2. Présentation du Document	37
<b>SECTION 2. FICHES D'ACCIDENT</b>	<b>38</b>
2.1. Méthode	38
2.2. Listes des Accidents Recensés	38
2.2.1. Méthaniers	39
2.2.2. GPLiers	42
2.2.3. Chimiquiers	47
<b>SECTION 3. STATISTIQUES</b>	<b>49</b>
3.1. Référence	49
3.2. Définitions	49
3.2.1. Type d'avaries	49
3.2.2. Gravité des avaries	49
3.2.3. Possibilité de fuite	49
3.2.4. Possibilité d'avarie structurelle dans la zone de cargaison	49
3.2.5. Localisation de l'accident	50
3.3. Echantillons	50
3.3.1. Echantillon Méthaniers	50
3.3.2. Echantillon GPLiers (Gaziers)	50
3.3.3. Echantillon Chimiquiers	52
3.4. Méthode de traitement et d'analyse	52
3.4.1. Occurrences générales	52
3.4.2. Croisement de Données	52
3.4.3. Analyse Statistique	52
3.4.4. Représentation sous forme d'arbre	53
<b>SECTION 4. TRAITEMENT ET ANALYSE</b>	<b>54</b>
4.1. Résultats généraux	54
4.2. GPLiers Réfrigérés et Méthaniers	56
4.2.1. Analyse simple	56
4.2.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)	58
4.3. GPLiers Pressurisés	60
4.3.1. Analyse simple	60
4.3.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)	62
4.4. Chimiquiers et Chimiquiers/Pétroliers	65
4.4.1. Analyse simple	65
4.4.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)	67
4.4.3. Analyse statistique	69

<b>SECTION 5. CONCLUSION</b>	<b>73</b>
<b>SECTION 6. REFERENCES</b>	<b>74</b>
<b>6.1. Sites des participants de la sous-tâche</b>	<b>74</b>
<b>6.2. Documents</b>	<b>74</b>
<b>6.3. Sites externes</b>	<b>74</b>
<b>SECTION 7. ANNEXE</b>	<b>75</b>
<b>Retour d'expérience additionnel : BEAmer</b>	<b>75</b>

## ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Intervention sur Igloo Moon.....	45
Figure 2 : Flotte mondiale GPLiers 2006, images SIGTTO, source SEAWAY 2006 .....	51
Figure 3 : Plan de la base de données LRF et des données traitées .....	53
Figure 4 : Localisation des accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers .....	56
Figure 5 : Types d'accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers .....	57
Figure 6 : Possibilité de fuite par types d'accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers .....	58
Figure 7 : Possibilité de fuite par types d'accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers en mer.....	59
Figure 8 : Localisation des accidents GPLiers pressurisés.....	60
Figure 9 : Types d'accidents GPLiers pressurisés .....	61
Figure 10 : Possibilité de fuite par types d'accidents GPLiers pressurisés.....	62
Figure 11 : Possibilité de fuite par types d'accidents GPLiers pressurisés en mer .....	63
Figure 12 : Localisation des accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers.....	65
Figure 13 : Types d'accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers .....	66
Figure 14 : Possibilité de fuite par types d'accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers .....	67
Figure 15 : Possibilité de fuite par types d'accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers en mer.....	68
Figure 16 : Arbre événementiel Chimiquier et Chimiquiers/Pétroliers– (occurrence/chimiquier/an).....	70
Figure 17 : Arbre événementiel Chimiquiers – (occurrence/chimiquier/an) .....	71
Figure 18 : Arbre événementiel Chimiquiers-Pétroliers – (occurrence/chimiquier-pétrolier/an) .....	71

## TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau des Occurrences quel que soit le lieu (ports, estuaire, mer...) .....	54
Tableau 2 : Tableau des Fréquences (occurrence par an et par navire) .....	54
Tableau 3 : Description des deux fuites avérées causées par des collisions .....	64
Tableau 4 : Commentaires associés aux deux fuites avérées causées par des collisions.....	64
Tableau 5 : Tableau croisé des occurrences de fuites selon le type d'accident Chimiquiers et Hybrides.....	69

## **Section 1. INTRODUCTION**

### **1.1 RAPPEL DES OBJECTIFS DE LA SOUS-TACHE DANS LE PROJET**

Galerie est un projet de recherche orienté sur la modélisation et l'expérimentation. Il vise à améliorer la connaissance et les procédures d'intervention sur les accidents de mer qui impliquent des navires transportant des gaz liquéfiés ou des liquides évaporants.

Le projet est découpé en trois parties : La première s'intéresse aux scénarios à prendre en compte, la deuxième aux modèles de dispersion atmosphérique et la troisième à la mise en place de fiches synthétiques d'intervention et d'outils pour la cartographie de la dispersion.

La tâche 1.2 s'intéresse au retour d'expérience sur les accidents passés. Elle fait suite à la tâche 1.1 qui cadre le projet et elle s'additionnera aux tâches 1.3 et 1.4 qui portent sur la technologie des navires transportant les substances auxquelles on s'intéresse. Ces quatre sous tâches sont synthétisées au travers de la tâche 1.5 qui porte sur la sélection des scénarios à prendre en compte pour la phase de modélisation et d'expérimentation.

ENTREES : Bases de donnée, Rapports d'enquête, fiches accident internet

SORTIES : Retours d'Expérience retenus, analyse et synthèse de données, fréquences d'accidents, fréquence de fuite par type d'accident.

### **1.2. PRESENTATION DU DOCUMENT**

Le document se découpe en trois parties. La première présente un listing des accidents marquants qui concernent les transports maritimes de Gaz Naturel Liquéfié (GNL), de Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL) et enfin des produits chimiques soumis au code IBC. Les accidents sérieux sont détaillés. La deuxième présente la méthode qui a été employée pour mettre en forme les données de la base du Lloyd's Register Fairplay. Enfin, la troisième partie présente l'analyse de ces données statistiques.

Les principales conclusions de ce rapport portent sur la typologie des accidents qui mènent à une fuite de la cargaison du navire. La recherche menée sur base de données montre que la collision est la principale cause de fuite pour le transport de gaz et que la collision, l'incendie/explosion et la perte de flottabilité sont des causes de fuite quasiment équiprobables pour le transport de produit chimiques liquides.

## **Section 2 FICHES D'ACCIDENT**

### **2.1. METHODE**

Il existe un nombre significatif d'institutions qui répertorient les accidents graves et les rapports d'enquêtes. La plupart dispose de site Internet comme le Cèdre ou le BEA. D'autres sites ont été sélectionnés afin d'apporter un maximum d'information à propos des accidents grave en mer. Cette partie a pour but, non pas d'apporter des résultats statistiques mais de livrer l'histoire du déroulement de cas graves réellement rencontrés.

### **2.2. LISTES DES ACCIDENTS RECENSES**

## 2.2.1. Méthaniers

Après recoupement de plusieurs sources d’information, la liste suivante d’accidents graves de méthaniers est jugée complète :

Date	Type	Nom du Navire	Cargaison	Origine de l'accident	Lieu	Heure	Météo	Dégâts	Victimes	Fuite
1965	Worms	Jules Verne	GNL	Trop plein	Chargement			Fracture dôme et pont	0	Oui
1965	Conch	Methane Princess	GNL	Fuite Vanne	Chargement			Fracture pont	0	Oui
1971	Esso	Esso Brega	GNL	Surpression	Déchargement			Domage dôme et pont	0	Oui
1974	nk	Massachusetts (barge)	GNL	Fuite Vanne	Chargement			Fracture pont	0	Oui
1974	Conch	Methane Progress	GNL	Touche fond	Port			-	0	Non
1977	TZ Mk. I	LNG Delta	GNL	Fuite Vanne	Mer			-	0	Oui
1977	Moss	LNG Aquarius	GNL	Trop plein	Chargement			-	0	Oui
1979	TZ Mk. I	Mostefa Ben Boulaid	GNL	Fuite Vanne	Déchargement			Fracture pont	0	Oui
1979	Moss	Pollenger	GNL	Fuite Vanne	Déchargement			Fracture dôme et pont	0	Oui
1979	GTNO 85	El Paso Paul Keyser	GNL	Echouement	Mer			Domages sévères coque et réservoir	0	Non
1980	Moss	LNG Libra	GNL	Panne Mécanique	Mer			Rupture arbre	0	Non
1980	Moss	LNG Taurus	GNL	Echouement	Port			Domage coque	0	Non
1985	TZ Mk. I	Gadinia	GNL	Panne Mécanique	Port			-	0	Non
1985	GTNO 82	Isabella	GNL	Rupture Vanne	Déchargement			Fracture pont	0	Oui
1989	TZ Mk. I	Tellier	GNL	Rupture amarre	Chargement			Domage coque	0	Oui
1990	GTNO 85	Bachir Chihani	GNL	Fatigue Coque	Mer			Fracture structure	0	Non
1996	GTNO 96	LNG Portovenere	GNL	Dysfonctionnement Système de Sécurité Incendie	Mer			-	6	Non
2002	Moss	Norman Lady	GNL	Collision	Mer			Domage mineur coque	0	Non
2003	Moss	Century	GNL	Panne Mécanique	Mer			-	0	Non
2003	Moss	Hoegh Galleon	GNL	Panne Mécanique	Mer			-	0	Non
2004	GTNO 88	Tenaga Lima	GNL	Domage poupe	Mer			Réparations	0	Non
2004	TZ Mk. III	British Trader	GNL	Incendie Elec	Mer			Réparations	0	Non
2005	Esso	Laieta	GNL	Panne Mécanique	Mer			Réparations	0	Non
2005	Moss	LNG Edo	GNL	Vibration boîte	Mer			Remplacement	0	Non
2006	GTNO 96	Catalunya Spirit	GNL	Isolation endommagée	Mer			Grosse réparation	0	Non

Source Colton recoupée par de nombreux sites. Les lignes des incidents/accidents qui font l’objet de description plus précises sont colorées.

Ce tableau montre que les accidents rencontrés sont en réalité des incidents qui, le cas échéant, ont provoqué des fuites relativement mineures. Ce sont essentiellement des événements qui ont lieu lors des phases de chargement/déchargement du GNL. La plupart du temps, il s'agit de fuite au niveau des vannes et des tuyauteries du navire ou du bras de chargement.

Ce tableau montre aussi que les événements de mer les plus graves (en jaune) sont similaires aux accidents (échouement, collision) que rencontre tout type de navire. Les méthaniers étant des navires très robustes, ces événements n'ont pas provoqué de fuites.

Afin d'affiner l'analyse des accidents rencontrés en mer par les méthaniers, une description plus précise des incidents notoires de mer est présentée ci-après :

### **Juin 1979 - El Paso Paul Kayser**

Un méthanier à membrane de 125 000 m<sup>3</sup>, chargé de 100 000 m<sup>3</sup>, s'est échoué à vitesse élevée (15-16 nœuds) sur la côte espagnole à l'Est de Gibraltar.

Les dommages causés par le choc ont été très importants. La coque extérieure a été enfoncée de plusieurs mètres et sur toute la longueur du navire, ce qui a provoqué des voies d'eau, et l'enfoncement des cuves arrières. Malgré ces dommages considérables, la double coque et l'isolation à membranes des cuves s'étant déformées et non pas déchirées, l'intégrité de la cargaison a été conservée.

Cinq jours après l'accident, à marée montante, le navire est remis à flot par vidange des ballasts (ses pompes fonctionnaient) et la pressurisation de l'air qu'ils contenaient. Après accord et aide des autorités maritimes espagnoles, le navire a été remorqué pour ancrage. Peu après le Paul Kayser a été déchargé de sa cargaison par un transfert de méthanier à méthanier, et de bord à bord.

Les opérations de remise à flot et de transfert ont été supervisées par des professionnels du remorquage, la société de classification et par des experts en transport de GNL. Une telle procédure de transfert de cuve à cuve avait été prévue dans les phases de conception des navires méthaniers. Cette expérience a prouvé leur validité et leur efficacité. Le navire a ensuite été remorqué à Lisbonne pour réparation temporaire. Il a finalement fait route par ses propres moyens jusqu'à Dunkerque pour subir une réparation complète.

### **October 1980 - LNG Libra**

Lors d'un trajet d'Indonésie vers le Japon, un méthanier à membrane de 125 000 m<sup>3</sup>, le LNG Libra, a subi une rupture de son arbre de propulsion.

Les autorités philippines ont remorqué le navire en lieu sûr (Davao Gulf). Après ancrage, un transfert de méthanier à méthanier a été entrepris durant 32 heures. La procédure s'est bien passée. Le navire a été remorqué jusqu'au port de Singapour pour réparation. Bien que l'accident n'ait absolument pas endommagé la structure du navire, les autorités et l'équipage ont reconnu que le danger que représentait un méthanier à la dérive obligeait à transférer le GNL le plus rapidement possible vers un autre méthanier.

Cette méthode a encore cette fois encore fait ses preuves lorsqu'elle est correctement réalisée dans une zone protégée.

### **December 1980 - LNG Taurus**

Alors qu'il approchait le port de Tobata au Japon, le LNG Taurus, un méthanier Moss de 125 000 m<sup>3</sup>, s'est échoué par mer très agitée, subissant des dommages sévères en fond de cale et un début d'invasion.

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

Après quatre jours de pompage et de pressurisation des ballasts endommagés, le navire s'est remis à flot.

Malgré l'impact, la double coque et la cargaison sont restées intactes. Après ancrage et l'inspection de la coque par des plongeurs, le navire a pu se rendre au terminal et décharger sa cargaison normalement. Il a ensuite poursuivi sa route vers Nagasaki pour réparation.

### **2002 – Norman Lady**

Alors qu'il traversait le détroit de Gibraltar, le Norman Lady, un méthanier Moss de 125 000 m<sup>3</sup>, a été percuté par le sous-marin américain USS Oklahoma City, qui naviguait à faible profondeur et à faible vitesse dans le secteur. Pour des raisons de confidentialité, l'événement est mal détaillé. Cependant ce choc à faible vitesse n'a endommagé la coque du méthanier que sur 1m50, causant des dommages mineurs.



## 2.2.2. GPLiers

Après recoupement de plusieurs sources d’information, la liste suivante d’accidents graves de GPLier reste incomplète :

Les accidents présentés ci-après sont parmi les plus graves et les plus explicites dans le cadre du projet Galerie :

date	navire	type	cargaison	activité	description	fuite	conséquences
octobre 1966	Mundogas Oslo	3 500 m3 SP	ammoniac	mer	collision (brouillard)	non	coulé
mars 1973	World Bridgestone	74 000 m3 FR	butane / propane	mer	collision	non	cale envahie - navire réparé
novembre 1974	Yugo Maru 10	47 500 m3 FR product carrier	butane/propane naphte	mer	collision	oui (naphte)	incendie immédiat (naphte) 34 morts navire détruit (torpillé) après 19 jours
octobre 1978	Danian Gas	26 000 m3 FR	propane	déchargement	fuite pompe sur pont	non	incendie après extinction, remise en état et reprise des opérations de déchargement
janvier 1980	Regitze Tholstrup	388 m3 FP	butane	mer	échouage (mauvais temps)	non	citernes vidées par flexibles dans des camions
septembre 1980	Mary Else Tholstrup	629 m3 FP	butane	mer	échouage	non	transfert vers un autre navire navire réparé
octobre 1984	Gaz Fountain	40 000 m3 FR	butane / propane	mer	attaque air-mer (Iran)		3 impacts de missiles incendie (pont - aménagements) navire réparé
1985	Jatoba	4 100 m3 SP	?	déchargement	incendie	non	?
avril 1990	Val Rosandra	3 000 m3 SP	propylène	déchargement	incendie	non	remorqué hors du terminal après 22 jours : charges explosives pour ouvrir domes après 16 jours: navire sabordé
mai 1997	Igloo Moon		butadiène	mer	échouage	non	déballastage et transfert partiel (21 % cargaison) navire réparé
novembre 2002	/	75 700 m3 FR	propane / butane chargement partiel)	mouillage	incendie compartiment machines	non	extinction après 3 jours cargaison déchargée (ship to ship)
mai 2005	ISARGAS	4 200 m3 FP	éthylène	mer	collision	non	navire sur ballast pas de pollution

D’autres accidents sont présentés par le BEAmer en Annexe Section 7.

Contrairement au cas des méthaniers, ce tableau montre qu'il y a eu des accidents de GPLiers relativement critiques. Afin de pousser plus loin l'analyse, une description plus précise des accidents notoires est présentée ci-après :

### **Octobre 1966 - Mundogas Oslo**

Un GPLier de 3 500 m<sup>3</sup>, de type C réfrigéré et semi-pressurisé, chargé d'ammoniac et en route pour la Suède depuis le Danemark a subi une collision dans un brouillard épais.

La collision s'est produite à angle droit et au niveau de la cuve n°2. Le Mundogas a subi un envahissement rapide.

Le navire s'est mis à prendre fortement de l'assiette, et quatre heures après la collision, la poupe touchait le fond. Le remorquage n'a pas pu être opéré correctement à cause du mauvais temps et de la formation de banquise. Finalement, après trois mois et demi de prise, la partie arrière du navire coulait à son tour.

Durant les opérations de remorquage, du gaz s'est échappé par les soupapes de sécurité, et du chargement liquide a été déchargé par les remorqueurs. La suite de l'accident n'a pas occasionné de fuite visible. Depuis, il n'a pas été constaté de fuite majeure. Les vents et marées ont sans doute permis une dispersion et une dissolution lente du produit.

Il est intéressant de noter qu'il s'agit du premier navire GPLier ayant sombré après collision. La structure du navire était conforme à la réglementation en vigueur à cette époque. De nouvelles règles ont été développées par la suite. Une structure conforme aux règlements applicables aujourd'hui résisterait à ce type de collision.

### **Mars 1973 - World Bridgestone**

GPLier de 74000 m<sup>3</sup>, chargé de butane et de propane, en route pour le Japon, le World Bridgestone a subi une collision avec le pétrolier Malacca Straits. La cale de la cuve n°1 a été inondée, sans menacer directement le confinement de la cargaison. Le navire a été accepté à Singapour où quelques réparations temporaires ont été effectuées. Puis le navire a continué sa route pour le Japon où il a pu décharger sa cargaison et recevoir des réparations complètes.

### **November 1974 - Yuyo Maru 10**

Le GPLier transportait plusieurs produits dont des produits pétroliers (Naphte, 32,000 m<sup>3</sup>) dans les cuves latérales et du GPL réfrigéré dans les cuves centrales (47 500 m<sup>3</sup>). Il est entré en collision avec le vraquier Pacific Ares, dans la baie de Tokyo. Le naphte s'est échappé par une ouverture de 24 m sur la longueur et haute depuis le pont jusqu'à 1 m sous la ligne de flottaison, au niveau de la cuve n° 1.

Le naphte a pris feu immédiatement après la collision, et les flammes ont totalement encerclé le vraquier et se sont repandues sur toute la longueur du Yuyo Maru. 29 des marins du vraquier et cinq du GPLier ont été tués. Les vapeurs de GPL s'échappant des soupapes de sécurité, ont pris feu et ont brûlé sans discontinuer, (sans danger particulier supplémentaire - NDLR). La cargaison de la cuve n°1 a continué de brûler et le feu s'est propagé aux autres cuves avec des jets de flamme sporadiques. Malgré des efforts colossaux des navires-pompiers, il n'a pas été possible de contrôler l'incendie. Finalement, après une vingtaine de jours d'incendie, le GPLier, a été remorqué au large, en feu, et a été torpillé.

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

Il est intéressant de noter que malgré le feu de naphte et la surpression qui régnait dans les cuves de GPL, celles-ci sont restées intactes et il n'y a pas eu d'échappement de GPL liquide, autant dans les cales que dans la mer.

### **Octobre 1984 - Gaz Fontaine**

Le Gaz Fontaine, un navire d'une capacité de 40 232 m<sup>3</sup>, construit en 1969 et qui peut être considéré comme la première génération de GPLier entièrement réfrigéré. Le navire était chargé de 18 440 tonnes de GPL dans des cuves prismatiques. Lors de son passage du Raz de la Tanura vers Fujairah, le navire a été attaqué par un avion qui a tiré une salve de missiles air sol, dont trois ont atteint le navire, causant des dommages importants.

Le souffle a généré une ouverture de 3m par 2m au dessus de la cuve n°3 et le système de tuyauterie et de commande électrique a été sévèrement touché. Un incendie sérieux s'est développé sur le pont et ensuite aux locaux de service. Par chance, la salle de machines n'a pas été atteinte. L'équipage a abandonné le navire. Quelques jours après, une équipe de remorqueurs est arrivée et a éteint l'incendie grâce à de puissants moyens d'extinction : eau et mousse.

Le navire a ensuite été remorqué et ancré à quelques 15 miles de Dubai. Là, un travail de sécurisation de l'intégrité du confinement de la cuve a commencé. L'opération a été assistée par barge jusqu'à ce que la salle des machines ait pu être remise en service. Six semaines plus tard, 17 204 tonnes du chargement initial ont été transférées de navire à navire en utilisant les pompes du Gaz Fontaine. Le navire vidé n'a pas été réparé.

### **Janvier 1980 - Regitze Tholstrup**

Un GPLier de 388m<sup>3</sup> entièrement pressurisé, chargé de butane, s'est échoué près de Larne en Irlande du Nord, par temps très agité. Une voie d'eau est apparue en salle des machines. Des tuyaux flexibles ont été tirés de la côte depuis des camions citerne jusqu'au navire. Vidé de son chargement le navire a été remis à flot deux jours après à marée haute. Il n'y a pas eu d'atteinte au chargement, ni de fuite.

### **Septembre 1980 - Mary Else Tholstrup**

Un GPLier entièrement pressurisé, chargé de butane, s'est échoué près de Roche's Point, au sud de l'Irlande. Bien que le navire ait subi des dégâts sur une grande partie de son fond, le chargement pressurisé du navire n'a pas été affecté. Le navire a été remis à flot deux heures et demi après, lors de la marée montante, et a été mis à l'ancre près de Whitegate Roads.

Ancré, le navire a pu transférer sa cargaison au Ulla Tholstrup, GPLier semi-pressurisé de 918 m<sup>3</sup>. Vidé, il a ensuite été remorqué en cale sèche pour réparation.

### **1985 – Jatoba**

Le GPLier semi-pressurisé de 4100m<sup>3</sup>, comportant 3 cuves cylindriques, a pris feu alors qu'il déchargeait à Recife. L'incendie a duré deux jours et causa des dommages sévères à la cuve n°3 dont on a rapporté qu'elle avait été à l'origine d'un BLEVE. Cette hypothèse a ensuite été infirmée étant donné que la cuve n°2 et la salle des machines ont ensuite été récupérées intactes.

### **Avril 1990 – Val Rosandra**

Le GPLier pressurisé de 3000 m<sup>3</sup> à cuves cylindriques a subi un départ de feu entre le compresseur et la cuve n°3 alors qu'il déchargeait sa cargaison de propylène à Brindisi.

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

Le navire en feu a été remorqué au large. L'incendie a duré 22 jours. Pour palier le risque de surpression dans les autres cuves, des charges explosives ont placées de manière créer des brèches et permettre au gaz de brûler. L'incendie a duré encore 16 jours avant que le Val Rosandra ait été écoulé.

### Mai 1997 – Igloo Moon

Le navire était en route vers Huston chargé à plein de 6 600 tonnes de butadiène lorsqu'il heurta le récif corallien de Key Biscayne (Floride).

Le premier rapport des plongeurs a révélé que le récif sur lequel s'était échoué le navire double coque sur 75% de sa longueur était recouvert de 60 cm de sable. Les trois réservoirs de double coque tribord ainsi que les conduites proches ont été envahies. Le navire était de plus privé de direction car le gouvernail était bloqué sur le haut fond et l'appareil à gouverné avait subi des dommages importants. Heureusement, il n'y a pas de fuite apparente, et l'intégrité des cuves n'a pas été atteinte.

Considérant ce rapport et ne sachant quelle décision prendre, l'équipe de secours a contacté la société de classification à laquelle appartenait le navire. Avec les informations fournies et la bonne connaissance des plans du navire, un calcul de flottabilité, stabilité, capacité structurelle après accident, et du niveau de gasoil restant, a été effectué. Un avis a été émis dans les trois heures qui ont suivi l'accident. Une barrière gonflable a été disposée autour du navire et une opération de pompage de gasoil depuis le double fond vers une cuve supérieure a été entreprise.

La dégradation des conditions météo a retardé l'arrivée de la barge d'assistance, et des opérations de ballastage ont dû être entreprises. Elles ont été incluses dans de nouveaux calculs des équipes à Terre.

Enfin, le temps s'améliorant, un GPLier d'allégement a été amené sur place et les 1360 tonnes de chargement ont été transférées, ce qui permit à l'Igloo Moon de se remettre à flot. Après une dernière analyse de la coque, le navire a été remorqué dans un port américain.



Figure 1 : Intervention sur Igloo Moon

Source : <http://photos.orr.noaa.gov//Photos/PCD2334/IMG0042.JPG>

### Novembre 2002 Gaz Poem

Le GPLier réfrigéré de 75 700 m<sup>3</sup> à cuves prismatiques était à l'ancre quand un incendie s'est déclaré dans la salle des machines alors qu'il était chargé de 10 000 m<sup>3</sup> de propane et de 10 000 m<sup>3</sup>

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

de butane. Malgré les tentatives d'extinction de l'équipage, y compris le gazage au CO<sub>2</sub>, le navire a été abandonné et l'incendie a totalement envahi la salle des machines et les cabines.

L'équipage a été secouru, sain et sauf, par les autorités locales et l'incendie a été éteint, (ou on l'a laissé brûler), après trois jours. Les efforts se sont concentrés sur la préparation du navire pour un transfert de navire à navire avec pompage externe. Le temps passé sans réfrigération a augmenté la pression de vapeur dans les cuves à des niveaux relativement élevés. Le transfert a été mené à bien. Le navire a ensuite été inerté sur place.

### 2.2.3. Chimiquiers

Après recoupement de plusieurs sources d’information, la liste suivante d’accidents graves de chimiquiers reste incomplète.

Les accidents présentés ci-après sont parmi les plus graves et les plus explicites dans le cadre du projet Galerie. Seuls les accidents de navire transportant des produits évaporants toxiques et/ou inflammables sont présentés dans le tableau :

Nom du Navire	Date de l'accident	Produits Chimiques	Lieu de l'accident	Activité	Description	Fuite	Détail
<b>Grape One</b>	1993	Xylènes (FE)	Manche	En mer	Rupture cuve	OUI	Mauvais temps - Navire coule
<b>Eiwa Maru</b>	2002	Xylènes (FE)	Japon	En mer	Collision	NON	Collision - Navire coule - Pas de rupture de cuve
<b>Bow Panther</b>	1997	Xylènes (FE)	Japon	Au port	Fuite cuve	OUI	Déversement dans le port
<b>Cason</b>	1987	Liste très importante dont Xylène (FE)	Espagne	En mer	Echouement	OUI fumée	Incendie provoqué par le contact sodium/eau de mer. Zone d'Exclusion 5 km (15 000 pers évacuées)
<b>Chung Mu</b>	1995	Styrène (FE)	Mer de Chine	En mer	Collision	OUI	déversement de 230 tonnes de styrène avant colmatage de 1ere urgence (plongée).
<b>Levoli Sun</b>	2000	Styrène (FE)	France	En mer	Envahissement	OUI	4000 tonnes de Styrène - Envahissement - Fuite - Remorquage - Navire coulé
<b>Brigitta Montanari</b>	1984	Chlorure de Vinyle (GE)	Adriatique	En mer	Navire Coule	OUI	Navire coule - Renflouement - pompage à 30 m de profondeur - estime fuite 1-3kg/jour - 1300 tonnes chargées - 700 tonnes récupérées après plusieurs mois

Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d’Expérience

<b>Coral Acropora</b>	2004	Chlorure de Vinyle (GE)	UK	Au port	Débordement de cuve lors du chargement	OUI	Nuage de Gaz dans le port <a href="http://www.maib.dft.gov.uk/cms_resources/Coral%20Acropora.pdf">http://www.maib.dft.gov.uk/cms_resources/Coral%20Acropora.pdf</a>
<b>Multitank Ascania</b>	1999	Acétate Vinyle (ED)	Ecosse	En mer	Incendie Salle machine	NON	Force 8 Non manœuvrant - Zone d'exclusion 5 km (600 pers évacués- camera thermique pour évaluation feu - Transfert Navire à Navire
<b>Bow Eagle</b>	2002	Acétate d'Ethyle (ED) Cyclohexane (E)	France	En mer	Collision	OUI	Brèche coque - 200 tonnes déversées d'AE - Chalutier Cistude coulé 4 disparus
<b>Annemasse</b>	2004	Benzène (E)	France	Fluvial	Collision/Echouement	NON	500 évacués
<b>Kapitan Rudnyev (Cyprus)</b>	2001	Alkyl benzène linéaire	Québec	Au port	Contact berge	OUI	Dommage coque
<b>Crystal Rubino</b>	2000	Nonylphenol Ethoxylate	Finlande	Au port	Débordement de cuve lors du chargement	OUI	Epannage dans le port. Mousse flottante <a href="http://www.onnettomuustutkinta.fi/uploads/3qz30htz18lh.pdf">http://www.onnettomuustutkinta.fi/uploads/3qz30htz18lh.pdf</a>
<b>Perla</b>	2004	Méthanol	-	En mer	Explosion	OUI	Explosion - Coque fracturée - Navire coulé
<b>Cape Horn</b>	2003	Méthanol	-	Au port	Explosion		Explosion au port - renvoi en mer - Deuxième explosion
<b>Vicuna</b>	2004	Méthanol	-	Au port	Implosion	OUI	Cuve endommagée
<b>Bow Mariner</b>	1982	Ethanol	Virginie (USA)	En mer	Explosion	OUI	Grosse explosion. Mauvais nettoyage.

Des précisions sur ces accidents peuvent être obtenues facilement sur les sites précisés en Section 6.

D’autres accidents sont présentés par le BEAmer en Annexe Section 7.

De plus, concernant les chimiquiers, étant donné la taille de la flotte, le traitement statistique va permettre de tirer des informations sur cette catégorie de navire.

Une première analyse sur ce tableau permet de souligner trois types d’accident qui sont la collision, l’incendie/explosion et la perte de flottabilité. On note que les chimiquiers transportant de l’alcool ont subi des explosions. Les collisions et les naufrages provoquent des déversements importants et plus ou moins rapides.

## Section 3. Statistiques

### 3.1. Référence

La base de données du Lloyd's Register *Fairplay* (LRF) a été utilisée. Cette base répertorie l'ensemble des navires qui ont fait l'objet d'une enquête précise après avarie. Ces enquêtes sont transmises au Lloyd's Register of Shipping que le navire soit classé Lloyd's Register ou non. Parmi les données répertoriées, on trouve les catégories définies ci-après.

### 3.2. Définitions

#### 3.2.1 Type d'avaries

Avarie signifie ici tout type d'événement redouté pouvant provoquer une fuite, à savoir selon la base LRF :

- Collision = collision uniquement avec un autre navire
- Contact = contact avec un objet autre qu'un navire
- Foundered = coulé – parfois appelé improprement épave ou navire sombré dans la suite. Il s'agit des événements tels les défaillances structurelles menant au naufrage du navire. Ces défaillances provoquent une gîte importante, le submergement du navire et/ou le chavirement.
- Fire / Explosion = Incendie ou Explosion, ne résultant pas des événements cités ici.
- Wrecked / Stranded = Echouement
- Hull / Machinery damage = Autre que précédent : perte de manœuvrabilité, ripage d'ancre, voie d'eau sans gravité)
- Miscellaneous = Inconnu

Ces événements sont parfois successifs, dans ce cas, l'événement initiateur est retenu.

#### 3.2.2. Gravité des avaries

T signifie accident *terminal* c'est-à-dire que le navire a été détruit ou démantelé suite à l'accident.

S signifie accident *serious*, c'est-à-dire que le navire a eu besoin de l'intervention des secours.

#### 3.2.3. Possibilité de fuite

Seules les grandes dispersions de cargaison sont indiquées et souvent elles sont mal renseignées dans la base LRF. Les fuites plus mineures sont parfois indiquées dans la ligne de commentaire. Il est rarement possible d'obtenir les dimensions de la brèche. Dans certains cas, des croisements avec des rapports d'accidents ont été menés. Après ce travail, les possibilités de fuites ont été classées en YES-POSSIBLE-NO. « yes » signifie avérée, « possible » soupçonnée et « no » signifie qu'aucune information disponible ne permet de supposer qu'une fuite a eu lieu.

#### 3.2.4. Possibilité d'avarie structurelle dans la zone de cargaison

Les avaries structurelles dans la zone de cargaison ont été classées en YES-POSSIBLE-NO selon la même procédure. Cette notion d' "avarie structurelle" est à prendre au sens large et intègre toute perte d'intégrité relative à un système de sécurité de la cargaison.



Remarque : la catégorie No-No correspond à des avaries qui n'ont ni créé de fuite ni atteint la cargaison. Après analyse, il s'est avéré qu'il s'agissait majoritairement de cas d'avaries machines qui n'ont entraîné aucun risque direct pour la cargaison. Souvent il s'agit de cas où les navires ont été remorqués à temps. Il est à noter que sans remorquage, la même avarie aurait pu causer un sur-accident grave (c.f. LNG Taurus)

### 3.2.5. Localisation de l'accident

La localisation des accidents dans la base de données LRF est répertoriée ainsi :

1. At sea/off. ./straits of : En mer, côtes et chenaux
2. Restricted waters : Zones à manœuvre réduite (proche côte)
3. Estuary/River : Estuaires, rivière
4. Canal : Canal
5. Great Lakes/Caspian Sea/Lakes etc. : Lacs
6. In port/harbour/dock/at... : Ports, à quai
7. Shipyard/dry dock : Cale sèche
8. Floating dock : Quai flottant

Le projet Galerie s'intéresse en priorité aux événements de mer, auxquels nous associons la catégorie 1. Quand cela est nécessaire, la catégorie 2 est ajoutée. Graphiquement, on ne peut pas représenter les deux, les occurrences en zone 2 étant beaucoup plus faibles. Mathématiquement, elles seront prises en compte dans le calcul des fréquences d'occurrence au §0.

## 3.3. Echantillons

Une première recherche sur la base de données du LRF a été de sélectionner l'ensemble des accidents type T ou S de 1999 à 2005.

### 3.3.1 Echantillon Méthaniers

La catégorie méthaniers est claire comparée à celle des autres navires qui nous intéressent. On constate l'occurrence de 13 accidents de type T ou S sur les méthaniers.

### 3.3.2. Echantillon GPLiers (Gaziers)

a- Types de navires dans la flotte mondiale

Il existe plusieurs types de GPLiers, (cf rapport Galerie T1.3).

Les catégories « pressurisés », « réfrigérés » et « semi-pressurisés » n'apparaissent pas dans la base de données pour les GPLiers. Il manque des informations sur le type de stockage et la nature de la cargaison.

Il a été supposé que les petits GPLiers légers pressurisés sont plutôt des caboteurs (fournisseur îles, lieux retranchés) et que leur accidentologie est différente de celle des transporteurs lourds réfrigérés. Par conséquent il a été recherché une méthode pour les séparer : Les GPLiers ont été

séparés arbitrairement en « pressurisés » et « réfrigéré », ce, en supposant que, si le port en lourd d'un GPLier est inférieur à 12 500 tonnes, il est pressurisé, sinon il est réfrigéré. Cela ne permet pas de distinguer les navires pressurisés des navires semi-pressurisés, qui sont cependant d'une technologie très voisine.

Par cette séparation, les nombres d'accidents T ou S subits par les « pressurisés » est de 70 et de 24 pour les « réfrigérés ». Afin de mieux comprendre l'intérêt de cette séparation le graphique suivant présente la flotte des GPLiers en 2006 :

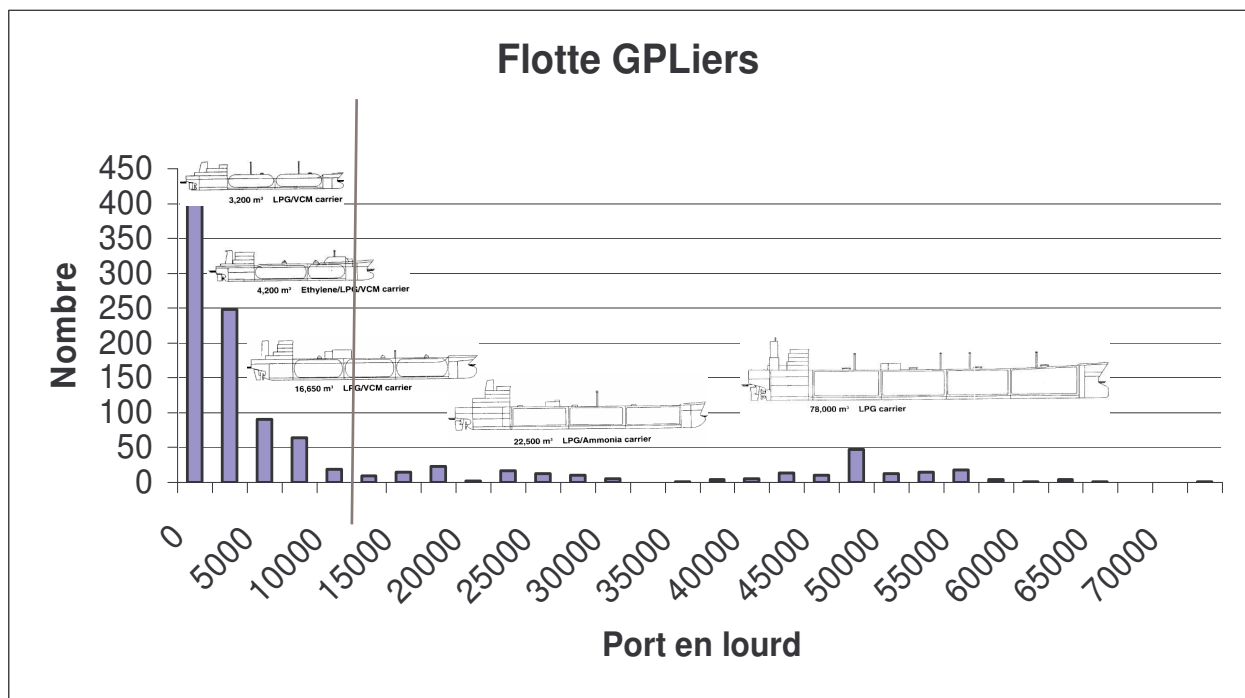


Figure 2 : Flotte mondiale GPLiers 2006, images SIGTTO, source SEAWAY 2006

b- Types de produits transportés

La liste de produits que ce type de navire recouvre est

- GPL
- Ammoniac
- Ethylène
- Chlorure de Vinyle Monomère
- Butane
- Propane
- Butadiène
- Propylène
- Butylène

Notons que l'ammoniac et le chlorure de vinyle ne sont pas directement des produits issus de la décantation du pétrole. Il a été vérifié auprès du Lloyd's que ces produits ne sont pas présents dans les catégories « chimiques » de la LRF. Ils n'apparaissent donc que dans la catégorie GPLier.

#### c- Association GPLiers réfrigérés et Méthaniers

Etant donné la similarité entre les GPLiers réfrigérés (GPLiers>12500 tonnes) et les méthaniers, et le fait que l'occurrence d'accident est relativement faible sur ces catégories, elles ont été regroupées en une seule pour l'analyse qui va suivre. (24+13 accidents T ou S)

### 3.3.3. Echantillon Chimiquiers

Les chimiquiers sont référencés sous les catégories « Chemical tanker » (142 accidents T ou S) et « Chemical/Oil Products Tanker » (217 accidents T ou S, parfois notés « hybrides » dans la suite.

## 3.4. Méthode de traitement et d'analyse

### 3.4.1. Occurrences générales

Les occurrences d'accidents sont recensées selon qu'elles appartiennent aux catégories :

- T ou S,
- T ou S hors No No
- T ou S avec Fuite POSSIBLE ou YES.

Pour avoir un point de comparaison entre toutes les catégories de navires, les occurrences ont été ramenées aux flottes mondiales 2006 respectives à chacune des catégories.

### 3.4.2. Croisement de Données

Pour chaque type de navire, les différentes corrélations sont étudiées :

- Occurrence d'accident T ou S hors No No par type d'accident
- Occurrence d'accident T ou S hors No No par localisation géographique
- Occurrence d'accident T ou S hors No No, ET de fuite, par type d'accident
- Occurrence d'accident T ou S hors No No, ET de fuite, par type d'accident en mer

### 3.4.3. Analyse Statistique

Lorsqu'elle possible (c'est-à-dire quand suffisamment de cas sont recensés), l'analyse statistique est faite afin de déterminer la typologie d'accident. Les différentes fréquences sont données :

- La fréquence d'occurrence des différents types d'accident
- La fréquence d'occurrence d'une fuite sachant qu'un type d'accident est survenu
- La fréquence d'occurrence d'une fuite ET d'un type d'accident (produit des deux précédentes)

### 3.4.4 Représentation sous forme d’arbre

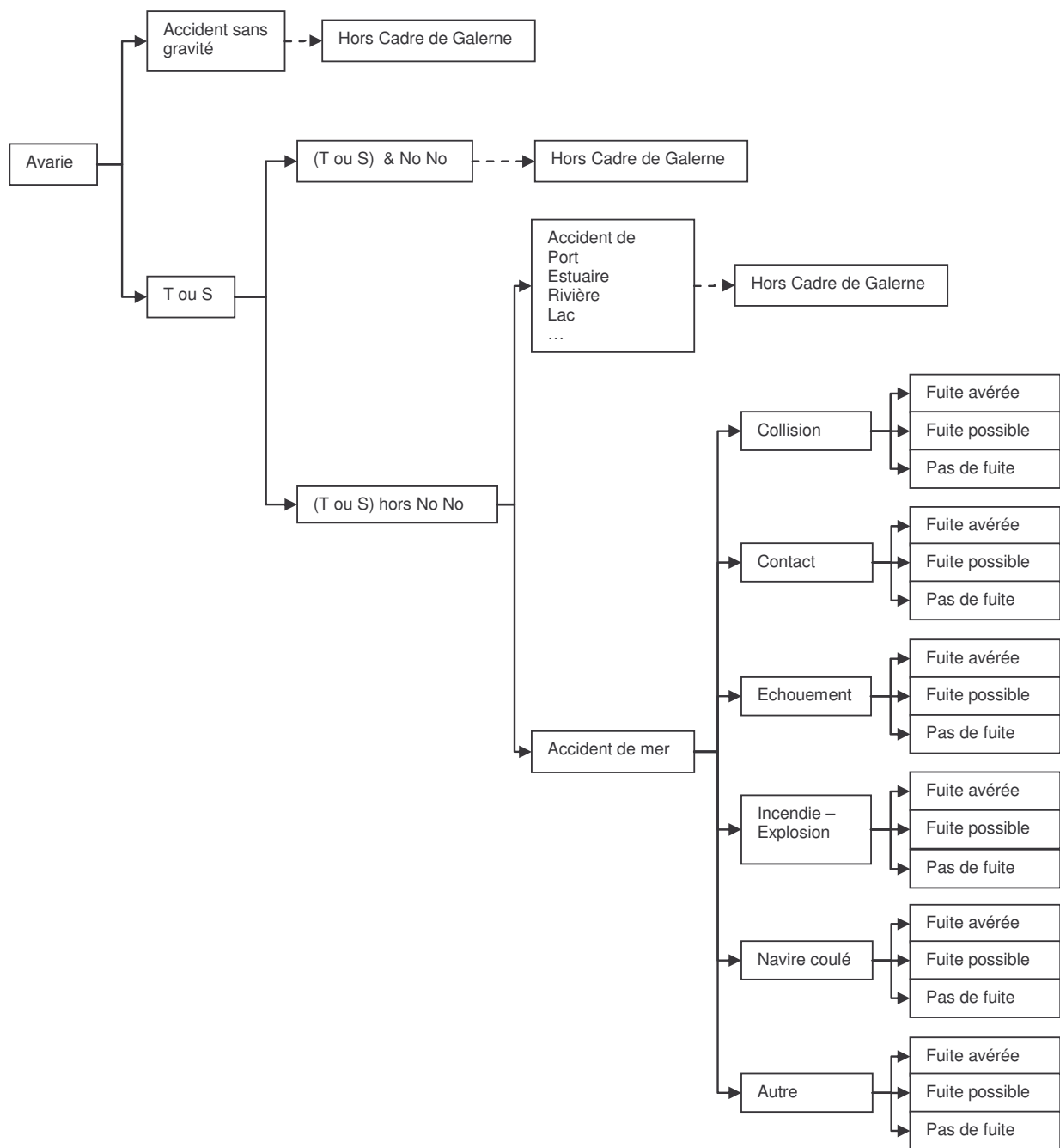


Figure 3 : Plan de la base de données LRF et des données traitées

## Section 4. Traitement et Analyse

### 4.1 Résultats généraux

Les deux tableaux ci-dessous permettent de rendre compte des statistiques globales sur les fuites par type de navire :

Période 1999-2005 Lloyd's Fairplay	occurrence	occurrence	occurrence	Flotte 2006 SEAWAY
	T ou S	T ou S hors No No	T ou S fuite possible ou avérée	
Méthaniers	13	4	0	176
GPLiers>12500 tonnes	24	5	0	235
GPLiers<12500 tonnes	70	24	2	819
Chimiquiers	142	50	15	1406
Chimiquiers/Oil tanker	217	99	20	1543

**Tableau 1 : Tableau des Occurrences quel que soit le lieu (ports, estuaire, mer...)**

Rapportée à flotte SEAWAY 2006	Fréquence (occurrence/an/navire)		
	T ou S	T ou S hors No No	fuite possible ou avérée
Méthaniers	1,23E-02	3,79E-03	-
GPLiers>12500 tonnes	1,70E-02	3,55E-03	-
GPLiers<12500 tonnes	1,42E-02	4,88E-03	4,07E-04
Chimiquiers	1,68E-02	5,93E-03	1,78E-03
Chimiquiers/Oil tanker	2,34E-02	1,07E-02	2,16E-03

**Tableau 2 : Tableau des Fréquences (occurrence par an et par navire)**

Les tailles des flottes de méthaniers et de GPLiers réfrigérés ne sont pas assez importantes pour conclure. Par contre les fréquences d'accidents de chimiquiers et chimiquiers/pétroliers sont basées sur un nombre significatif de navires (à peu près 1400) et les GPLiers<12500t aussi (850 navires).

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

Ces statistiques montrent que la probabilité de fuite est plus rare sur gaziers ( $4 \cdot 10^{-4}$  occ./an/nav.) que sur chimiquiers ( $1.8 \cdot 10^{-3}$  occ./an/nav.), eux-mêmes comportant légèrement moins de risques de fuite que les chimiquiers/pétroliers ( $2.2 \cdot 10^{-4}$  occ./an/nav.).

Ce traitement mathématique permet aussi de comparer l'occurrence des accidents et la vulnérabilité d'un type de navire à l'autre. Les chimiquiers subissent à peu près la même fréquence d'accidents que les GPLiers < 12500t, tandis que les chimiquiers/pétroliers subissent des accidents deux fois plus fréquemment. Cependant les chimiquiers sont plus vulnérables que les GPLiers < 12500t ou que les chimiquiers/pétroliers (30% des accidents mènent à une fuite pour le chimiquier, contre 8% pour le GPLiers < 12500t et contre 20% pour les chimiquier/pétrolier).

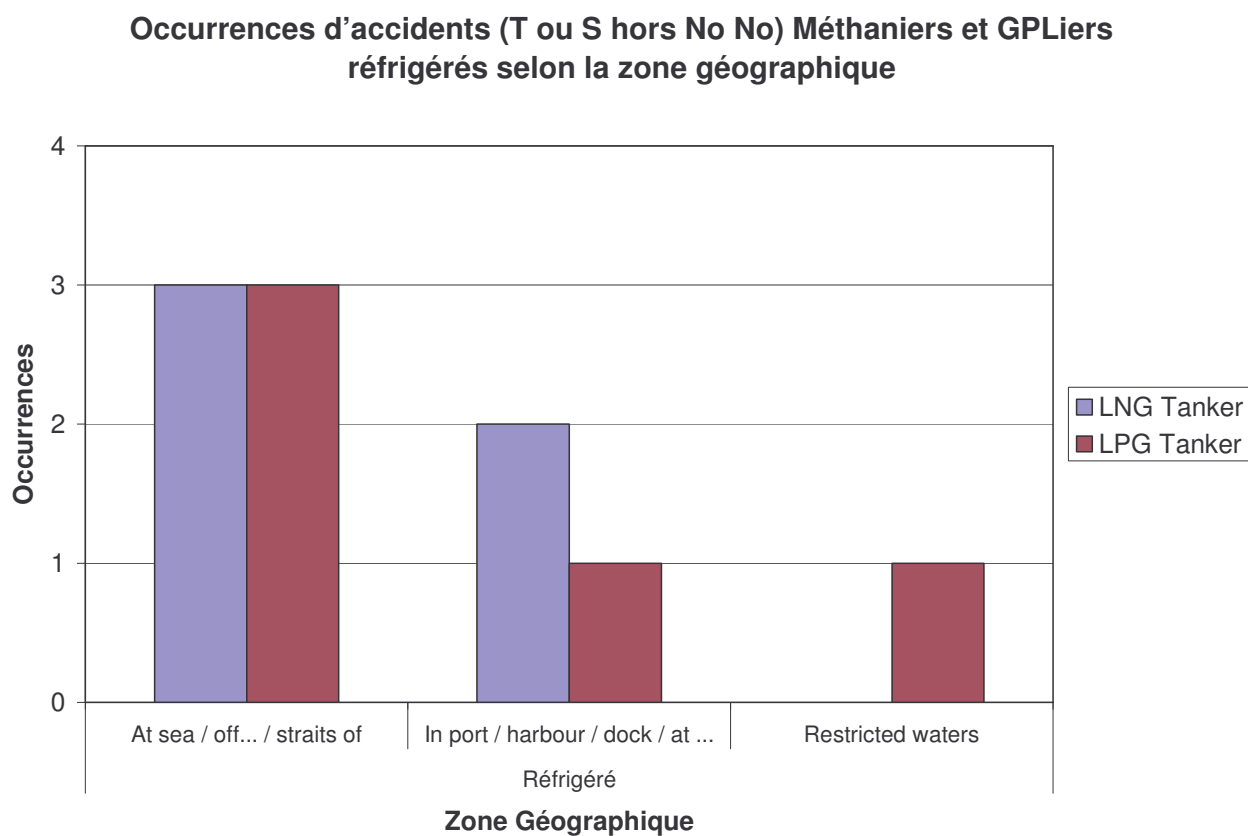
Afin de décrire au mieux la typologie des accidents (à quel type d'accident peut-on associer des fuites et quelle est la probabilité de fuite sachant qu'un type d'accident est survenu) nous nous intéressons aux croisements des données dans la base LRF.

Dans la suite de cette partie les accidents concernés sont les T ou S hors No No de la base de données du Fairplay Lloyd's.

## 4.2. GPLiers Réfrigérés et Méthaniers

### 4.2.1. Analyse simple

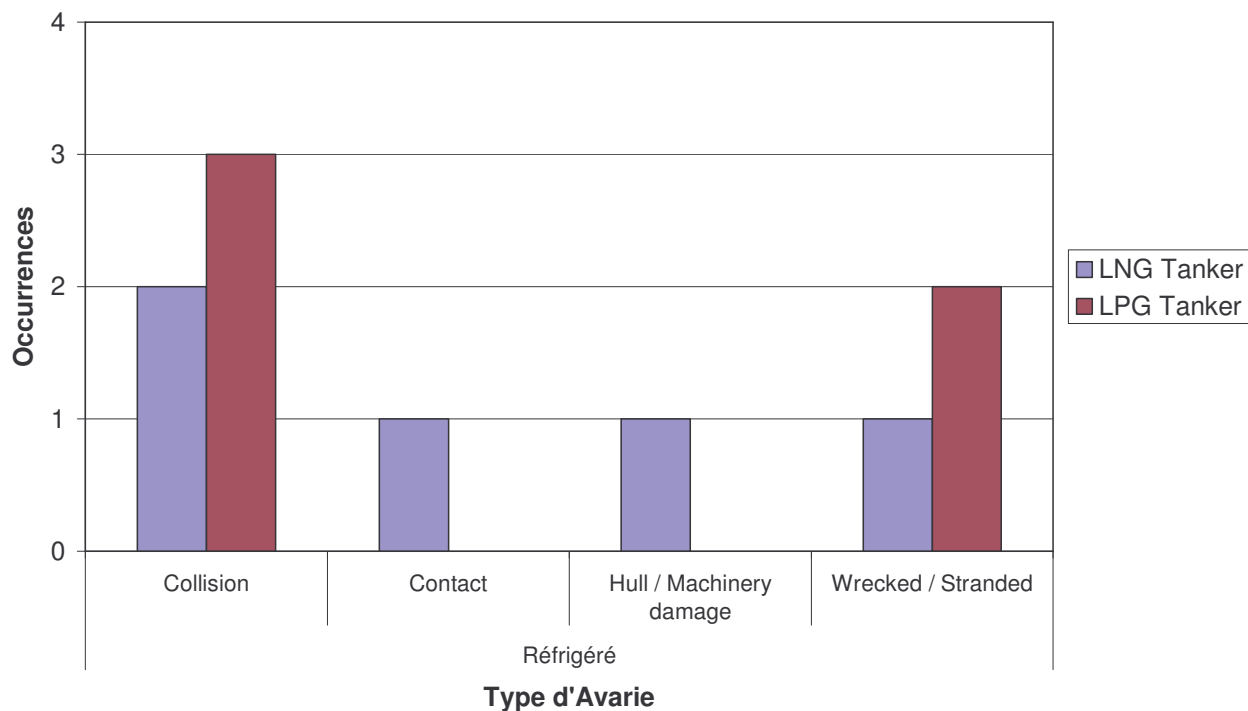
Cette analyse porte sur la localisation des accidents et leur nature. Les graphiques ci-dessous présentent les résultats obtenus :



**Figure 4 : Localisation des accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers**

Les accidents rencontrés se produisent en majorité en mer.

**Occurrences d'accidents (T ou S hors No No) Méthaniers et GPLiers réfrigérés selon le type d'avarie quelle que soit la zone géographique**



**Figure 5 : Types d'accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers**

Les accidents sont majoritairement des collisions et des échouements. On note qu'il ne figure pas d'incendie ou d'explosion dans la catégorie T ou S hors No No de ce type de navire.

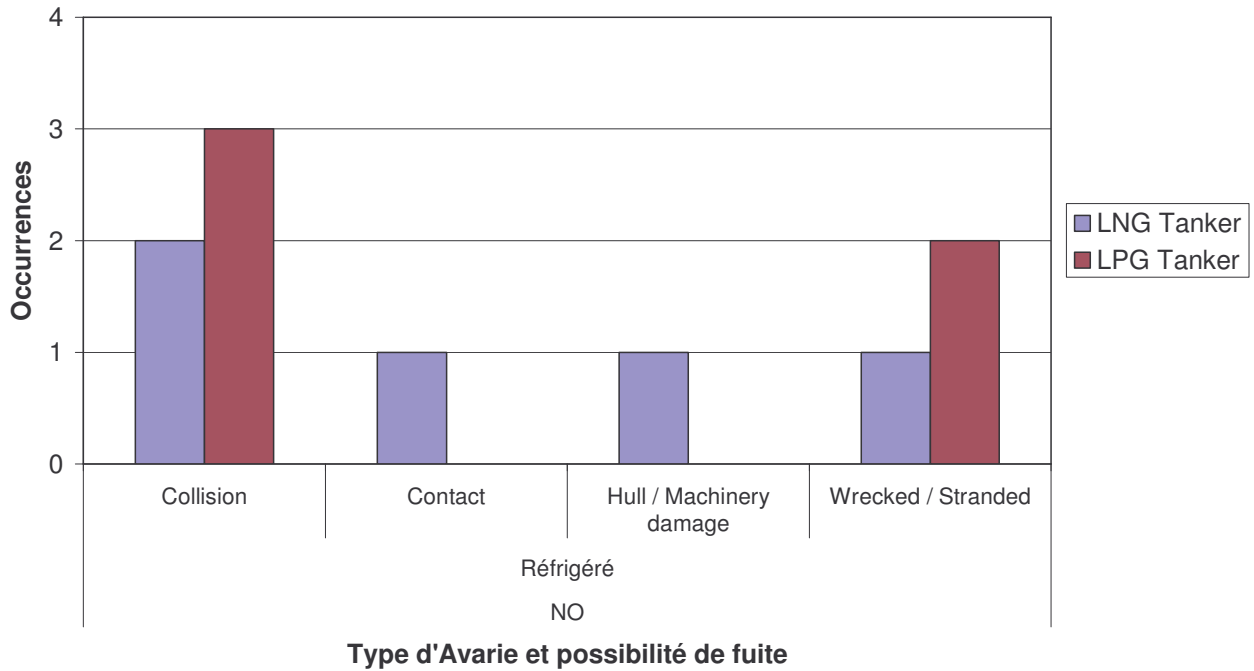


#### 4.2.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)

##### 4.2.2.1. Possibilité de fuite quelle que soit la localisation

Les données précédentes sont ensuite classées suivant la possibilité de fuite NO POSSIBLE YES. Le graphique ci-après montre ce tri :

**Occurrences d’accidents (T ou S hors No No) Méthaniers et GPLiers réfrigérés selon le type d’avarie et la possibilité de fuite quelle que soit la zone géographique**

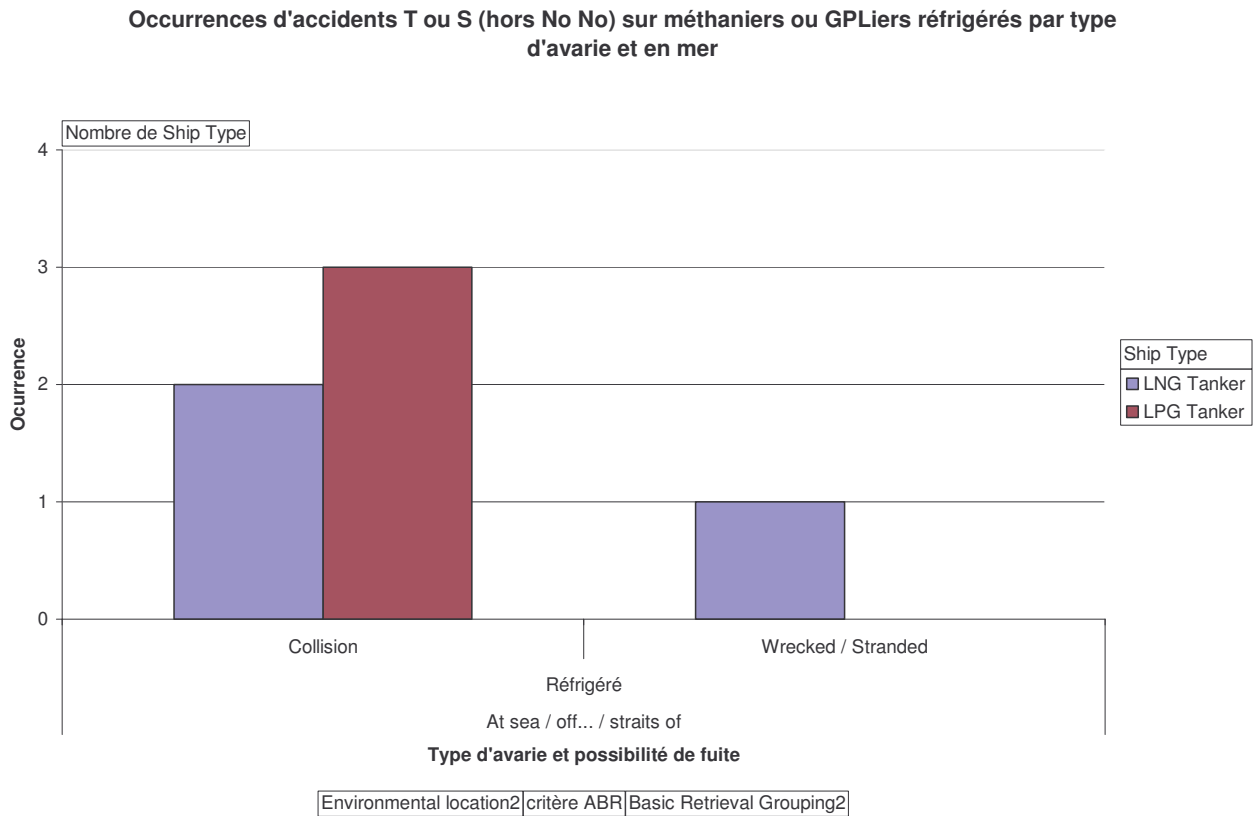


**Figure 6 : Possibilité de fuite par types d’accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers**

Ce graphique apporte une information supplémentaire par rapport au précédent. Aucune fuite n’a été avérée sur un GPLier réfrigéré ou sur un méthanier (pas de cas POSSIBLE ou YES). Le nombre de collisions et d’échouement est plus important que le nombre d’accidents dans les autres catégories.

#### 4.2.2.2. Possibilité de fuite en Mer

Les données précédentes sont ensuite filtrées sur les accidents qui ont lieu exclusivement en mer. Le graphique ci-après montre les résultats de ce filtrage :



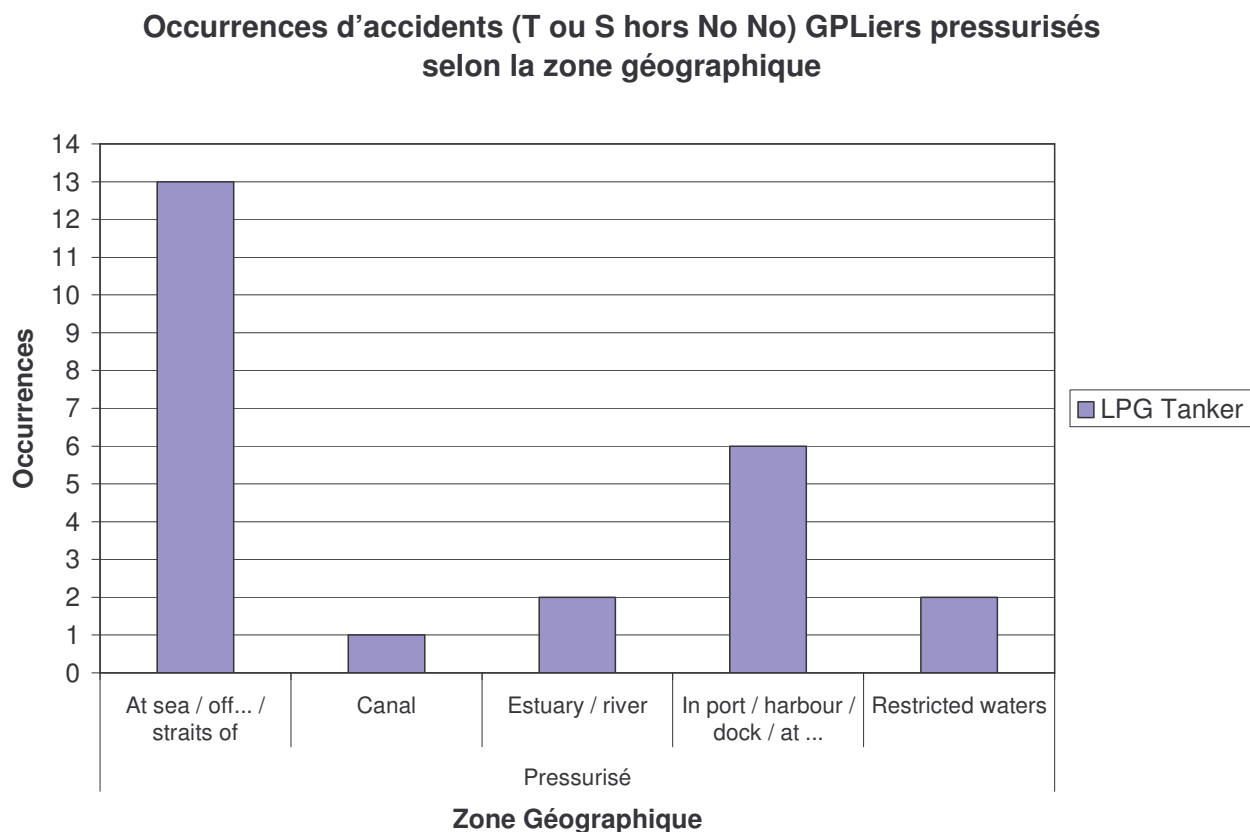
**Figure 7 : Possibilité de fuite par types d'accidents GPLiers réfrigérés et Méthaniers en mer**

De même que le tri précédent, ce filtrage ne comporte pas de fuite avérée ou possible. La collision semble être l'accident le plus fréquent lorsque le navire est en mer et une fuite de cargaison n'apparaît dans aucun des cas recensés. L'une des collisions est celle du Norman Lady avec l'USS Oklahoma.

### 4.3 GPLiers Pressurisés

#### 4.3.1 Analyse simple

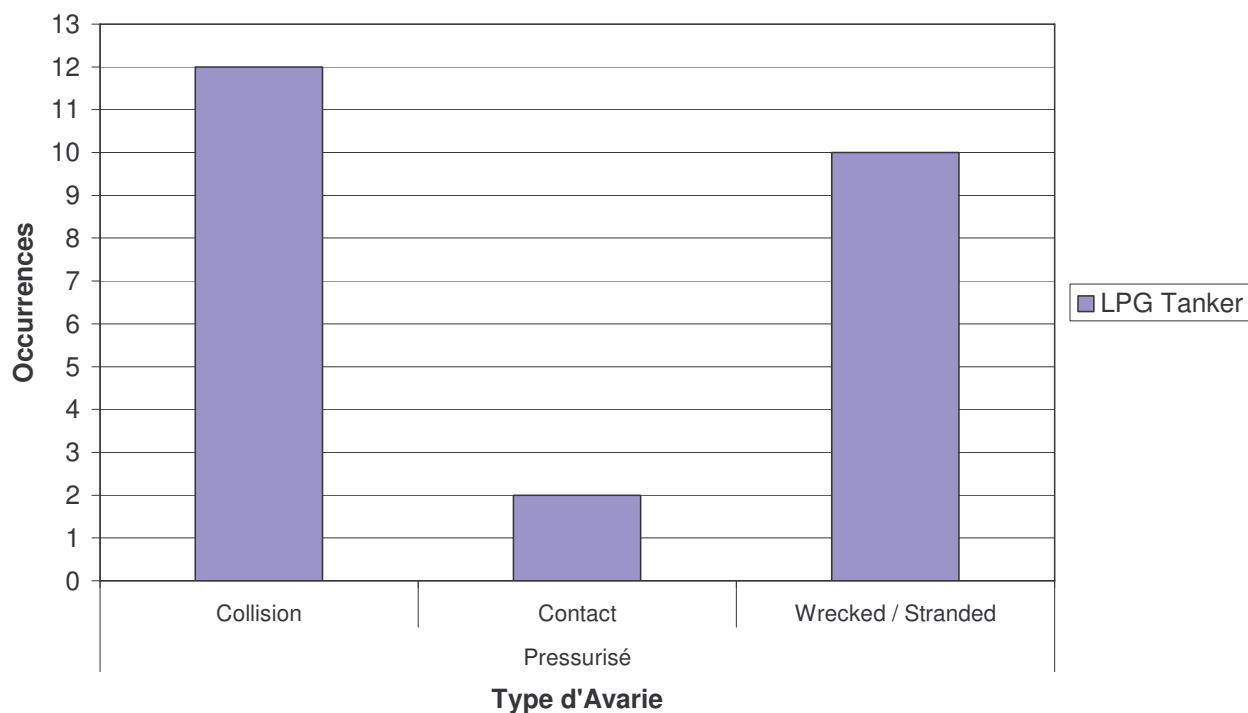
Cette analyse porte sur la localisation géographique des accidents et leur nature. Les graphiques ci-dessous présentent les résultats obtenus :



**Figure 8 : Localisation des accidents GPLiers pressurisés**

Les accidents rencontrés se produisent en majorité dans la zone 1 (en mer).

**Occurrences d'accidents (T ou S hors No No) GPLiers pressurisés  
selon le type d'avarie quelle que soit la zone géographique**



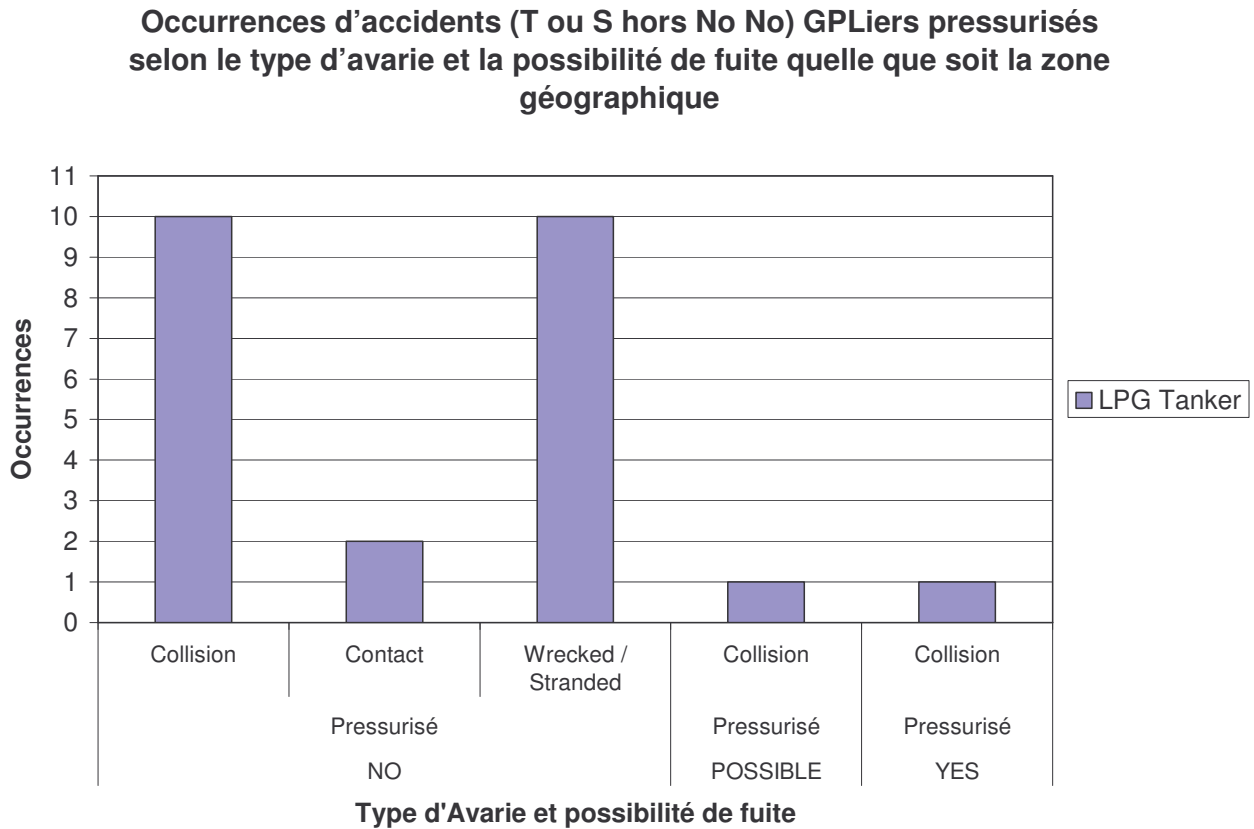
**Figure 9 : Types d'accidents GPLiers pressurisés**

Les accidents sont majoritairement des collisions et des échouements. On note ici aussi qu'il ne figure pas d'incendie ou d'explosion dans la catégorie T ou S hors No No de ce type de navire.

### 4.3.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)

#### 4.3.2.1. Possibilité de fuite quelque soit la localisation

Les données précédentes sont ensuite classées suivant la possibilité de fuite NO-POSSIBLE-YES. Le graphique ci-après montre ce tri :

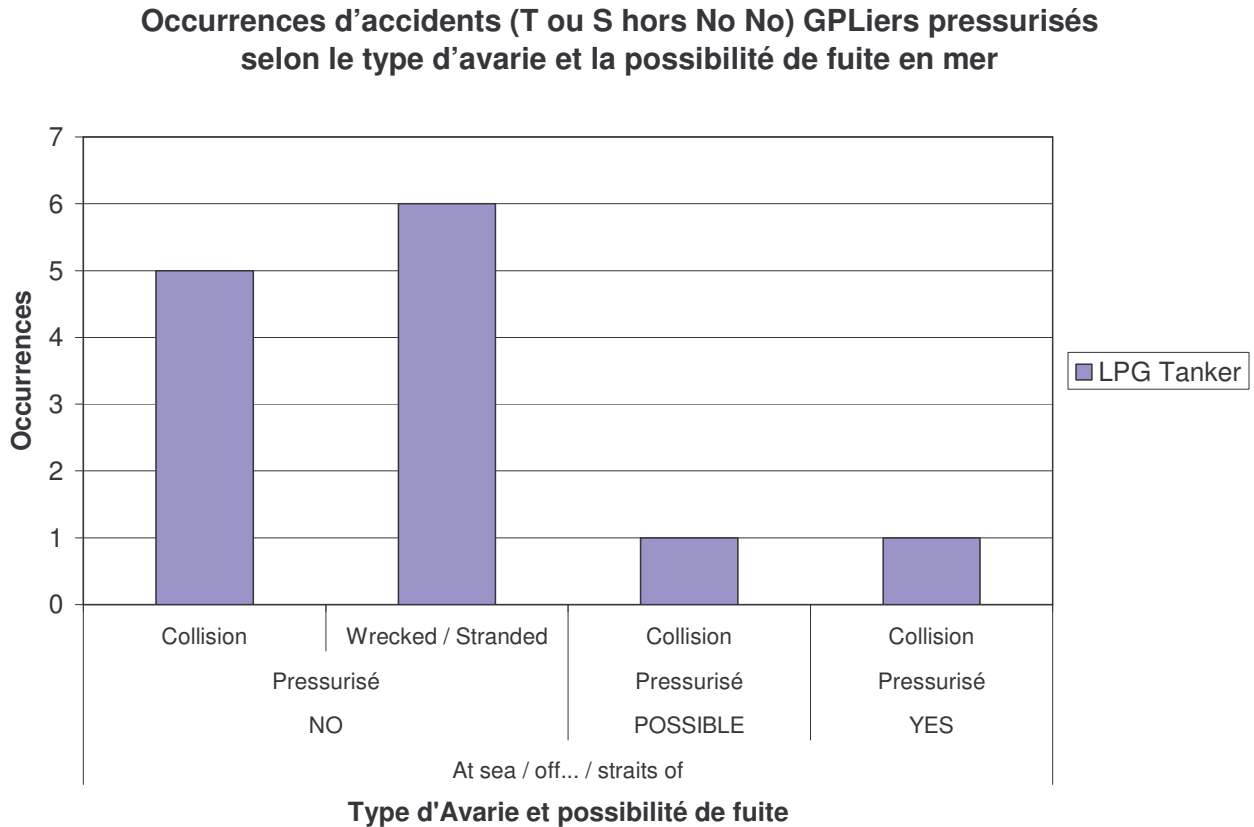


**Figure 10 : Possibilité de fuite par types d’accidents GPLiers pressurisés**

Le nombre de collisions et d’échouement domine les nombre d’accidents dans les autres catégories. Seules des collisions ont provoqué des fuites (1 avérée, 1 possible).

**4.3.2.2. Possibilité de fuite en Mer**

Les données précédentes sont ensuite filtrées sur les accidents qui ont lieu exclusivement en mer. Le graphique ci-après montre les résultats de ce filtrage :



**Figure 11 : Possibilité de fuite par types d’accidents GPLiers pressurisés en mer**

Ce filtrage a fait chuter de moitié le nombre de collisions et d’échouement. Les fuites avérées ou possibles sont encore présentes. La collision semble être un accident fréquent lorsque le navire est en mer qui, 1 à 2 fois sur 7, a provoqué une fuite de cargaison. L’échouement, lui, a lieu tout aussi fréquemment mais il n’a pas provoqué de fuite.

Ces deux possibilités de fuites après collision correspondent aux accidents suivants :

Date de l'incident	Date de la destruction du navire	Type d'avarie	Nom du Navire	GT	DWT	Type	Date de construction	Localisation
1999	1999	Collision	QI YUN 881	1140	1195	Pressurisé	1974	At sea / off... / straits of
2005	0	Collision	SHOKAKU MARU No. 2	1557	1543	Pressurisé	1981	At sea / off... / straits of

**Tableau 3 : Description des deux fuites avérées causées par des collisions**

Dont les commentaires sont les suivants :

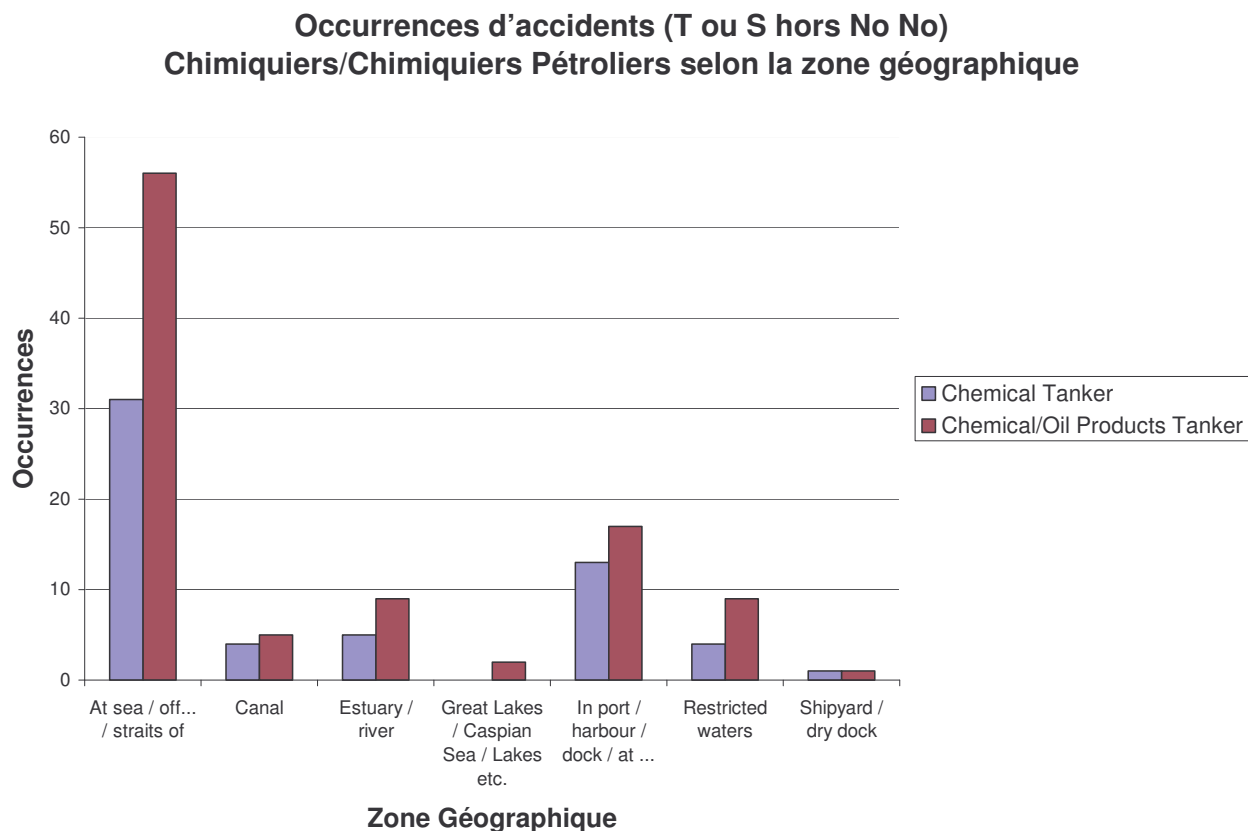
QI YUN 881	SANK AFTER COLLISION WITH M CONTAINER VESSEL 'QING CHUN MEN' 2.5 N MILES OFF HONG KONG, IN LAT. 22 09N., LONG. 114 11E., ON 25/3/99. SALVAGE OPERATIONS UNDERWAY.
SHOKAKU MARU No. 2	IN COLLISION WHILST ANCHORED WITH MV 'NAGATA MARU' 4 KM OFF MOTOYAMA-MISAKI PENINSULAR, JAPAN AT APPROXIMATELY 2330 HOURS ON 09/07/05. SUSTAINED DAMAGE TO STERN SECTION AND THE CARGO LIQUEFACTION PLANT DEVELOPED A FAULT.

**Tableau 4 : Commentaires associés aux deux fuites avérées causées par des collisions**

## 4.4. Chimiquiers et Chimiquiers/Pétroliers

### 4.4.1. Analyse simple

Cette analyse porte sur la localisation des accidents et leur nature. Les graphiques ci-dessous présentent les résultats obtenus :

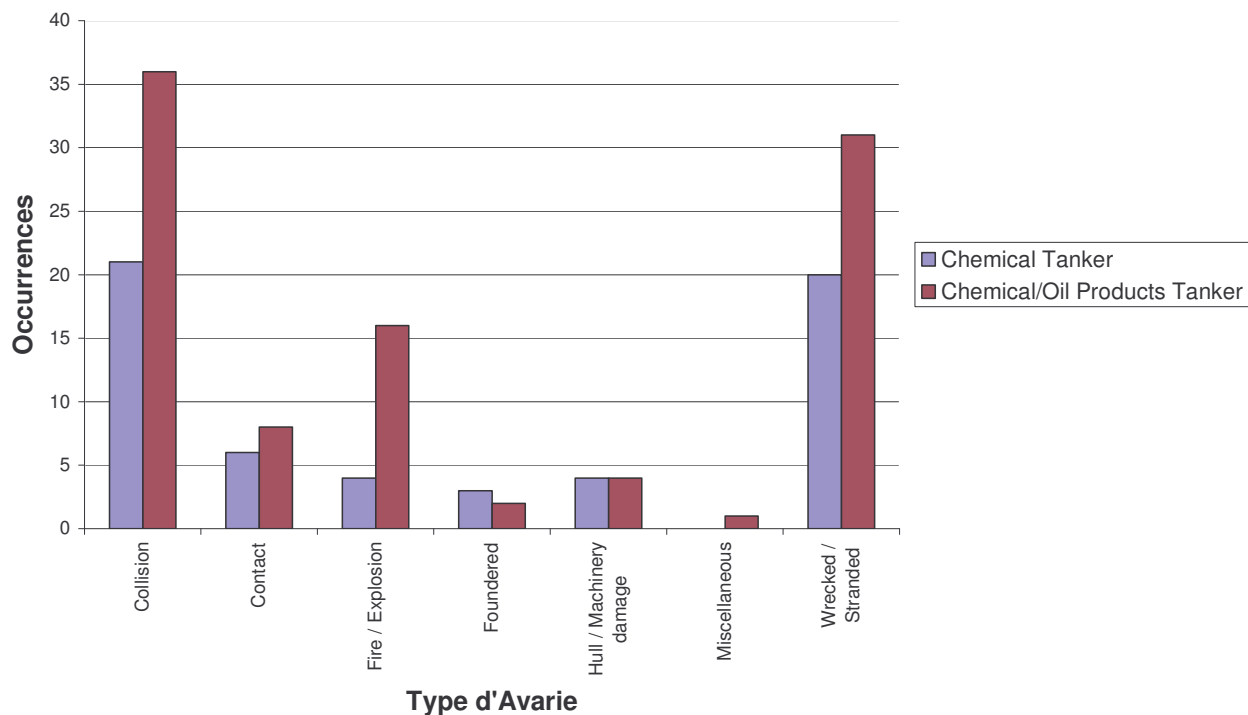


**Figure 12 : Localisation des accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers**

Les accidents rencontrés se produisent ici encore dans en majorité en mer.



**Occurrences d'accidents (T ou S hors No No)  
Chimiquiers/Chimiquiers Pétroliers selon la zone géographique**



**Figure 13 : Types d'accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers**

Les accidents sont majoritairement des collisions et des échouements. On note ici qu'il figure un nombre important d'incendies ou d'explosions dans la catégorie T ou S hors No No de ce type de navire, en particulier sur les Chimiquiers/Pétroliers.

Ce 2<sup>ème</sup> graphique montre la prédominance de la pleine mer comme lieu le plus courant pour les accidents graves des chimiquiers/pétroliers-chimiquiers.

#### 4.4.2. Analyse croisée avec la possibilité de fuite (danger)

##### 4.4.2.1. Possibilité de fuite quelle que soit la localisation

Les données précédentes sont ensuite classées suivant la possibilité de fuite NO-POSSIBLE-YES. Le graphique ci-après montre ce tri :

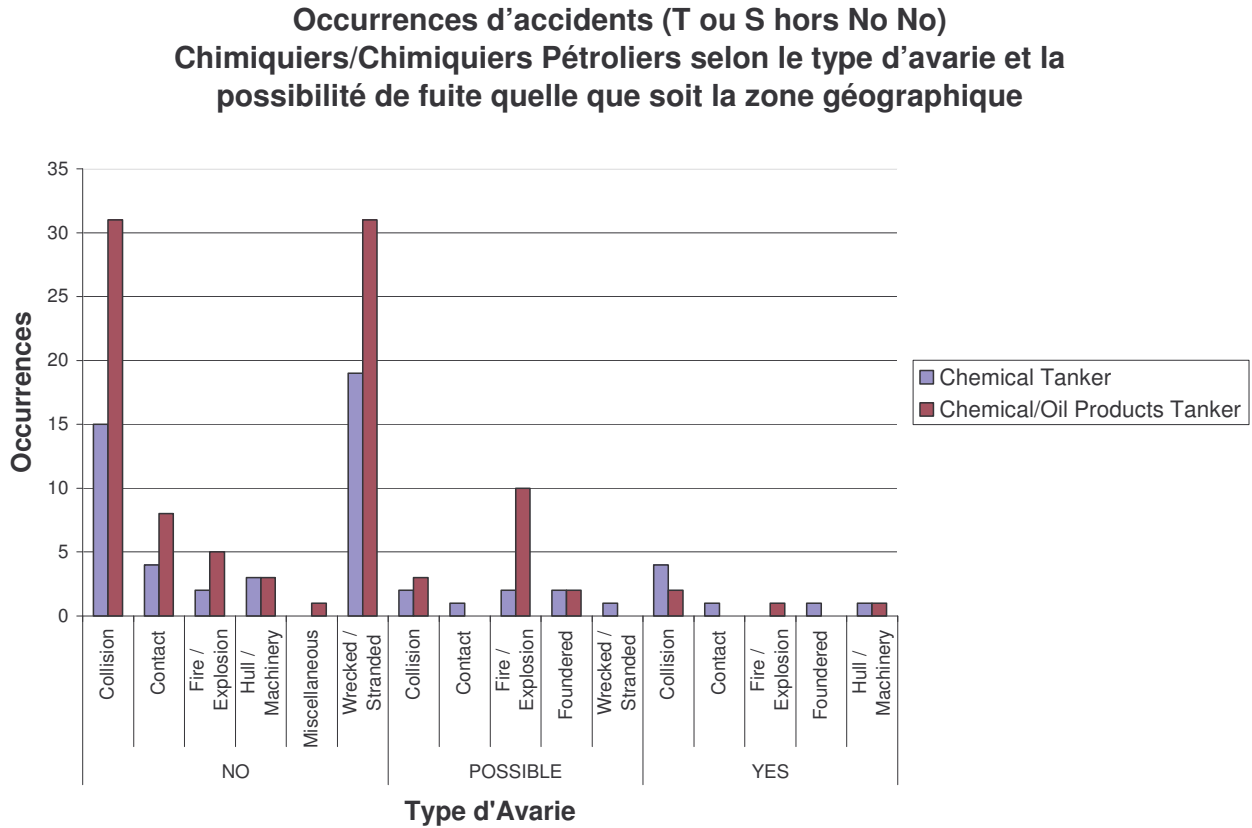
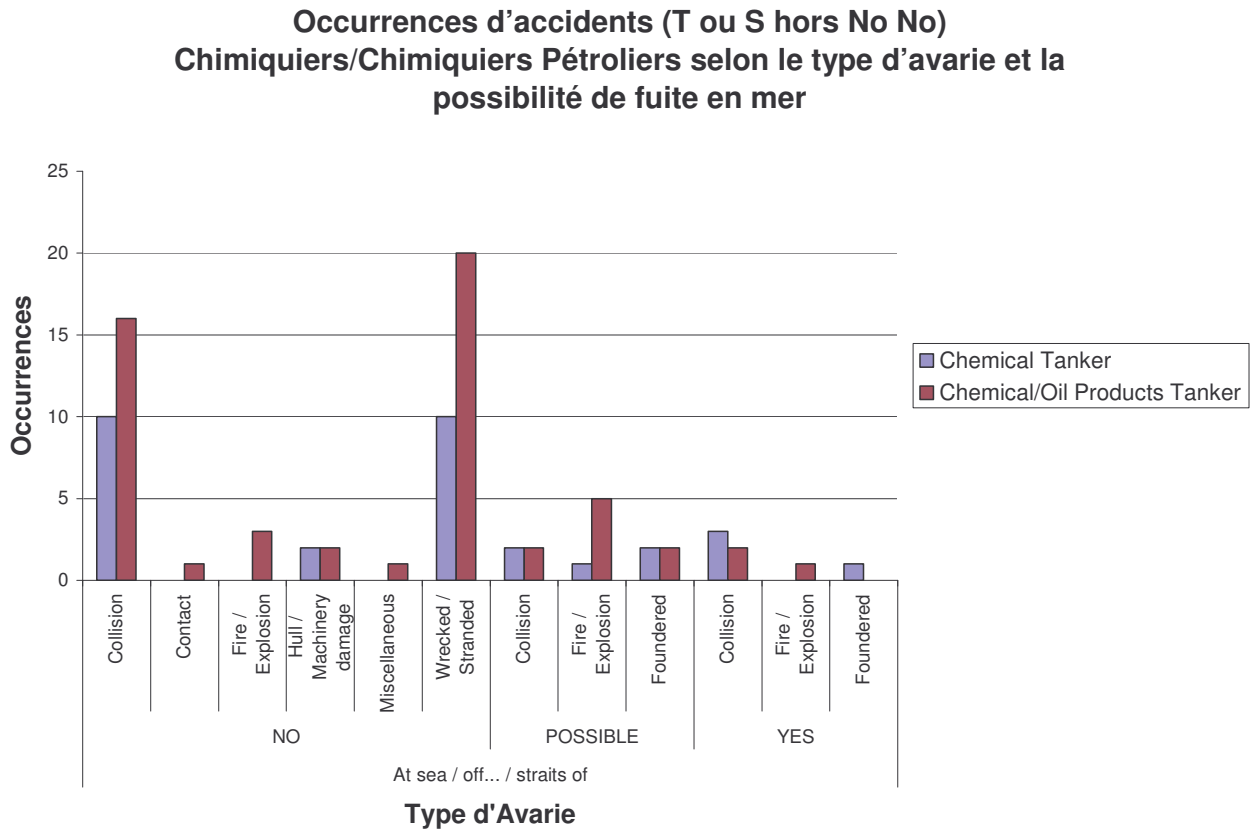


Figure 14 : Possibilité de fuite par types d’accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers

Le nombre de collisions et d’échouements domine encore le nombre d’accidents dans les autres catégories. Tous les types d’avarie ont provoqué des fuites.

**4.4.2.2. Possibilité de fuite en Mer**

Les données précédentes sont ensuite filtrées sur les accidents qui ont lieu exclusivement en mer. Le graphique ci-après montre les résultats de ce filtrage :



**Figure 15 : Possibilité de fuite par types d’accidents Chimiquiers Chimiquiers/Pétroliers en mer**

Ce filtrage a fait chuter d’environ un tiers le nombre de collisions et d’échouement. Les explosions/Incendies ont chuté de moitié. Les fuites avérées ou possibles sont encore présentes pour les avaries types collision, navire coulé et incendie/explosion. Il est intéressant de noter qu’il n’y a jamais eu d’échouement de chimiquier causant une fuite avérée ou possible durant cette période.

### 4.4.3 Analyse statistique

#### 4.4.3.1. Occurrences d'avaries causant des fuites en mer sur les chimiques et chimiques/pétroliers

Seuls la collision, la perte de flottabilité et l'incendie/explosion restent des facteurs concourants à la fuite en mer. Le tableau croisé suivant permet de préciser les occurrences de ces accidents en mer et en eaux réglementées :

Type d'avarie	FUITE cargaison avérée	Zone Géographique	Chemical Tanker	Chemical/Oil Products Tanker	Total
<b>Collision</b>	NO	At sea / off... / straits of	10	16	26
		Restricted waters	1	4	5
	Total NO		11	20	31
	POSSIBLE	At sea / off... / straits of	2	2	4
		Total POSSIBLE		2	2
	YES	At sea / off... / straits of	3	2	5
Restricted waters		1		1	
Total YES		4	2	6	
<b>Total Collision</b>			17	24	41
<b>Fire / Explosion</b>	NO	At sea / off... / straits of		3	3
		Total NO			3
	POSSIBLE	At sea / off... / straits of	1	5	6
		Restricted waters		1	1
	Total POSSIBLE		1	6	7
	YES	At sea / off... / straits of		1	1
Total YES			1	1	
<b>Total Fire / Explosion</b>			1	10	11
<b>Foundered</b>	POSSIBLE	At sea / off... / straits of	2	2	4
		Total POSSIBLE		2	2
	YES	At sea / off... / straits of	1		1
		Total YES		1	
<b>Total Foundered</b>			3	2	5
<b>Total</b>			21	36	57

Tableau 5 : Tableau croisé des occurrences de fuites selon le type d'accident Chimiquiers et Hybrides

#### 4.4.3.2. Fréquence d'avaries causant des fuites en mer sur les chimiques et chimiques/pétroliers

Ces données permettent de dresser les trois arbres événementiels qui incorporent les fréquences d'accidents et de fuites pour les chimiques et chimiques-pétroliers dans leur ensemble, les chimiques seuls et les chimiques pétroliers seuls :

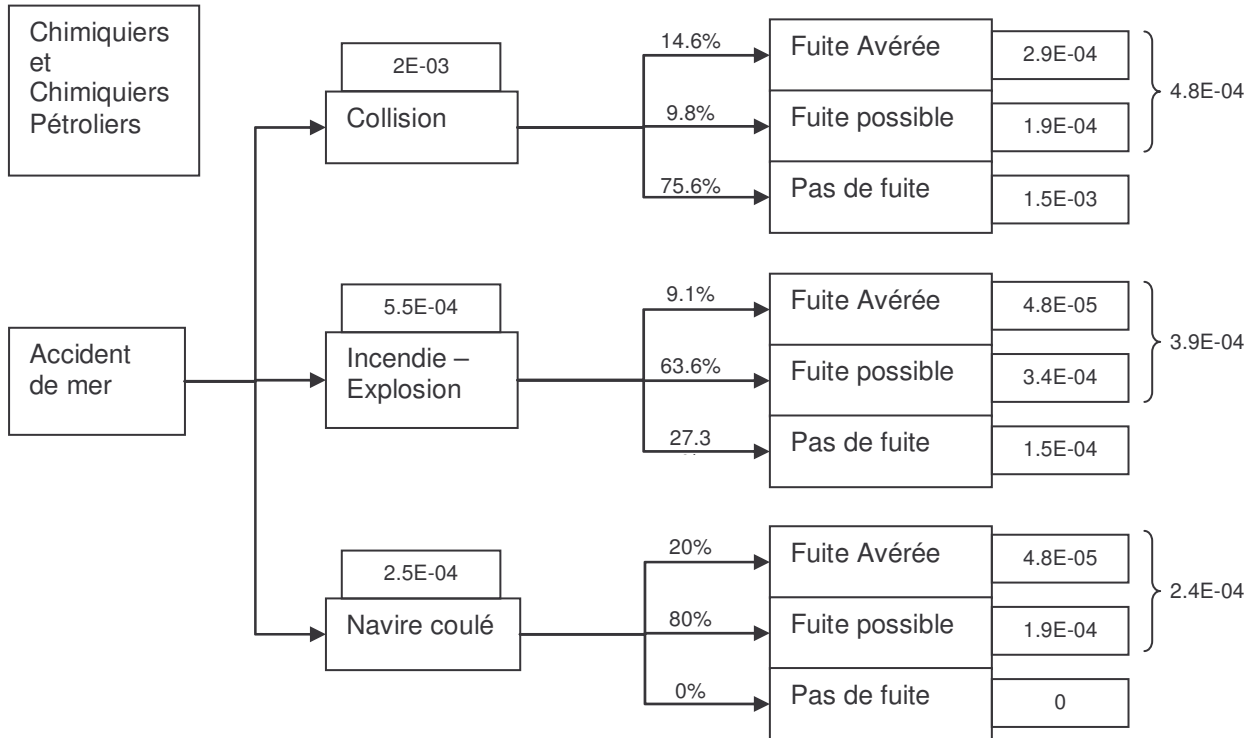


Figure 16 : Arbre événementiel Chimiquier et Chimiquiers/Pétroliers- (occurrence/chimiquier/an)

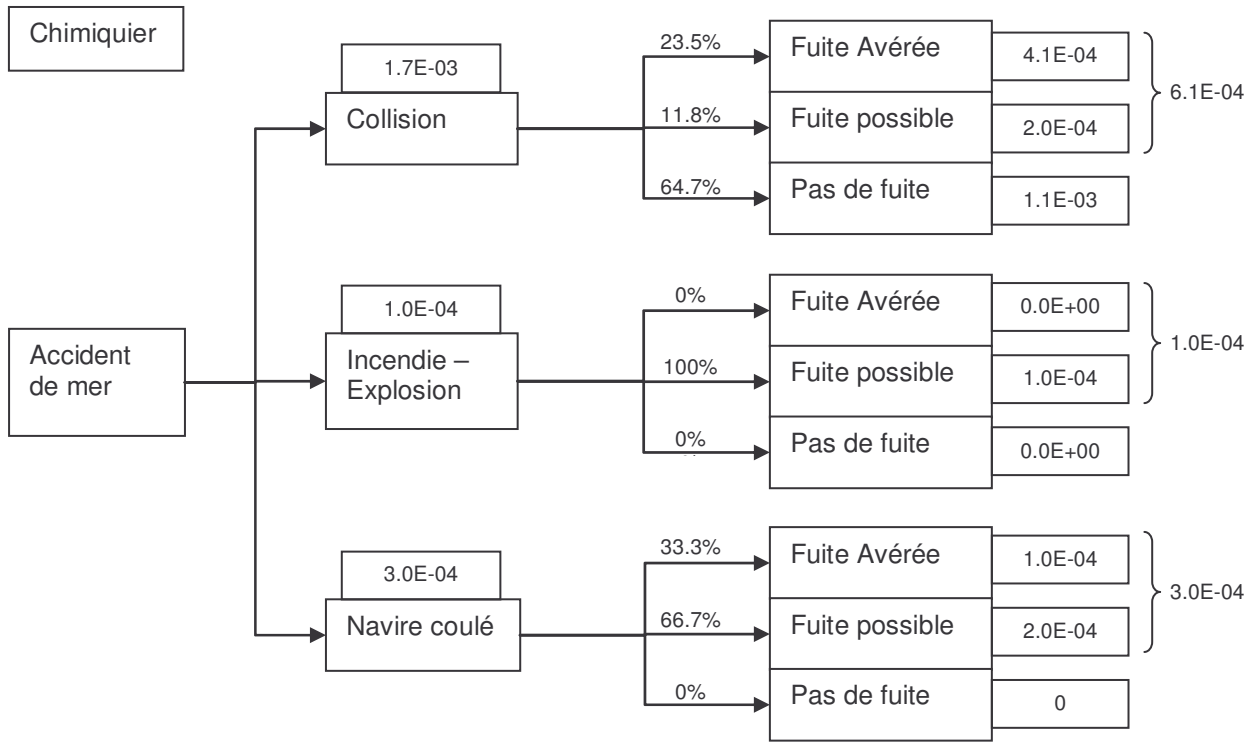


Figure 17 : Arbre événementiel Chimiquiers – (occurrence/chimiquier/an)

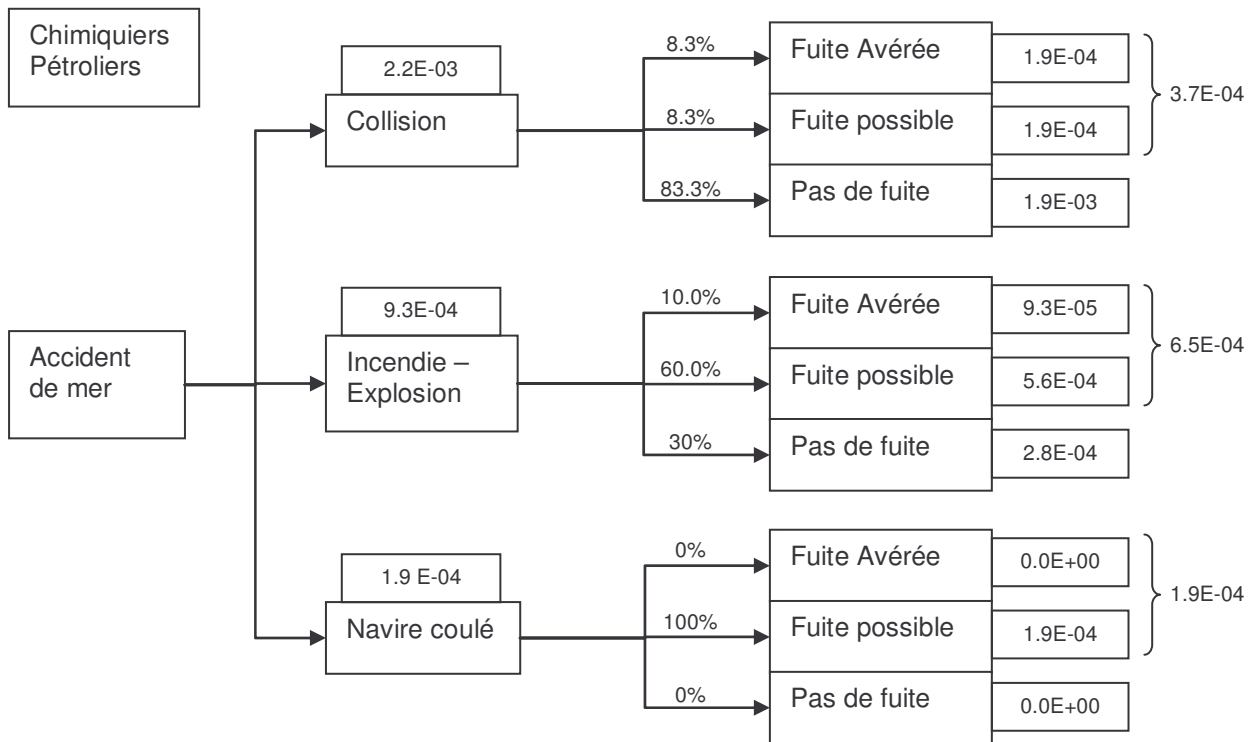


Figure 18 : Arbre événementiel Chimiquiers-Pétroliers – (occurrence/chimiquier-pétrolier/an)

#### 4.4.3.3. Analyse des résultats chimiques

Ces arbres permettent l'analyse suivante :

Quel que soit le type de navire considéré (transporteur de gaz ou chimiquier), la collision est l'accident le plus fréquent : Pour le chimiquier, l'occurrence de la collision par navire et par an est 2 à 4 fois plus importante que celle de l'incendie/explosion et 5 à 10 fois plus importante que celle d'une perte de flottabilité menant au naufrage du navire. Bien que fréquentes, les collisions ne mènent qu'une fois sur 4 à une fuite possible ou avérée, tandis que l'incendie/explosion mène 3 fois sur 4 à une fuite possible ou avérée et que l'avarie structurelle mène systématiquement à la fuite

Comme la taille de l'échantillon est relativement faible, et étant donné que les fréquences cumulées (à droite des accolades) sont toutes dans le même ordre de grandeur ( $10^{-4}$  fuite/navire/an), il n'y a pas de raison de considérer un accident plutôt qu'un autre - si toutefois l'intérêt est d'étudier les accidents les plus représentatifs menant à la fuite.

Les fréquences conditionnelles permettent par ailleurs de dégager une tendance qui peut aider les services de secours français dans leur décision. Les probabilités conditionnelles de fuite (connaissant la nature de l'événement, ie après l'appel au secours) peuvent être estimées avec les pourcentages ci-dessus. Ces informations permettent d'assister l'équipe de secours dans le choix des matériels de protection.

Il est intéressant de noter que le cas de l'incendie/explosion est lié au type de chimiquier : les navires transportant des produits pétroliers ont plus de probabilité de subir un incendie ou une explosion. Dans ce cas, la fuite a été fortement suspectée (70% des cas).

Enfin, concernant le cas des naufrages dus à une perte de flottabilité, seul le Ievoli Sun a subi une fuite avérée. Bien sûr, dans le cas des épaves qui ont coulé, la LRF ne donne pas d'informations sur les dégagements de produits qui vont se poursuivre après que le navire a coulé. On peut considérer que la fuite a lieu, mais sans savoir la rapidité du dégagement. Il pourrait être intéressant d'évaluer le débit de fuite d'une cuve intacte et coulée.

## **Section 5. Conclusion**

Dans la première partie, différents retours d'expérience ont été sélectionnés sur les trois types de navire qui intéressent le projet GALERNE. Des tableaux, des fiches synthétiques ont été présentées. Elles permettent d'imaginer les modes de défaillances de ces types de navire. On retient notamment que les opérations des équipes de secours et de sauvetage ont bien souvent empêché l'aggravation des conséquences de l'accident. Parfois d'autres facteurs heureux se sont combinés. Ces retours d'expérience qualitatifs seront analysés lors de la tâche T1.5 *Définition des Scénarios* afin de mettre à jour des « scénarios types » réalistes.

Dans la deuxième partie, les données statistiques sur les accidents impliquant une suspicion de fuite ou une fuite avérée ont été analysées. Différents tableaux croisés ont été présentés afin de mettre en évidence la typologie des accidents qui mènent à des fuites de cargaison. Cette analyse quantitative sera utilisée dans le cadre des analyses de risque qui sont menées sur chaque type de navire dans la tâche 1.5 *Définition des Scénarios*.

Il en ressort que le cas de la collision est, pour tous les types de navire, le plus fréquent. Concernant les méthaniers et les GPLiers, le faible nombre d'occurrences ne permet pas de conclure sur la typologie des accidents menant à une fuite de cargaison. Concernant les GPLiers pressurisés, il n'y a pas eu de fuite autrement que dans le cas d'une collision.

Dans le cas des chimiquiers, l'analyse quantitative a été poussée jusqu'à l'évaluation des probabilités de fuite connaissant la nature de l'accident. Il en ressort qu'il y a autant de probabilité d'avoir une fuite avec une collision, qu'avec une explosion, et qu'avec une perte de flottabilité. Il a été noté une différence cependant entre l'occurrence des incendies/explosions entre ces deux catégories : les chimiquiers/pétroliers sont plus fréquemment soumis à l'incendie ou l'explosion que les chimiquiers simples.



## Section 6. REFERENCES

### 6.1. SITES DES PARTICIPANTS DE LA SOUS-TACHE

*CEDRE* : Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les Pollutions Accidentelles des Eaux. <http://www.Cedre.fr/>

BEA Mer : Bureau d'enquêtes sur les événements de mer (*BEA*mer)  
<http://www.beamer-france.org/enquetes/enquetes.htm>

### 6.2. DOCUMENTS

SIGTTO : Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Ltd, *Safe Havens for Disabled Gas Carriers*, third edition, 2003

HNS Correspondence Group – Incident Paper, annex.

California Land Commission Appendix C3 Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port, Revised Draft EIR

Consequence of LNG Marine Accidents, Pitblado et Al CCPS Conf., Orlando 2004

Use of Risk Analysis for Emergency Planning of LNG Carriers, Skramstad, Musaeus, Capt. Melbo, Gastech 2000.

<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2006/P595.pdf> : Transportation of liquid bulk chemicals by tankers in the Baltic sea, S Hänninen, J. Rytönen, 2006.

### 6.3. SITES EXTERNES

Les sites sur lesquels s'est porté l'intérêt du groupe de travail sont :

World Casualty Statistics

Merger of Lloyd's Register's Maritime Information Publishing Group and Fairplay Publications Limited.

<http://www.lrfairplay.com/archway/Services/default.htm>

Colton Company

Site dédié

<http://www.coltoncompany.com/shipbldg/worldsbldg/gas/lngcaccidents.htm>

ASTB: Australian Transport Safety Bureau - Marine Transport Safety Investigation Reports

<http://www.atsb.gov.au/marine/marine.aspx>

TSB: Transportation Safety Board of Canada

<http://www.tsb.gc.ca/en/reports/marine/index.asp?section=1>

NTSB: National Transportation Safety Board (US)

[http://www.nts.gov/Publictn/M\\_Acc.htm](http://www.nts.gov/Publictn/M_Acc.htm)

MAIB : Marine Accident Investigation Branch

[http://www.maib.gov.uk/publications/investigation\\_reports.cfm](http://www.maib.gov.uk/publications/investigation_reports.cfm)

## **Section 7. ANNEXE**

### **RETOUR D'EXPERIENCE ADDITIONEL : BEAMER**

#### **CHIMIQUIERS**

##### **KIRA**

Février 1996, naufrage du KIRA navire chimiquier au large du Péloponèse avec 7600 tonnes d'acide phosphorique. Aucun survivant.

##### **BALU**

Le 20 mars 2001, le navire-citerne (de type chimiquier) battant pavillon maltais BALU, transportant 8012 tonnes d'acide sulfurique (densité 1,85) de Fredrikstadt (Norvège) à destination de Huelva (Espagne) a fait naufrage dans le golfe de Gascogne en zone économique française à 125 milles des côtes Nord-Ouest de l'Espagne.

Il y avait une tempête de Sud Ouest force 8 à 9..L'accident n'a pas fait de victime.

Le navire avait été construit en 1978 par le chantier ANKERLOKKEN VERFT GLOMMEN de Fredrikstat en Norvège. Il était classé au Bureau Veritas.

D'un port en lourd de 9981 tonnes, le navire disposait de 17 citernes de cargaison réparties sur 9 tranches d'un volume total de 10162 m<sup>3</sup>

La cause probable du naufrage est due à une avarie de structure (rupture d'une cloison longitudinale entre deux citernes) suite à une mauvaise répartition du chargement et à un remplissage des citernes de ballastage par les dégagements d'air.

##### **CHASSIRON**

Le 12 juin 2003, le navire citerne transporteur de produits pétroliers et de produits chimiques CHASSIRON battant pavillon français a subi une explosion au large de Bayonne. L'explosion s'est produite au cours d'une opération de lavage dans une citerne de cargaison ayant contenu auparavant du supercarburant sans plomb SP 98.

Il y a eu une victime et le navire a subi des dommages importants. Pas de pollution.

L'explosion a été provoquée par la formation d'une ATEX air/essence dans la citerne ; la source d'inflammation ayant pu être d'origine électrostatique ou mécanique.

##### **METANOL**

Le 30 avril 2005, le navire citernes transporteur de produits chimiques METANOL battant pavillon maltais, accosté au terminal pétrolier de Lavéra pour le déchargement de 3500 tonnes de méthanol a subi une explosion au niveau de l'une des citernes peu après le début de déchargement de celle-ci provoquant un début d'incendie sur le pont rapidement maîtrisé.

## Galerie – Sous-tâche 1.2 – Retour d'Expérience

Aucun blessé. Pas de pollution.

D'un port en lourd de 6525 tonnes, son volume de cargaison est de 5675 m3 répartis dans 26 citernes : 12 centrales et 14 latérales.

L'explosion résulte de la formation d'une atmosphère explosive air/vapeurs de méthanol (ATEX) et d'une source d'inflammation d'origine mécanique liée à un dysfonctionnement mécanique de la pompe de cargaison de la citerne.

### **ECE**

Le 31 janvier 2006, peu avant l'entrée du rail montant des Casquets , le vraquier maltais GENERAL GROT-ROWECKI transportant 26000 tonnes de phosphate et le chimiquier des îles Marshall ECE chargé de 10000 tonnes d'acide phosphorique sont entrés en collision.

Gravement endommagé le chimiquier a coulé laissant échapper des fuites d'acide phosphorique.

Il n'y a pas eu de blessé.

L'enquête en cours n'a pas encore permis de déterminer les causes exactes de l'abordage.

### **GPLIERS : ABORDAGES**

#### **PAMPERO – FS LOUISE**

Le 2 février 2003, le bateau fluvial transporteur de gaz PAMPERO chargé de 2200 tonnes de chlorure de vinyle monomère et le pétrolier ravitailleur de soutage FS LOUISE quasiment lège se sont abordés dans le golfe de Fos.

L'étrave du PAMPERO est venue percuter l'avant bâbord du bordé de muraille du FS LOUISE causant une large déchirure au-dessus de la flottaison.

Il n'y pas eu de blessé, ni incendie ou explosion. Pas de pollution.

L'accident est le résultat d'une série d'incompréhensions mutuelles entre les deux navires engendrées par une communication VHF ambiguës sur leurs intentions respectives et qui se sont retrouvés en routes de collision.

#### **BERGE NICE – SEACOR LAREDO**

Le 12 mai 2004, le navire français transporteur de gaz de pétrole liquéfié BERGE NICE et le navire ravitailleur au large chilien SEACOR LAREDO se sont abordés à l'entrée de la zone étroite du chenal de Punta Anegada dans l'Est du détroit de Magellan à la suite d'une avarie machine du ravitailleur au moment du croisement des deux navires.

Le LPG BERGE NICE d'un port en lourd de 35346 tonnes avait à son bord une cargaison complète de 33560 tonnes de propane.

L'étrave du ravitailleur a heurté le bordé bâbord du BERGE NICE à hauteur du château, occasionnant une brèche dans une soute à combustible, avec pour conséquence un rejet à la mer de 168 tonnes de fioul lourd engendrant une pollution.

Trois membres de l'équipage du ravitailleur chilien ont été blessés.

### **MAINGAS – MSC MEE MAY**

Le 26 mars 2004, le navire citernes transporteur de gaz de pétrole liquéfié (GPL) MAINGAS battant pavillon libérien et le porte-conteneurs MSC MEE MAY battant pavillon panaméen se sont abordés en Seine près des postes pétroliers de Port Jérôme.

Le MAINGAS d'un port en lourd de 3466 tonnes remontait la Seine. Il était vide, sur ballast, saturé en vapeurs de propane dans les cuves. Son volume de cargaison est de .....

Le MSC MEE MAY d'un port en lourd de 21185 tonnes descendait la Seine.

Au moment où les deux navires allaient se croiser, le MAINGAS a fait une abattée sur bâbord qu'il n'a pas pu contrer. Malgré la manœuvre d'urgence, l'étrave du MSC MEE MAY est venue percuter le gazier à l'avant tribord.

Aucun blessé, ni incendie ou explosion. Pas de pollution.

La cause de l'accident n'a pu être formellement établie : probablement comportement instable du navire dans des conditions hydrologiques particulières, défaut fugitif de barre sans exclure une erreur humaine.

### **SIGMAGAS – HAPPY BRIDE**

Le 4 janvier 2006, les deux navires citernes transporteurs de gaz de pétrole liquéfié (GPL) SIGMAGAS battant pavillon Antigua et Barbuda et HAPPY BRIDE battant pavillon île de Man se sont abordés dans le chenal de Donges en Loire près du poste pétrolier 5.

Le SIGMAGAS d'un port en lourd de 7876 tonnes descendait le chenal. Il était chargé de 4883 tonnes de butane. Son volume de cargaison est de 8606 m<sup>3</sup> répartis en deux citernes avant et arrière. Le HAPPY BRIDE d'un port en lourd de 5991 tonnes remontait le chenal. Il était vide, sur ballast, saturé en vapeurs de propane dans les cuves. Son volume de cargaison est de 6386 m<sup>3</sup> répartis en deux citernes avant et arrière.

C'est au moment que les deux navires allaient se croiser que le SIGMAGAS a fait une abattée brutale sur bâbord à la suite d'une avarie de gouvernail. Son étrave est venue aborder le HAPPY BRIDE au tiers avant bâbord au niveau d'une citerne à combustible. La brèche occasionnée s'est traduite par un rejet de 30 tonnes de fioul lourd dans l'estuaire de la Loire.

Aucun blessé, ni incendie ou explosion.

# CHAPITRE 3



19 AVRIL 2007

Le transport des gaz liquéfiés et des produits évaporants par navire

1ère partie  
Les gaz liquéfiés

AT 05213

DT4/06/03588

RÉSUMÉ	<p>Cette note décrit dans sa première partie les principes régissant la conception des navires destinés au transport en vrac des gaz liquéfiés. Les seconde et troisième parties présentent d'une manière générale le transport par navire du GNL et des autres produits. Les produits évaporants autres que les gaz liquéfiés sont transportés dans des navires chimiques, qui font l'objet de la dernière partie de ce document.</p>
--------	--

	NOM	VISA	DATE
RÉDACTEUR	D. de Castelet		19/04/2007
VÉRIFICATEUR	P. Ricou		

Révision	Date
0	28/12/2006
1	19/04/2007

# TABLE DES MATIERES

<b>1.GENERALITES</b>	<b>82</b>
<b>1.1.Gaz liquéfiés et produits évaporants</b>	<b>82</b>
1.1.1. Le projet Galerne	82
1.1.2. Le transport des gaz liquéfiés	82
1.1.3. Les produits évaporants	82
<b>1.2.Objectif</b>	<b>83</b>
<b>1.3.La liquéfaction des gaz</b>	<b>83</b>
<b>1.4.Définition et classement des gaz liquéfiés</b>	<b>84</b>
1.4.1. Définition : les gaz liquéfiés	84
1.4.2. Classement	84
1.4.3. Risques	84
<b>1.5.La réglementation</b>	<b>86</b>
<b>1.6.Quelques gaz liquéfiés</b>	<b>86</b>
1.6.1. LE GNL	87
1.6.2. LE GPL	88
1.6.3. LE PROPANE	88
1.6.4. LES BUTANES	89
1.6.5. L'AMMONIAC	89
1.6.6. LE CHLORURE DE VINYLE	89
1.6.7. L'ETHYLENE	90
1.6.8. LE PROPYLENE	90
<b>2.LE TRANSPORT DE GAZ LIQUEFIES PAR VOIE MARITIME</b>	<b>91</b>
<b>2.1.Navires transporteurs de gaz et navires citernes</b>	<b>91</b>
2.1.1. Introduction	91
2.1.2. Les citernes	92
2.1.3. L'atmosphère des citernes	93
2.1.4. Les gaz d'évaporation	94
2.1.5. Pompes et compresseurs	94
2.1.6. Tuyauteries de cargaison	95
<b>2.2.Les différents systèmes de confinement de la cargaison</b>	<b>96</b>
2.2.1. Systèmes de confinement	96
2.2.2. La barrière secondaire	96
2.2.3. Les citernes indépendantes type A	97
2.2.4. Les citernes indépendantes type B	99
2.2.5. Les citernes indépendantes type C	100
2.2.6. Les systèmes à membranes	101
2.2.7. Le contrôle de la pression dans les citernes	104
<b>3.PRINCIPES DE SEGREGATION - RESISTANCE A LA COLLISION ET A L'ECHOUEMENT</b>	<b>105</b>
<b>3.1.Introduction</b>	<b>105</b>
<b>3.2.Les types de navires</b>	<b>105</b>

<b>3.3.Règles de conception</b>	<b>106</b>
3.3.1. Ségrégation de la tranche cargaison avec les autres locaux	106
3.3.2. Double fonds et double coque	106
3.3.3. Systèmes de tuyauterie	107
3.3.4. Systèmes de ventilation	107
3.3.5. Emplacement des citernes	108
<b>3.4.Zone d'avarie et étendue de l'avarie</b>	<b>109</b>
3.4.1.Dimensions de l'avarie conventionnelle	109
3.4.2.Zone d'avarie	110
<b>3.5.Critères de survie</b>	<b>112</b>
3.5.1. A un stade quelconque d'envahissement	112
3.5.2. Au stade final d'envahissement	112
<b>3.6.Organisation en cas d'urgence</b>	<b>113</b>
<b>4.LA SECURITE A BORD DES TRANSPORTEURS DE GAZ</b>	<b>113</b>
4.1. Les zones dangereuses	113
4.2. Les soupapes de sécurité	114
4.3. Le système de détection de gaz	114
4.4. Les systèmes de lutte contre l'incendie	115
4.5. Le système d'arrêt d'urgence	116
4.6. L'accès à l'avant du navire	116
4.7. Le rejet de la cargaison à la mer	117
<b>5.REFERENCES</b>	<b>118</b>



# 1. GENERALITES

## 1.1. Gaz liquéfiés et produits évaporants

### 1.1.1. Le projet Galerne

Le projet GALERNE est un projet de recherche relatif aux comportements des liquides évaporants et gaz transportés à l'état liquide, en cas d'épandage ou de fuite accidentels et aux risques des nuisances environnementales et humaines.

Si les deux types de produits cités peuvent avoir un comportement relativement similaire, par la quantité importante de vapeurs libérées dans l'atmosphère, ils diffèrent par certaines caractéristiques physiques, par les types de navires permettant leur transport et par la réglementation applicable à ces navires.

Les navires transporteurs de gaz sont destinés au transport des gaz liquéfiés alors que les autres produits évaporants pris en compte dans le projet Galerne sont transportés dans des navires chimiques.

La famille des navires transporteurs de gaz peut elle-même être divisée en deux types suffisamment différents pour justifier qu'ils soient décrits dans deux parties séparées.

Les 3 premières parties de cette note traitent des navires transporteurs de gaz ; la première partie donne les définitions applicables à tout navire, quel que soit le gaz transporté, la seconde concerne exclusivement les navires méthaniers et la troisième traite des autres transporteurs de gaz.

Les navires chimiques, dans lesquels sont transportés les liquides évaporants retenus dans le cadre du projet, sont quant à eux décrits dans la quatrième partie.

### 1.1.2. Le transport des gaz liquéfiés

Un navire transporteur de gaz est défini par la convention SOLAS (Safety of Life At Sea) comme étant un navire de charge construit ou adapté et utilisé pour transporter en vrac des gaz liquéfiés ou d'autres produits énumérés au chapitre 19 du Recueil International de règles relatives à la construction et à l'équipement des navires transportant des gaz liquéfiés en vrac.

La dernière édition de ce recueil est communément appelée « Code IGC » [référence (1)]

### 1.1.3 Les produits évaporants

La liste des produits évaporants retenus dans le cadre du projet Galerne est limitée à quelques produits seulement : benzène et xylènes.

Ces produits figurent dans le tableau du chapitre 17 du code IBC [référence (2)]

## 1.2. Objectif

La première partie de cette note a pour objectif de décrire les principes généraux de conception et construction des navires destinés au transport en vrac des gaz liquéfiés, et plus précisément à celui des produits listés dans la table 19-2 du Code IGC.

Les réservoirs dans lesquels le produit est stocké font partie intégrante du navire ; les modes de transport dans des réservoirs indépendants embarqués à bord des navires, tels que les conteneurs ou les citernes routières, ne sont pas traités ici.

Ce document s'adresse en priorité aux personnes qui seraient amenées à intervenir à bord ou à diriger l'intervention à bord d'une équipe d'assistance en cas d'accident ou de difficulté. Il ne décrit pas de façon exhaustive tous les équipements ni tous les arrangements des navires, mais se limite aux informations nécessaires ou utiles dans le cadre d'une telle intervention.

Le transport des gaz liquéfiés fait l'objet de nombreuses publications en langue anglaise. Le vocabulaire associé à cette technologie pouvant être spécifique, il a été jugé utile d'indiquer la traduction en anglais de certains termes dans la suite de la note.

## 1.3. La liquéfaction des gaz

Le transport de produits gazeux sur de longues distances, entre le site de production et le site d'utilisation, ne peut pas toujours se faire sous forme gazeuse dans des tuyauteries.

La traversée de mers ou d'océan, la présence de régions difficiles d'accès, que ce soit pour des raisons géographiques, sismiques ou politiques, ou des stratégies commerciales peuvent amener à transporter les gaz dans des véhicules terrestres ou dans des navires.

Plusieurs procédés permettent de réduire le volume du produit pour permettre son transport : les gaz peuvent être comprimés, liquéfiés ou combinés chimiquement avec d'autres produits pour former des composés plus facilement manipulables et transportables (hydrates par exemple).

Le transport en vrac et par voie maritime des produits gazeux s'effectue principalement en employant la liquéfaction, qui permet d'atteindre des facteurs de plusieurs centaines entre les volumes du gaz dans les conditions normales de température et de pression et dans les conditions de transport.

La liquéfaction peut être obtenue en réfrigérant le produit, en le comprimant, ou en combinant ces deux méthodes. On peut donc transporter les gaz liquéfiés dans des citernes uniquement réfrigérées (« Fully refrigerated ») ou pressurisées (« fully pressurised »), ou dans des citernes semi-pressurisées, à une pression intermédiaire (« semi-pressurised »). On parle aussi de citernes semi-réfrigérées (« semi-refrigerated »).

Les propriétés physiques du gaz et les quantités transportées sont les facteurs influents dans le choix des conditions de température et de pression de la cargaison.

## 1.4. Définition et classement des gaz liquéfiés

### 1.4.1. Définition : les gaz liquéfiés

Le Code IGC définit les gaz liquéfiés de la façon suivante :

« Liquide dont la tension de vapeur (pression absolue d'équilibre de la vapeur saturée au dessus du liquide à une température spécifiée) est supérieure à 2,8 bar absolu à 37,8°C »

36 produits figurent dans la liste complète des produits dont le transport par voie maritime requiert la conformité du navire au Code IGC. Cette liste est rappelée en appendice (voir annexe 2).

### 1.4.2. Classement

Les gaz liquéfiés peuvent être répartis dans plusieurs catégories :

- les hydrocarbures saturés : méthane ( $\text{CH}_4$ ), propane ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butane ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )... (formule chimique générale :  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  ; formule simplifiée :  $\text{C}_n$ )
- les hydrocarbures insaturés : éthylène ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), butylène ( $\text{C}_4\text{H}_8$ ), propylène ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ) ...
- les gaz chimiques (base hydrocarbure avec un ou plusieurs atomes additionnels) : chlorure de vinyle ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ), oxyde de propylène ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{-O}$ ) qui est un produit dont le transport nécessite également l'application des règles du code IBC [référence (2)]. l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) est aussi considéré comme un gaz chimique
- d'autre produits : l'azote ( $\text{N}_2$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), les gaz réfrigérants (R12, R22...)

### 1.4.3. Risques

Les risques liés au transport par voie maritime de gaz liquéfiés sont dus à leurs propriétés physiques et chimiques d'une part, et au fait que ce transport met en jeu de grandes quantités de produit d'autre part.

#### Propriétés physiques :

Certains gaz sont inflammables, d'autres sont toxiques, ou toxiques et inflammables, et certains sont transportés à des températures très basses ou sous pression.

Les hydrocarbures sont en général inflammables et non toxiques alors que les produits les plus toxiques appartiennent souvent à la famille des gaz chimiques.

#### Propriétés chimiques :

D'une façon générale, les gaz chimiques sont plus corrosifs ou réactifs chimiquement que les hydrocarbures insaturés, eux-mêmes plus réactifs chimiquement que les hydrocarbures saturés.

#### Quantités de produit transporté :

Une caractéristique des gaz liquéfiés, par rapport aux autres produits évaporants, est la grande quantité de vapeurs produite pour une même quantité de liquide.

Ce qui fait l'intérêt de la liquéfaction devient pénalisant quand une situation anormale ou d'urgence entraîne la vaporisation d'un volume important de liquide.

Le ratio volume à l'état gazeux/volume à l'état liquide peut atteindre 600 (cas du méthane).

Ces différents aspects couvrent l'essentiel des risques technologiques ou sanitaires associés à leur transport, en ajoutant les risques liés au fait que tout gaz présent en grande quantité dans un espace de taille limitée modifie sensiblement le pourcentage d'oxygène dans l'atmosphère, pouvant être à l'origine d'asphyxie par manque d'oxygène (phénomène d'anoxie).

## 1.5. La réglementation

Le transport par navire des gaz liquéfiés en vrac est essentiellement régi par le Code IGC, publié par l'Organisation Maritime Internationale, et complété par les règles des sociétés de classification.

Le Code IGC, dont la première édition remonte à 1983, s'applique à tous les navires destinés au transport en vrac de gaz liquéfiés (voir définition en 1.1.2), quelle que soit leur taille, et engagés dans des voyages internationaux.

Toutefois, les navires les plus anciens, ceux dont la quille a été posée avant le 1er juillet 1986, sont tenus de respecter d'autres réglementations. La table de l'annexe 1 donne les références des textes applicables en fonction de la date de construction du navire.

Les risques pris en compte pour établir la réglementation applicable aux navires destinés à leur transport sous forme liquéfiée sont:

- l'inflammabilité
- la toxicité
- la possibilité de réaction en cas de contact avec d'autres produits chimiques
- la pression de stockage
- les risques liés à la manipulation de fluides cryogéniques.

Les domaines dans lesquels la réglementation intervient pour prendre en compte les risques spécifiques présentés par chaque produit sont :

- la vulnérabilité des systèmes de confinement, plus particulièrement du point de vue de la collision et la stabilité du navire après avarie (voir § 3 de cette note)
- le type de système de confinement ou la quantité maximale de stockage
- le choix des matériaux utilisés pour la construction des citernes, des réseaux de tuyauterie ou des équipements
- les contrôles effectués en cours de construction
- les dispositifs de surveillance (détection de gaz toxiques par exemple)
- etc...

La quantité de produit transporté est prise en compte indirectement par la réglementation qui est légèrement moins exigeante pour les navires ou les citernes de petites dimensions (voir § 3.2).

## 1.6. Quelques gaz liquéfiés

Le but de ce paragraphe est d'une part de rappeler les définitions des deux sigles fréquemment utilisés dans le domaine du transport des gaz liquéfiés : GNL et GPL, et d'autre part, en donnant les caractéristiques des produits concernés par le projet GALERNE, de montrer la diversité de ces caractéristiques. [Source : ICS ; voir Référence (3)]

La liste des principales caractéristiques qui sont rappelées pour chaque produit n'est pas exhaustive et ces données doivent être utilisées à titre d'information uniquement. La notion de toxicité en particulier est à prendre avec des réserves, compte tenu des différentes réglementations pouvant s'appliquer.

Il est nécessaire de se référer aux fiches de sécurité publiées pour chaque gaz, dans lesquelles on trouve l'ensemble des caractéristiques des gaz ainsi que les recommandations pour leur manipulation.

### 1.6.1. LE GNL

Le terme « Gaz Naturel » désigne un mélange de gaz dans des proportions qui varient avec le site de production, et dont la principale composante est le méthane (CH<sub>4</sub>).

D'autres hydrocarbures plus lourds sont présents en quantités moindres.

Le Gaz Naturel Liquéfié (« Liquefied Natural Gas » ou LNG) est sa forme liquide.

Aucune séparation n'est faite au cours du processus de liquéfaction, à l'exception de l'élimination de l'eau et du CO<sub>2</sub> qui pourraient éventuellement être présents après extraction.

Il y a donc autant de compositions de GNL différentes que de sites de production.

	ORIGINE			
	ALASKA	ALGERIE	NIGERIA	QATAR
Méthane	99.5 %	87.6 %	91.6 %	89.9 %
Ethane	0.1 %	9 %	4.6 %	6 %
Propane		2.2 %	2.4 %	2.2 %
Butane		0.6 %	1.3 %	1.5 %
Azote	0.4 %	0.6 %	0.1 %	0.4 %

Table (1) : composition chimique de quelques gaz naturels  
source : Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié

Les méthaniers sont les navires conçus et construits pour transporter du GNL. Ils ne sont utilisés en pratique que pour le transport du GNL, les autres gaz liquéfiés étant transportés dans d'autres types de transporteurs de gaz.

Principales caractéristiques du GNL :

vapeurs inflammables (entre 5% et 15% de méthane dans l'air)

température d'auto inflammation : 580 °C dans l'air

les vapeurs sont plus légères que l'air quand elles sont chaudes (supérieures à -100 °C)

incolore, quasiment inodore, non toxique

risque d'anoxie (asphyxie par manque d'oxygène)

risque de brûlure cryogénique (-161 °C à la pression atmosphérique)

pas de réaction chimique avec l'air, l'eau, l'eau salée ; l'eau peut cependant geler ou former des hydrates

Des informations plus détaillées sont données dans la seconde partie de ce document, qui est dédiée aux navires méthaniers.

### 1.6.2. LE GPL

Le Gaz de Pétrole Liquéfié (« Liquefied Petroleum Gas », ou LPG) désigne à la base les mélanges de propane et de butane, dans des proportions qui vont de 0 à 100% de chaque produit.

Cette définition sera respectée dans la suite du document, bien que le terme GPL soit fréquemment utilisé d'une façon incorrecte pour désigner tous les gaz liquéfiés autres que le GNL. (La polyvalence des navires et le fait que les cargaisons de propane ou butane représentent un volume important du trafic des gaz liquéfiés peuvent être à l'origine de cet abus de langage).

Les propriétés physiques et les conditions de transport du GPL dépendent de la composition chimique du mélange.

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (limites d'inflammabilité fonction de la composition)

incolore, quasiment inodore, non toxique

risque d'anoxie

risque de brûlure cryogénique

pas de réaction chimique avec l'air, l'eau, l'eau salée ; l'eau peut cependant geler ou former des hydrates

### 1.6.3. LE PROPANE

Hydrocarbure saturé de formule chimique :  $C_3H_8$

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (entre 2% et 10% de propane dans l'air)

température d'auto inflammation : 480 °C dans l'air

incolore, inodore, non toxique

risque d'anoxie

risque de brûlure cryogénique (-42 °C à la pression atmosphérique)

pas de réaction chimique avec l'air, l'eau, l'eau salée ; l'eau peut cependant geler ou former des hydrates ; insoluble dans l'eau.

#### 1.6.4. LES BUTANES

Hydrocarbures saturés de formule chimique :  $C_4H_{10}$

Le n-butane ( $CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$ ) et l' iso-butane ( $CH_3-CH(CH_3)-CH_3$ ) diffèrent sensiblement par leur température d'ébullition à la pression atmosphérique :

n-butane :  $-0.5^\circ C$

iso-butane :  $-12^\circ C$

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (entre 1.5% et 9% de butane dans l'air)

température d'auto inflammation :  $420^\circ C$  dans l'air

incolore, quasiment inodore, non toxique

risque d'anoxie

faibles risques de brûlure cryogénique

pas de réaction chimique avec l'air, l'eau, l'eau salée ; l'eau peut cependant geler ou former des hydrates ; insoluble dans l'eau.

#### 1.6.5. L'AMMONIAC

L'ammoniac (« ammonia ») est un gaz chimique dont la formule est :  $NH_3$

Principales caractéristiques

vapeurs inflammables (entre 15% et 30% d'ammoniac dans l'air)

les vapeurs sont plus légères que l'air

incolore, odeur douceâtre et suffocante

toxique

risque d'anoxie

risque de brûlure cryogénique ( $-33^\circ C$  à la pression atmosphérique)

risque de brûlure chimique

très soluble dans l'eau (réaction exothermique), pas de réaction chimique avec l'air.

#### 1.6.6. LE CHLORURE DE VINYLE

Le chlorure de vinyle ou monochloroéthylène (« Vinyl Chloride ») est un gaz chimique (hydrocarbure halogéné) dont la formule est  $C_2H_3Cl$ .

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (entre 4% et 21.7% de chlorure de vinyle dans l'air)

toxique



incolore, odeur douce et agréable, toxique

risque d'anoxie

température d'ébullition à la pression atmosphérique : -14 °C

pas de réaction chimique avec l'eau, mais peut polymériser en présence d'oxygène, de chaleur et de lumière.

### 1.6.7. L'ETHYLENE

Hydrocarbure insaturé de formule chimique :  $C_2H_4$

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (entre 2.5% et 34% d'éthylène dans l'air)

température d'auto inflammation : 520 °C dans l'air

incolore, odeur douceâtre, non toxique

risque d'anoxie

risque de brûlure cryogénique (-104 °C à la pression atmosphérique)

pas de réaction chimique avec l'air, l'eau, l'eau salée ; l'eau peut cependant geler ou former des hydrates ; insoluble dans l'eau.

L'éthylène est transporté dans des navires spécifiquement conçus du fait de la faible température d'ébullition.

### 1.6.8. LE PROPYLENE

Le propylène (« propylene ») est un hydrocarbure non saturé de formule chimique :  $C_3H_6$ .

Principales caractéristiques :

vapeurs inflammables (entre 2% et 12% de propylène dans l'air)

température d'auto inflammation : 455 °C dans l'air

non toxique

incolore, odeur faible

risque d'anoxie

risque de brûlure cryogénique (-47 °C à la pression atmosphérique)

pas de réaction chimique avec l'air ou l'eau

## 2. LE TRANSPORT DE GAZ LIQUEFIÉS PAR VOIE MARITIME

### 2.1. Navires transporteurs de gaz et navires citernes

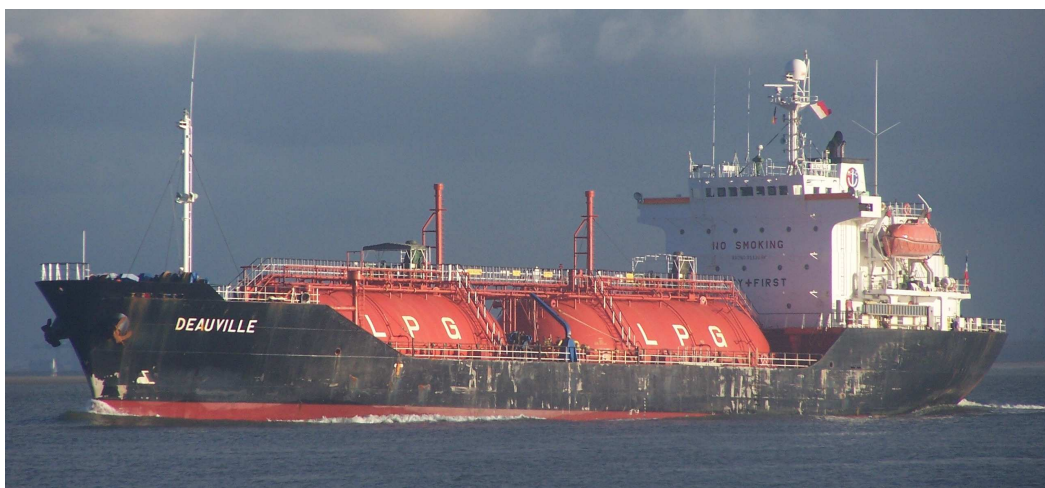
#### 2.1.1. Introduction

L'architecture générale d'un navire transporteur de gaz est semblable à celle d'un navire citerne conventionnel (pétrolier), dont il est dérivé : les machines et les locaux d'habitation sont normalement situés à l'arrière de la zone (tranche cargaison) où sont installées les citernes de cargaison.

[voir référence R-1]

Toutefois, la nécessité de transporter la cargaison sous forme réfrigérée ou pressurisée, ou en combinant réfrigération et pressurisation, rend le système de confinement de la cargaison et son intégration dans la coque très différents de ceux d'un navire citerne destinés au transport en vrac des autres produits liquides.

On reconnaît assez facilement les navires transportant des gaz liquéfiés sous forme pressurisée ou semi-pressurisée car les citernes sous pression, cylindriques, sphériques ou bi-lobées, sont souvent visibles depuis l'extérieur.



Navire transporteur de gaz équipé de citernes pressurisées

Les navires réfrigérés ressemblent davantage aux navires citernes conventionnels, toutefois un transporteur de gaz se distinguera d'un pétrolier par son franc-bord plus important, conséquence de la faible densité des gaz liquéfiés par rapport à celle des produits pétroliers.



Navire transporteur de gaz réfrigéré

La même réglementation de base s'applique à un transporteur de gaz et à un pétrolier du point de vue, par exemple, de :

- la protection incendie [Référence R-2]
- la conception de l'appareil à gouverner [Référence R-3]
- les dispositifs de remorquage d'urgence [Référence R-4]

Le système de confinement de la cargaison et son intégration dans le navire constituent toutefois une différence importante entre un navire citerne conventionnel et un transporteur de gaz.

Les paragraphes 2.1.2 à 2.1.5 ci-après décrivent quelques arrangements spécifiques aux transporteurs de gaz, par lesquels ils diffèrent sensiblement des pétroliers.

Les systèmes de confinement de la cargaison les plus fréquemment employés sont décrits dans le paragraphe 2.2.

### 2.1.2. Les citernes

Le transport de gaz liquéfiés sous forme réfrigérée impose de limiter le plus possible le nombre de citernes du navire, de façon à limiter le ratio surface d'échange / volume de cargaison et donc l'apport d'énergie qui favorise l'évaporation.

Un navire méthanier moderne peut ainsi être équipé de citernes d'une capacité unitaire de 45 000 m<sup>3</sup>.

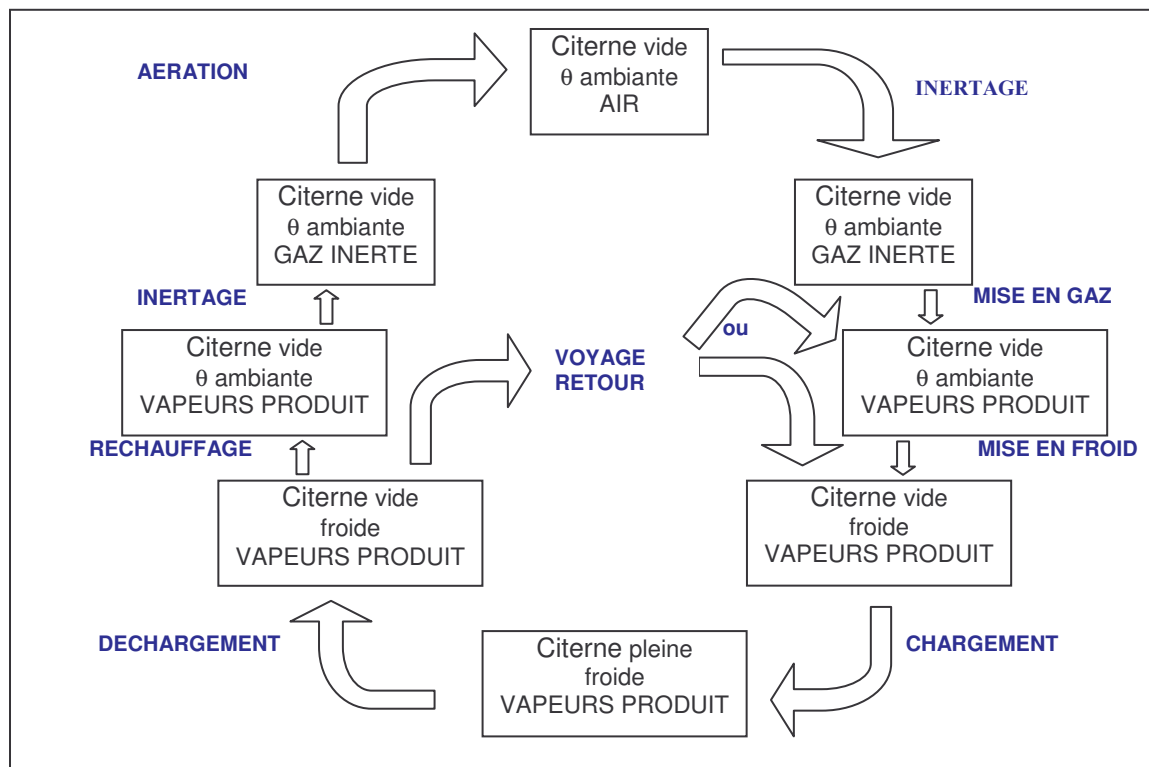
La contraction due à la mise en froid interdit de mettre des cloisons ajourées (cloisons « anti swash ») et rend le phénomène de mouvements de liquide particulièrement sensible sur ce type de navires. Des études sophistiquées sont faites pour vérifier à la fois la résistance de l'isolation, quand elle est à l'intérieur de la structure de la citerne, et la résistance aux impacts transmis à la structure du navire.

### 2.1.3. L'atmosphère des citernes

Pour la plupart d'entre eux, les gaz liquéfiés sont des produits inflammables.

Pour prévenir la formation de mélanges avec l'oxygène de l'air, qui pourraient être inflammables, l'atmosphère des citernes des transporteurs de gaz est constituée uniquement d'air, de gaz inerte, de vapeurs du produit transporté, ou d'un mélange air/gaz inerte ou gaz inerte/vapeurs du produit.

Des opérations de remplacement de l'atmosphère des citernes avec un gaz inerte sont prévues avant le chargement initial d'une cargaison, ou après déchargement, quand il est nécessaire de les dégazer. L'atmosphère d'une citerne est renouvelée suivant les cycles suivants (pouvant être un peu plus complexe en cas de changement du produit) :



Lorsque les navires sont chargés, les citernes contiennent toujours un mélange liquide/vapeurs du produit transporté.

Pendant le voyage de retour des navires qui ne changent pas de type de produit (par exemple les méthaniers), les citernes sont en général pleines de produit en phase gazeuse avec un talon de liquide éventuel, qui permet de maintenir la citerne en froid, sauf si une opération de maintenance est prévue.

Dans les cas où un changement de cargaison est prévu dans une citerne, celle-ci peut se trouver en phase d'inertage avec un mélange vapeurs de produit / gaz inerte.

Les citernes réfrigérées sont maintenues en légère surpression (quelques dizaines de millibars) par rapport à la pression atmosphérique, pour éviter toute entrée d'air.

#### 2.1.4. Les gaz d'évaporation

Les gaz liquéfiés transportés sous forme réfrigérée ou semi-réfrigérée s'évaporent toujours plus ou moins quelle que soit l'efficacité de l'isolation et la température de transport.

Les gaz d'évaporation (« boil-off gas ») doivent être contrôlés et gérés pour limiter l'accroissement de la pression dans la citerne et rester dans les limites de conception du système de stockage. [Référence R-5]

Les différents moyens permettant cette gestion des gaz d'évaporation et le contrôle de la pression dans les citernes sont :

- l'utilisation des gaz d'évaporation dans les machines du navire pour ses besoins propres (propulsion, production d'énergie électrique) : les chaudières à vapeur ou les moteurs « dual fuel » peuvent utiliser indifféremment le combustible liquide (gazole) ou les gaz d'évaporation provenant des citernes. Cette utilisation n'est toutefois permise par le Code IGC que pour les vapeurs de GNL.

La température d'ébullition à la pression atmosphérique de chaque constituant du GNL étant variable, la composition chimique des gaz d'évaporation est différente de celle du GNL qui est dans les citernes : on peut obtenir jusqu'à 30% en volume d'azote juste après le chargement, cette fraction d'azote diminuant progressivement, et très peu d'hydrocarbures autres que le méthane.

- la re-liquéfaction des vapeurs produites par l'évaporation. Ce moyen est appliqué principalement sur les navires qui ne sont pas autorisés à brûler les vapeurs de cargaison dans les machines. Toutefois, des installations de re-liquéfaction peuvent être installées quelle que soit la nature du produit, y compris le GNL.

- la combustion perdue des vapeurs soit dans des chaudières à vapeur (avec condensation forcée), soit dans des incinérateurs de gaz (« gas combustion unit ») spécifiquement conçus à cet usage et qui permettent de brûler le gaz même lorsque les besoins en énergie du navire sont faibles.

- le rejet des vapeurs à l'atmosphère par les mâts de dégazage. Le rejet direct est soumis à des interdictions locales qui imposent, d'un point de vue pratique, à tout navire d'être équipé d'un autre moyen de gestion des gaz d'évaporation. Le dégazage par les mâts n'est pratiqué que dans les situations suivantes :

- phase de renouvellement d'atmosphère des citernes avec un ratio gaz/gaz inerte insuffisant pour permettre la combustion ou la re-liquéfaction
- situation d'urgence ou d'avarie empêchant l'utilisation des systèmes de gestion normaux et pouvant amener un risque de surpression dans les citernes. A cet effet, les soupapes de sûreté qui protègent les citernes sont reliées directement aux mâts de dégazage.

- le dernier moyen de gestion des gaz d'évaporation est sa conservation dans la citerne, si celle-ci est du type réservoir sous pression. La pression et la température dans la citerne dépendent de la température extérieure.

#### 2.1.5. Pompes et compresseurs

La réglementation applicable aux navires transporteurs de gaz interdit l'installation d'une chambre des pompes ou des compresseurs sous le pont principal. [Référence R-6]

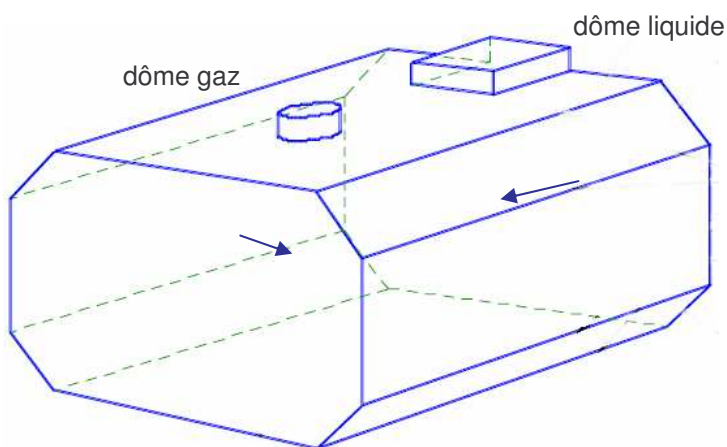
Les pompes sont donc du type immergé et les transferts de vapeurs sont effectués par des compresseurs qui sont installés dans un local généralement fermé, situé sur le pont principal.

Les moteurs électriques qui entraînent les compresseurs se trouvent dans un local adjacent au local des compresseurs. Des précautions sont prises afin de prévenir l'entrée de gaz inflammables dans le local des moteurs électriques (ventilation, sas d'entrée muni de portes étanches aux gaz, cloison étanche aux gaz entre les deux espaces) ce qui permet de n'avoir aucune exigence particulière du point de vue de la certification de sécurité des moteurs électriques.

### 2.1.6. Tuyauteries de cargaison

La réglementation applicable aux navires transporteurs de gaz impose également que le réseau de tuyauteries de cargaison soit entièrement situé sur le pont, ne le traversant que pour accéder aux citernes par leur sommet. [Référence R-7]

Les tuyaux destinés au transfert du liquide passent par le « dôme liquide » et ceux qui servent au passage des vapeurs passent par le « dôme gaz ». En fonction du type de système de confinement et des dimensions de la citerne, ces deux ouvertures, dôme liquide et dôme gaz, peuvent être séparées ou réunies :



Dôme gaz et dôme liquide distincts  
(ex : citerne de méthanier à membranes)



un seul dôme pour les tuyauteries gaz et liquide  
(ex : citerne pressurisée - L35m Ø12.4m)

D'autres règles relatives aux réseaux de tuyauterie, et en particulier à la ségrégation des différents réseaux, sont détaillées dans le paragraphe 3.3.4 de cette note.



## 2.2. Les différents systèmes de confinement de la cargaison

### 2.2.1. Systèmes de confinement

Le système de confinement de la cargaison d'un transporteur de gaz comporte :

- une barrière primaire, qui délimite l'espace dans lequel le gaz liquéfié doit être stocké et qui doit le contenir sans limitation de durée,
- éventuellement une barrière secondaire, qui doit assurer le confinement de la cargaison en cas d'endommagement de la barrière primaire,
- l'isolation thermique associée,
- les supports et structures adjacentes destinés à supporter tous ces éléments.

En plus de sa fonction de contenant, les deux rôles d'un système de confinement sont :

- limiter l'apport de chaleur à la cargaison pour que celle-ci s'évapore le moins possible. Ce rôle est assuré par l'isolation.
- empêcher la cargaison liquide d'entrer en contact avec la structure du navire pour que la température des éléments qui composent cette structure n'atteigne pas une valeur basse au-delà de laquelle les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé ne sont plus sûres. Ce rôle est assuré par les barrières primaire et secondaire.

Quatre types de systèmes de confinement de la cargaison sont utilisés principalement dans le transport de gaz liquéfiés par voie maritime. Ils sont décrits dans les paragraphes 2.2.3 à 2.2.6.

Trois d'entre eux sont « indépendants » : les citernes sont autoporteuses, ne font pas partie de la structure résistante du navire et ne participent pas à la résistance de la coque du navire. Elles font cependant bien partie intégrante du navire (par opposition à des citernes embarquées, que ce soient des camions ou des conteneurs).

### 2.2.2. La barrière secondaire

Quand elle est installée, la barrière secondaire est la partie étanche au liquide située le plus à l'extérieur du système de confinement de la cargaison

La barrière secondaire n'est pas en contact avec le liquide en situation normale ; elle ne le devient que si la barrière primaire est endommagée.

Il s'agit d'un système de secours dont le but est d'une part de conserver la cargaison en cas d'avarie, d'autre part d'éviter que le liquide entre en contact avec la structure du navire et risque de l'endommager en la refroidissant de manière excessive.

Elle est destinée à contenir temporairement toute fuite de liquide de la barrière primaire et la réglementation n'exige pas que son étanchéité au liquide soit démontrée pour une durée supérieure à 15 jours. [Référence R-8]

L'obligation d'installer une barrière secondaire complète ou partielle dépend de la température de transport et du type de la citerne dans laquelle le gaz liquéfié est stocké. [Référence R-9]

Sous certaines conditions, la coque du navire peut faire office de barrière secondaire.

Dans le cas des citernes indépendantes de type B (voir §2.2.4 ci-après), une barrière secondaire partielle est suffisante. Ses dimensions sont liées à la capacité du système à vaporiser dans un délai suffisamment rapide le gaz liquéfié susceptible de s'échapper de la citerne en cas de défaillance.

### 2.2.3. Les citernes indépendantes type A

Les citernes type A ont des surfaces planes et leur forme prismatique présente l'avantage d'optimiser l'utilisation des formes du navire.

Elles sont autoporteuses et sont construites en acier basse température de façon à pouvoir être refroidies à  $-55^{\circ}\text{C}$ .

La conception des citernes type A est basée sur l'utilisation des règles et des procédures des sociétés de classification. Les niveaux de contrainte ne sont pas déterminés de façon précise.

En conséquence, une barrière secondaire complète est exigée pour les citernes de type A sauf quand la température minimum de service est supérieure à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $-55^{\circ}\text{C}$ , la coque du navire peut faire office de barrière secondaire si l'acier avec lequel elle est construite est capable de supporter les basses températures.

Une barrière secondaire complète et différente de la structure du navire est imposée par la réglementation lorsque la température de transport est inférieure à  $-55^{\circ}\text{C}$ . [Référence R-10]

D'un point de vue pratique, cette règle interdit l'utilisation de citernes de type A pour le GNL, puisque les moyens de calculs actuels permettent la conception de citernes de type B pour lesquelles les exigences sont moins sévères. Quelques rares méthaniers équipés de citernes de type A ont toutefois été construits au début des années 1970.

L'espace situé entre la barrière secondaire et la citerne de type A doit être maintenue sous atmosphère inerte quand le produit est inflammable.

Des cloisons transversales et une cloison longitudinale limitent les effets des mouvements de liquide à l'intérieur de chaque citerne (impact du liquide sur la citerne, stabilité du navire).

Des cales et des clés assurent la liaison de citernes avec la structure du navire et des cales « anti-flottaison » retiennent les citernes dans le sens vertical en cas d'invasion de l'espace de cale.

La pression de conception maximum de ce type de citernes est  $0,7 \text{ bar}_{\text{rel}}$ , et la cargaison est donc transportée à l'état réfrigéré et à une pression égale ou proche de la pression atmosphérique, en général, en dessous de  $0,25 \text{ bar}_{\text{rel}}$ .

Les navires équipés de citernes type A peuvent transporter de grandes quantités de gaz liquéfié, pouvant atteindre  $100\,000 \text{ m}^3$ ; Ils sont typiquement utilisés pour le transport de propane, butane et ammoniac.

Une installation de re-liquéfaction est nécessaire pour permettre le contrôle de la pression dans les citernes.



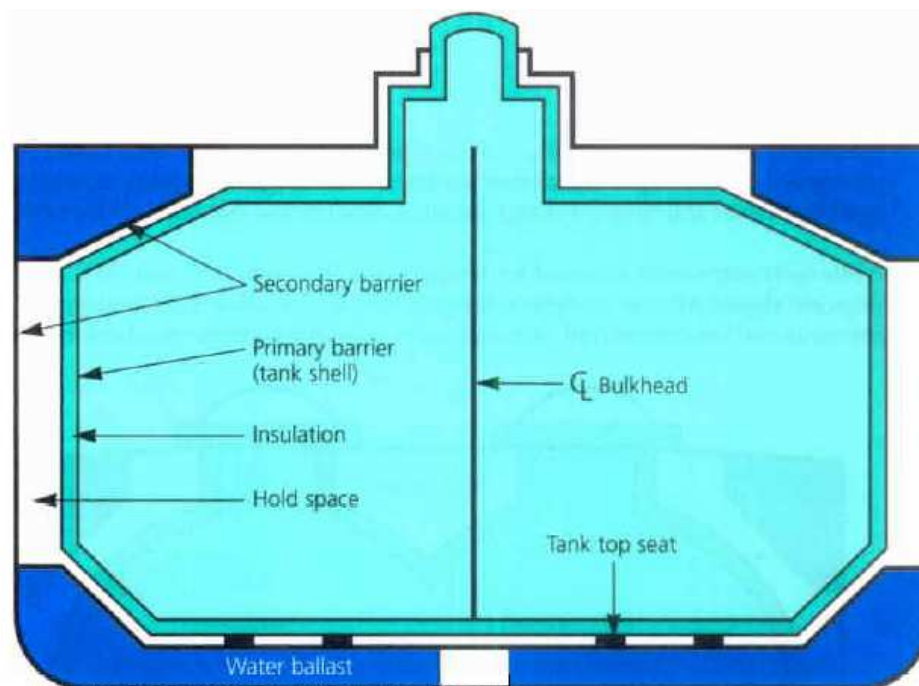


Schéma de principe de l'intégration d'une citerne type A dans un navire



Citerne de type A - cloison transversale

## 2.2.4. Les citernes indépendantes type B

Les citernes de type B peuvent être prismatiques, comme les citernes de type A, ou, d'une façon plus fréquente, sphériques.

La principale différence avec des citernes de type A se situe dans la façon dont les citernes de type B sont calculées : l'utilisation d'outils d'analyse sophistiqués et la réalisation d'essais permettant de déterminer de façon très précise les niveaux de contrainte et les probabilités de propagation de fissures, en incluant des études de fatigue, sont en effet la base de la conception de citernes de type B.

La réalisation de ces analyses et le respect des critères du Code IGC [Référence R-11] permettent de diminuer, par rapport aux citernes de type A, les exigences réglementaires du point de vue de la barrière secondaire et justifie la mise en place d'une barrière secondaire partielle (voir §2.2.2 ci-dessus).

La pression maximum de calcul d'une citerne de type B est  $0.7 \text{ bar}_{\text{rel}}$ .

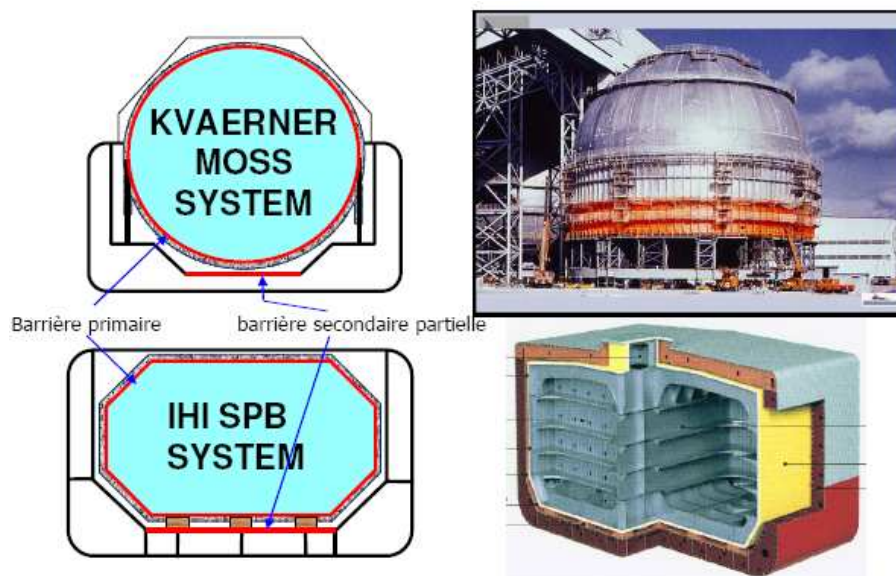
Les citernes de type B sont installées dans une cale dont l'atmosphère est soit normalement inertée, soit apte à être inertée facilement en cas de détection de gaz.

Le gaz inerte ou l'air doit être suffisamment sec pour éviter la condensation et/ou le givrage de l'humidité, qui pourrait être à l'origine d'avaries (par exemple la dégradation des performances de l'isolation thermique, qui est fixée à l'extérieur de la citerne).

Les citernes de type B à forme sphérique, qui dépassent largement au dessus du pont principal, sont protégées par un dôme en acier, les citernes de type B prismatiques sont situées sous le pont principal.

Les citernes indépendantes de type B sont pratiquement exclusivement utilisées pour le transport du GNL (Voir partie 2, §2.2.2 et § 2.2.3).

A l'heure actuelle, les chantiers navals sont capables de construire des sphères de l'ordre de 43 mètres de diamètre, et des navires d'une capacité de  $153\,000 \text{ m}^3$ .



Citernes de type B sphérique et prismatique

### 2.2.5. Les citernes indépendantes type C

Ces citernes sont cylindriques (verticales ou horizontales), bi-lobées ou sphériques.

Ce sont fondamentalement des réservoirs sous pression, qui équipent les navires pressurisés ou semi pressurisés ; la pression de calcul doit être supérieure à 2 bar.

Elles peuvent être utilisées pour le transport de l'éthylène si le matériau est adapté, ou de GNL. Ce dernier cas reste encore excessivement rare.

Les citernes de type C sont calculées et construites en suivant des codes conventionnels pour les réservoirs sous pression ; aucune barrière secondaire n'est exigée par la réglementation.

Les citernes sont liées à la structure du navire par des cales et des clés, qui permettent la contraction ou la dilatation tout en prévenant les mouvements de la citerne sous l'effet des charges statiques et dynamiques. Elles sont aussi retenues dans le sens vertical par des cales anti-flottaison.

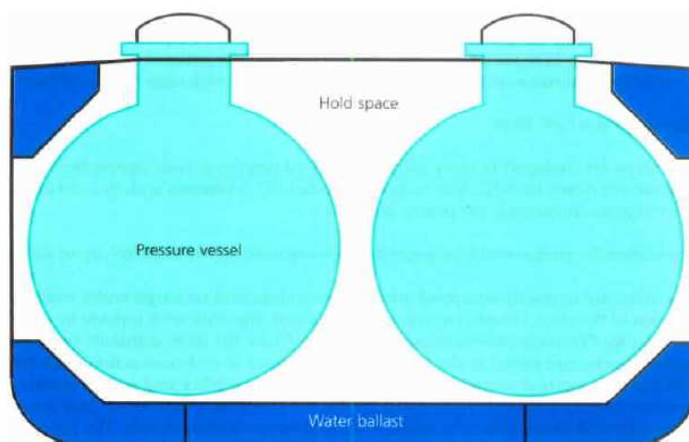
L'espace cargaison doit être sous atmosphère sèche (gaz inerte ou air) pour éviter les phénomènes de condensation d'eau pouvant entraîner de la corrosion ou des avaries liées au gonflement du bois des cales à la suite de l'absorption de l'humidité.

Les pressions maximum de service sont de l'ordre de 5 à 7 bar pour des navires semi pressurisés et peuvent atteindre 18 bar pour les navires pressurisés.

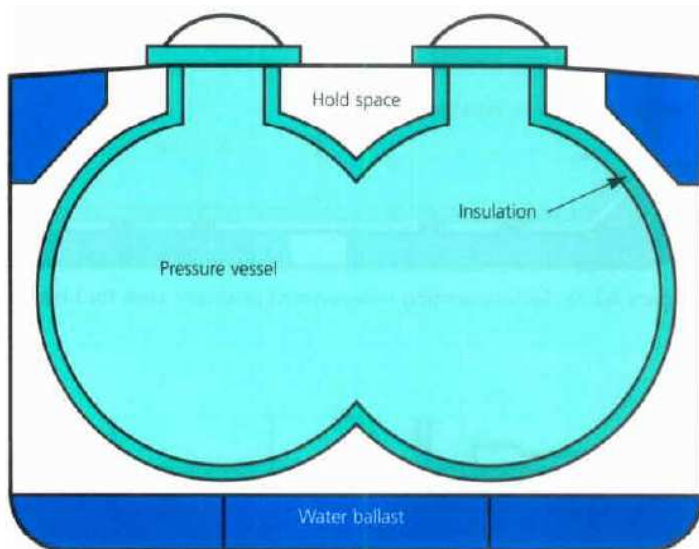
Pression maxi :	18 bar	(navire pressurisé)
	5 à 7 bar	(navire semi pressurisé)

Températures :	- 48 °C	(GPL)
	- 104 °C	(éthylène)
	- 163 °C	(GNL)

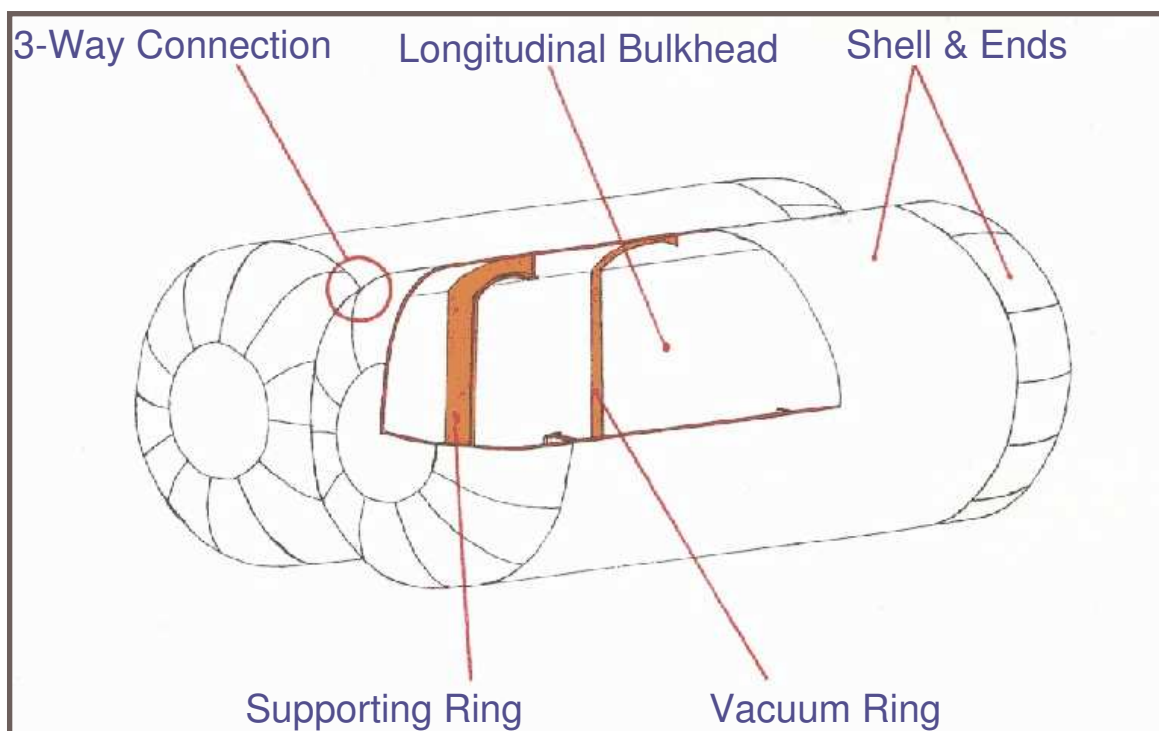
Elles peuvent être munies de cloisons intérieures partielles pour limiter les mouvements de liquide.



Citernes type C cylindriques ou sphériques



Citernes type C bi-lobées



Arrangement typique d'une citerne bi-lobée

### 2.2.6. Les systèmes à membranes

Le principe des systèmes à membranes est basé sur l'installation d'une barrière primaire très fine (entre 0.7 mm et 1.5 mm d'épaisseur en fonction des systèmes), supportée par l'isolation, qui est elle-même fixée sur la double coque du navire.

Une seconde membrane remplit la fonction de barrière secondaire complète. Elle est insérée dans l'isolation, de façon à séparer physiquement les deux barrières et réduire les risques de modes de rupture communs.

Dans tous les systèmes existants actuellement, la membrane primaire est métallique (acier inoxydable ou invar). La barrière secondaire peut être soit du même type que la barrière primaire, soit réalisée à partir d'un matériau composite à base de tissu de verre rendu étanche par l'insertion d'une feuille d'aluminium.

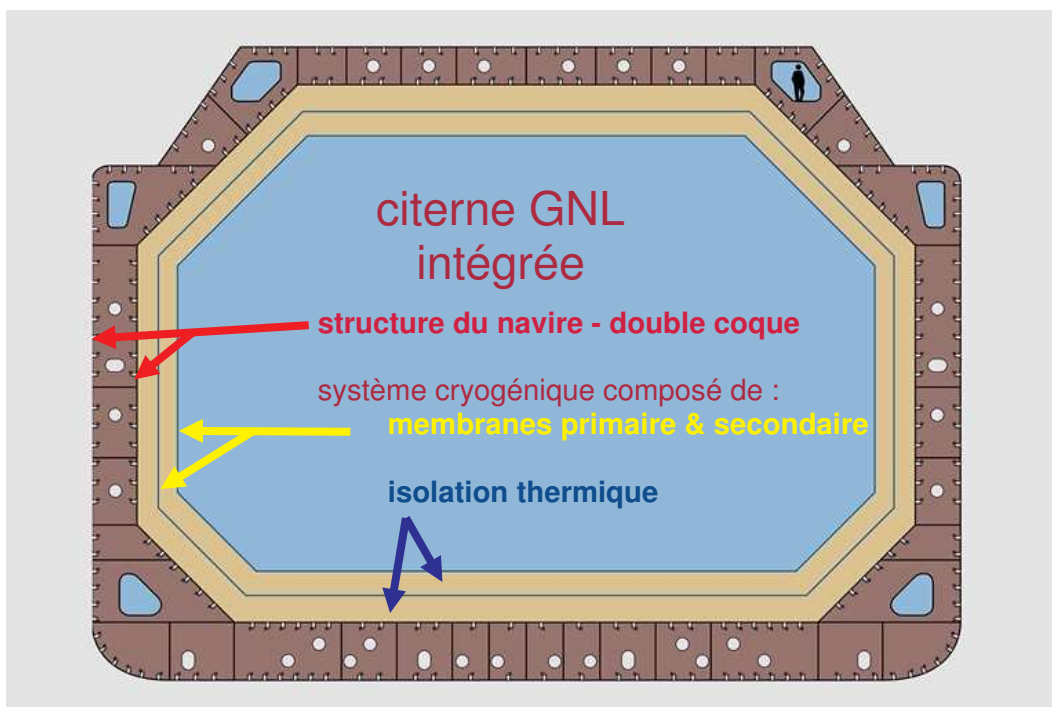
L'isolation primaire est la couche isolante située entre les barrières primaire et secondaire. Cet espace est appelé espace primaire ou espace inter-barrière (« interbarrier space » ou « IBS »). Il est réalisé, en fonction des technologies, avec des caissons de contre-plaqué remplis d'un produit isolant tel que la perlite, ou en mousse de polyuréthane renforcée de fibres de verre.

L'isolation secondaire est la couche isolante située entre la barrière secondaire et la double coque du navire. Cet espace est appelé espace secondaire ou espace isolé (« Insulated space » ou « IS »).

Le massif secondaire (isolation secondaire) a une épaisseur suffisante pour assurer seule la protection de la structure en acier du navire du refroidissement créé par la cargaison, en cas de dommage de la barrière primaire.

Le rôle du massif primaire est d'augmenter l'efficacité globale de l'isolation et d'assurer une séparation physique entre les deux barrières, réduisant ainsi les risques d'une défaillance des deux barrières par suite d'une avarie unique.

Les massifs primaire et secondaire sont construits de telle sorte que de l'azote peut circuler dans chaque espace et évacuer le gaz qui y serait éventuellement.



Les systèmes à membranes ne sont pas auto supportés.  
La structure double coque du navire reprend toutes les charges (thermiques, statiques ou dynamiques).



Les membranes sont conçues de façon à ce que la contraction ou la dilatation soit compensée sans créer de contrainte excessive dans la membrane elle-même

La validation de la conception d'un système à membrane se fait en suivant un schéma d'approbation de concept, basé sur l'analyse des charges, des calculs de contraintes, des études de fatigue, des essais de matériaux et de sous-systèmes, et la détermination de facteurs de sécurité.

Les systèmes à membranes permettent la réalisation de citernes de très grandes capacités et offrent une grande souplesse du point de vue des dimensions puisqu'il est possible d'adapter le système d'isolation aux dimensions exactes du navire.

Toutefois, l'impossibilité d'intégrer des cloisons transversales ou longitudinales dans les citernes pour limiter l'amplitude des mouvements de liquide impose d'effectuer des études très sophistiquées dans le but de vérifier la résistance de l'isolation et de la structure du navire aux impacts de liquide sur la barrière primaire. Les niveaux de remplissage intermédiaires sont en général prohibés en route libre.

Pratiquement, les systèmes à membranes sont utilisés exclusivement pour le transport du GNL.

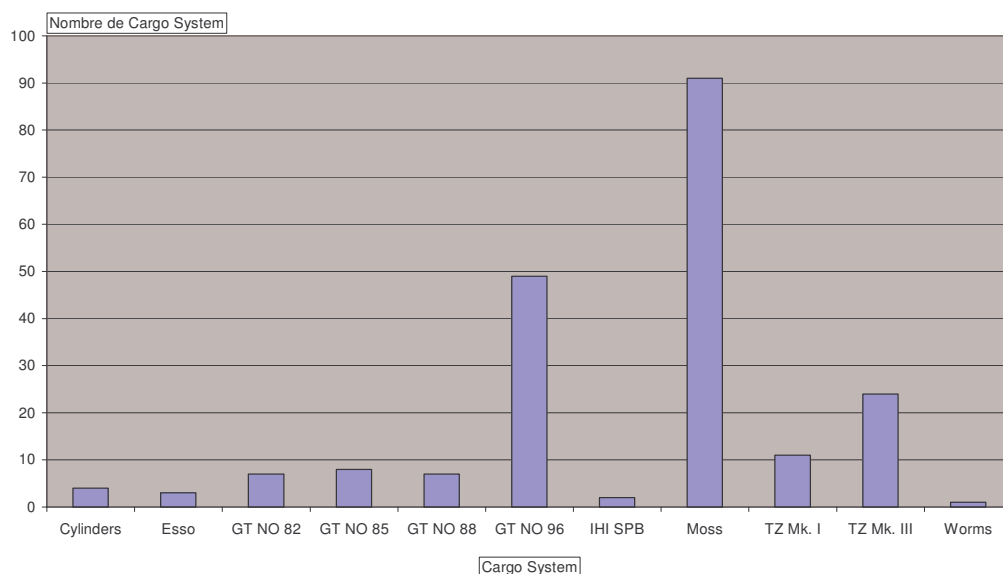
La proportion de navires méthaniers équipés de citernes de type B était à peu près équivalente à celle des navires équipés de systèmes à membranes jusqu'en 2005.

Le nombre de navires commandés avec la technologie à membranes a considérablement augmenté et cette technologie sera sensiblement plus représentée dans les années à venir :

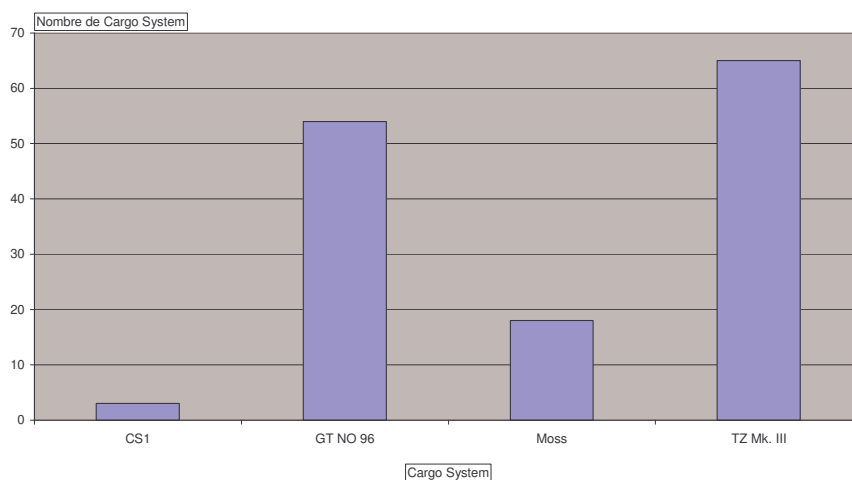
Sur 215 méthaniers recensés dans le monde en septembre 2006, 94 sont de technologie MOSS (sphères type B) et 2 de technique IHI (citernes prismatiques type B).

A la même date, sur 140 méthaniers commandés, 18 sont équipés de sphères.

Types de systèmes de stockage des méthaniers - flotte Sept 2006



Types de systèmes de stockage des méthaniers - Flotte Commandée pour  
Sept 2006 à 2010



La sécurité des systèmes à membranes est basée, en plus des aspects technologiques (choix des matériaux par exemple) sur le contrôle permanent de l'atmosphère des espaces inter barrières et secondaire (évaluation en continu de la concentration de gaz), dans lesquels une circulation d'azote est assurée pour maintenir le taux d'oxygène sous 5% en volume, et sur la surveillance également en continu de la température de la barrière secondaire et de la double coque.

### 2.2.7. Le contrôle de la pression dans les citernes

Une des caractéristiques des navires transportant du gaz liquéfié est que la pression dans les citernes doit être surveillée et des dispositions prises de façon à ce que cette pression ne dépasse pas une certaine limite (voir §2.1.3).

Cette limite se situe en général à 250 mbar au dessus de la pression atmosphérique pour les citernes de type A, B et à membranes.

Si le système permettant la régulation de la pression dans les citernes est indisponible (avaries entraînant la perte du système de re-liquéfaction, ou l'interdiction de faire transiter du gaz dans les espaces machines pour le brûler, ou un black-out ...), les conséquences du point de vue de la nécessité de relâcher des vapeurs à l'atmosphère seront différentes en fonction du type de système de confinement.

Pour un navire pressurisé, la cargaison peut rester indéfiniment dans les citernes, tant que la température extérieure ne dépasse pas celle pour laquelle celles-ci ont été calculées (en principe 45 °C - voir partie 3, §1.3.2)

La température de la cargaison monte lentement dans un navire semi-pressurisé et un dégazage est nécessaire après quelques jours pour permettre le refroidissement.

Dans un navire réfrigéré, la température monte plus vite et il est nécessaire de dégazer plus rapidement.

Un rejet au mât est nécessaire après quelques dizaines d'heures dans un méthanier.

## 3. PRINCIPES DE SEGREGATION - RESISTANCE A LA COLLISION ET A L'ECHOUEMENT

### 3.1. Introduction

Les navires transportant des gaz liquéfiés doivent être conçus de telle sorte que les risques de transfert, d'accumulation, ou d'épandage du produit transporté sous forme liquide ou gazeuse, à un endroit où ce produit n'est pas supposé être présent, sont les plus faibles possible, en situation normale et en cas de brèche due à une collision ou à un échouement.

Des règles de ségrégation doivent être respectées ; ces règles concernent :

- la séparation physique des espaces de cargaison avec le reste du navire,
- l'intercommunication des réseaux de tuyauterie.
- la disposition des systèmes de ventilation du navire

En cas de brèche, un certain niveau de protection du navire est assuré :

- en cas d'avarie mineure (choc contre le quai ou contre un remorqueur) et, dans une certaine mesure, en cas d'abordage ou d'échouement, par le respect de distances minimales entre les citernes et le bordé,
- par l'analyse du comportement du navire en cas de brèche et la vérification que celui-ci est apte à survivre aux effets normaux de l'envahissement résultant d'une avarie conventionnelle de la coque causée par une force extérieure.

Les distances minimales et les dimensions de l'avarie conventionnelle sont déterminées à partir du type du navire, lui-même dépendant des produits pour le transport desquels il est prévu.

### 3.2 Les types de navires

On définit quatre types de navires : 1G, 2G, 2PG et 3G qui diffèrent par leur niveau de protection, en particulier vis-à-vis du risque de collision et des éventuels épandages de la cargaison.

Ces types de navire représentent des standards de conception qui sont hiérarchisés de la façon suivante :

**type 1G** : standard exigé pour le transport des gaz liquéfiés pour lesquels les dispositions préventives visant à empêcher l'échappement du produit sont **maximales**. Il concerne les gaz qui présentent globalement les risques les plus importants (grande toxicité et réactivité chimique par exemple); le navire doit pouvoir résister aux avaries les plus sévères et les distances entre le bordé et les citernes sont les plus grandes.

On peut noter par exemple que la réglementation impose aux produits pour lesquels le standard 1G est demandé d'être transportés dans des citernes de type C (voir § 2.2.5).

Les navires de type 1G sont donc tous du type pressurisé ou semi pressurisé.

**type 2G** : standard minimum exigé pour le transport des gaz liquéfiés pour lesquels les dispositions préventives visant à empêcher l'échappement du produit sont **significatives**. Il concerne les produits qui présentent globalement des risques élevés, en général liés à leur caractère inflammable ou toxique ; les avaries auxquelles le navire doit pouvoir résister et les distances de sécurité entre les citernes et le bordé sont moins élevées que pour le type 1G.



**type 2PG** : standard minimum exigé pour le transport des gaz liquéfiés pour lesquels les dispositions préventives visant à empêcher l'échappement du produit sont **significatives**. Il concerne les mêmes produits que le type 2G, mais s'applique aux navires dont la longueur est inférieure à 150m, équipés de citernes de type C calculées pour une pression d'au moins 7 bar et dont la température de service est supérieure à -55°C.

**type 3G** : standard minimum pour la construction d'un transporteur de gaz. Les dispositions préventives visant à empêcher l'échappement du produit sont **les moins sévères**. Ce standard concerne quelques produits qui ne sont ni toxiques, ni inflammables.

La réglementation précise, pour chaque gaz transportable sous forme liquide, le standard minimum requis.

Un navire destiné à transporter des produits requérant des standards différents doit être conforme aux exigences les plus sévères :

type 1G > type 2G ou 2PG > type 3G

Il peut toutefois être admis que cette conformité au standard exigé pour le transport d'un produit ne soit respectée qu'au niveau de la citerne destinée à contenir ce produit.

### 3.3 Règles de conception

#### 3.3.1. Ségrégation de la tranche cargaison avec les autres locaux

Une séparation suffisante doit être prévue entre la tranche cargaison et les autres espaces du navire, en particulier avec les espaces de machines, les locaux d'habitation, les postes de contrôle et de sécurité.

La nature de cette séparation dépend de l'obligation qu'a ou non le système de confinement d'être muni d'une barrière secondaire et du risque d'incendie estimé dans le local adjacent à la tranche de cargaison.

Les types de séparation possibles sont :

- un cofferdam
- une caisse à combustible
- une cloison en acier étanche au gaz entièrement soudée suffisamment résistante à l'incendie

[voir Référence R-12]

#### 3.3.2. Double fonds et double coque

Si la cargaison est transportée dans un système de confinement pour lequel une barrière secondaire (partielle ou complète) est exigée et à une température inférieure à -10°C, les espaces de cales doivent être séparés de la mer par un double fond.

Si la température de transport est inférieure à -55°C, le navire doit de plus être muni de cloisons longitudinales formant des citernes latérales (double coque). [Référence R-13]

Les navires équipés de citernes de type C (réservoirs sous pression) ne sont donc pas tenus d'être munis d'un double-fond dans la tranche de cargaison ou d'une double coque ; ils le sont cependant d'une façon générale, pour des raisons d'architecture du navire (nécessité de prévoir des ballasts) ou de résistance structurelle.

### 3.3.3. Systèmes de tuyauterie

Les systèmes de tuyautage de cargaison, qu'ils contiennent du liquide ou des vapeurs, doivent être séparés de ceux qui sont utilisés pour les autres services du navire.

Un des principes est d'éviter le passage du produit transporté dans les espaces machines et, réciproquement, d'éviter le passage dans la tranche de cargaison de fluides provenant des espaces machines.

Les exceptions à ces règles concernent :

- les vapeurs de gaz utilisées comme combustible dans les chaudières ou moteurs de propulsion ou de production d'énergie électrique
- les divers fluides produits dans les espaces machines et utilisés dans la tranche de cargaison pour le réchauffage (vapeur), le contrôle commande (air comprimé, fluide hydraulique), l'inertage (gaz inerte, azote), la lutte contre l'incendie, le ballastage.

Lorsque de telles liaisons existent, des précautions doivent être prises pour s'assurer que la cargaison ou des vapeurs de cargaison ne peuvent pas s'introduire dans d'autres systèmes de tuyautage, par exemple en imposant la mise en place d'éléments amovibles qui sont retirés à la fin des opérations.

A l'exception des systèmes de chargement ou déchargement par l'avant ou par l'arrière du navire, qui sont soumis à des règles spéciales et ne sont normalement pas connectés au reste du réseau de tuyauteries cargaison quand ils ne sont pas utilisés, l'ensemble des tuyauteries de cargaison est situé dans la tranche de cargaison au dessus du pont.

### 3.3.4. Systèmes de ventilation

Les principes de conception et de réalisation des systèmes de ventilation des navires transporteurs de gaz sont les suivants :

- Afin de limiter le plus possible le risque d'entrée de gaz dans les espaces d'habitation ou dans les locaux de service, de machines ou de sécurité, les entrées d'air de ces espaces doivent être situées :
  - o hors de la cloison faisant face à la tranche de cargaison
  - o si situées sur les parois latérales des superstructures, hors d'une zone située à moins d'une certaine distance de la face donnant sur la tranche de la cargaison (4% de L, dans une plage de 3 à 5 mètres)
- Lorsque le produit transporté est toxique, les volets destinés à obturer les entrées d'air de ces espaces (habitation, machines, etc...) doivent pouvoir être fermés depuis l'intérieur du navire.

- Le circuit de dégagement des gaz des citernes doit être séparé des circuits de dégagement d'air des autres compartiments du navire.
  
- Une distance minimum doit être respectée entre les orifices d'évacuation des soupapes des citernes (25 m) ou les sorties d'air de ventilation d'espaces dangereux (10 m, mesuré horizontalement) et les entrées d'air desservant des espaces sûrs (Voir § 4.1 pour la notion de zone dangereuse et d'espace sûr).
  
- Pour les espaces situés dans la tranche de la cargaison et susceptibles d'être fréquentés par l'équipage, la capacité du système de ventilation est calculée sur la base de 30 renouvellements de l'atmosphère par heure pour limiter les risques d'accumulation de vapeurs inflammables ou toxiques.
  
- Lorsqu'un l'espace est considéré comme sûr du point de vue de la présence de vapeurs de gaz, le taux peut être réduit à 8 renouvellements par heure. La ventilation doit permettre d'obtenir une légère surpression afin de limiter l'entrée de vapeurs depuis l'extérieur. Le sas éventuel permettant l'accès à ces espaces doit aussi être en surpression par rapport à l'extérieur.
  
- La ventilation des espaces situés dans la tranche de cargaison et non susceptibles d'être fréquentés par l'équipage en service normal doit pouvoir être assurée à l'aide d'un système fixe ou d'un système portable. Il n'y a pas d'exigence relative à la capacité du système de ventilation pour ces espaces.
  
- La chambre des compresseurs et le poste de contrôle de la cargaison, si ce dernier n'est pas considéré comme étant sûr, doivent être en légère dépression.

### 3.3.5. Emplacement des citernes

Les citernes doivent être situées à l'intérieur d'un espace dont les limites dépendent du type de navire, et donc de l'évaluation des risques présentés par le transport des produits pour lequel le navire est conçu.

Deux types d'avarie sont pris en compte : l'avarie de bordé (collision) et l'avarie de fond (échouage ou échouement).

En ce qui concerne l'avarie de bordé, la distance au bordé, mesurée à partir du bordé de muraille ne doit pas être inférieure à :

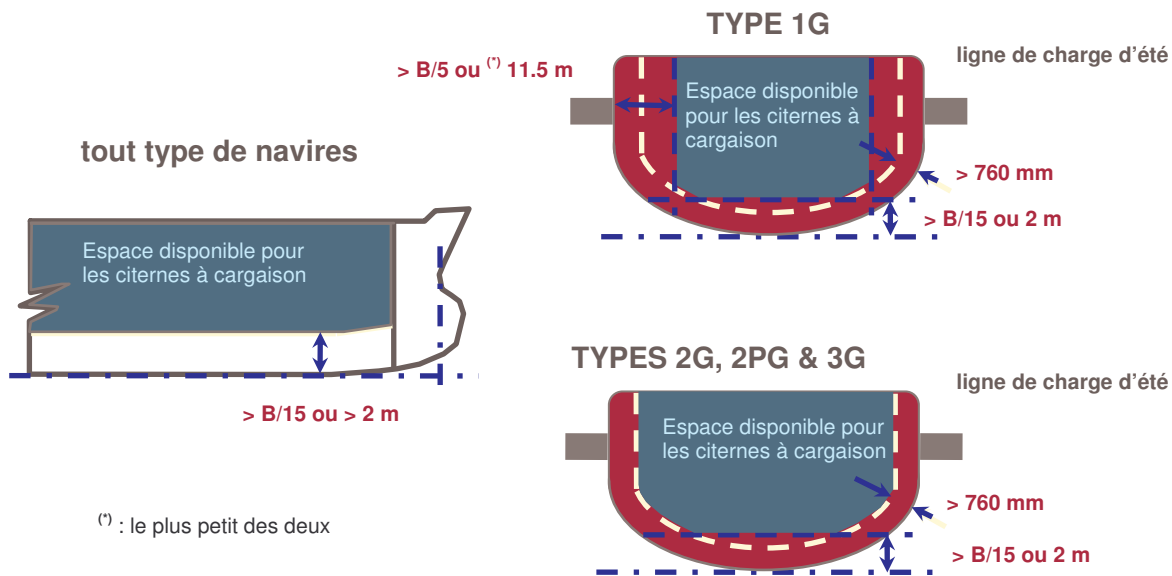
- B/5 ou 11,5 m (\*) avec un minimum de 760 mm pour les navires de type 1G
- 760 mm pour les autres navires

Pour l'avarie de fond, la distance, mesurée hors membre à partir du bordé de fond et dans le plan axial, ne doit pas être inférieure à :

- B/15 ou 2 m (\*) avec un minimum de 760 mm pour tous les types de navires

B représente la largeur du navire.

(\*) : le plus petit des deux



Les liquides inflammables dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 60°C ne peuvent pas être stockés dans les espaces protégés lorsque les citernes à cargaison adjacentes à cette zone protégée contiennent du gaz liquéfié.

### 3.4. Zone d'avarie et étendue de l'avarie

Les navires transporteurs de gaz sont conçus de façon à pouvoir résister à une brèche dont les dimensions et la position sont imposées par le Code IGC [Référence R-14].

Les critères de survie sont vérifiés pour ces avaries conventionnelles.

Dans une situation d'avarie réelle, la connaissance des conditions d'avarie conventionnelle permet de savoir dans quelles mesures le navire est conçu pour résister au dommage qu'il subit.

Les paragraphes suivants détaillent :

- la façon dont sont calculées les dimensions de la brèche conventionnelle (§3.4.1)
- la zone du navire où une telle brèche a été considérée (§3.4.2).

#### 3.4.1. Dimensions de l'avarie conventionnelle

Dans chacun des cas ci-dessous, la plus petite des deux longueurs est à considérer.

B et L représentent respectivement la largeur et la longueur du navire, exprimés en mètres.

Les dimensions de l'avarie de bordé conventionnelle sont :

- longueur :  $1/3 L^{2/3}$  ou 14,5 m
- étendue transversale : B/5 ou 11,5 m
- hauteur : de la ligne de base vers le haut sans limitation

Les dimensions de l'avarie de fond conventionnelle sont, pour la partie avant du navire (mesurée à partir de l'avant du navire sur une longueur de 0,3 L) :

- longueur:  $1/3 L^{2/3}$  ou 14,5 m
- étendue transversale: B/6 ou 10 m
- hauteur: B/15 ou 2 m

et pour le reste du navire :

- longueur:  $1/3 L^{2/3}$  ou 5 m
- étendue transversale: B/6 ou 5 m
- hauteur: B/15 ou 2 m

La comparaison de ces dimensions avec celles des zones d'exclusion indiquées dans le paragraphe 3.3.5 montre que :

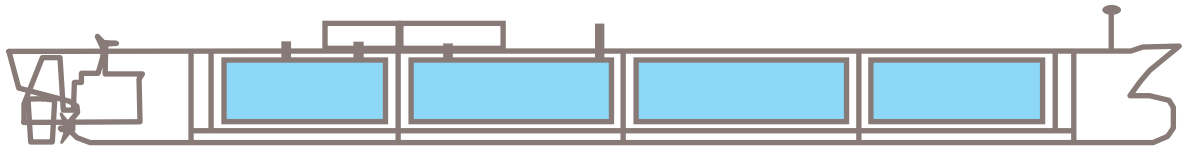
- les citernes sont épargnées tant qu'une avarie de fond reste limitée à l'avarie conventionnelle
- les citernes d'un navire de type 1G sont épargnées tant qu'une avarie de bordé reste limitée à l'avarie conventionnelle
- les citernes d'un navire d'un type autre que 1G peuvent être endommagées à la suite d'une avarie de bordé même limitée à l'avarie conventionnelle.

### 3.4.2. Zone d'avarie

la zone où l'avarie peut être localisée dépend du type de navire (voir §3.2) et de sa longueur :

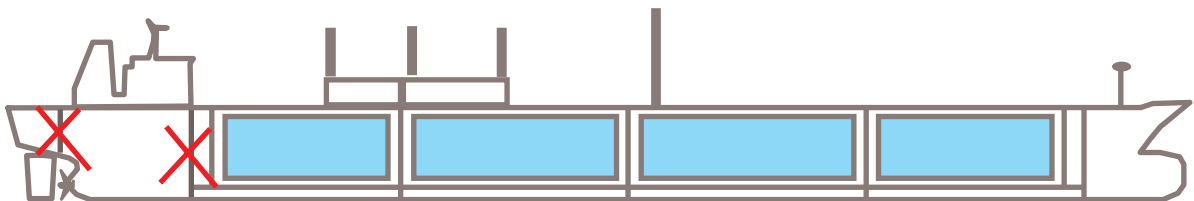
- Type 1G : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur.
- Type 2G, longueur supérieure à 150 m : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur.
- Type 2G, longueur inférieure ou égale à 150 m : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur, celle-ci ne touchant aucune des cloisons du local des machines (si ce local est situé à l'arrière).
- Type 2PG : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur, celle-ci ne touchant pas les cloisons transversales séparées par une distance supérieure à la longueur de la brèche conventionnelle.

- Type 3G, longueur supérieure à 125 m : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur, celle-ci ne touchant pas les cloisons transversales séparées par une distance supérieure à la longueur de la brèche conventionnelle
- Type 3G, longueur inférieure ou égale à 125 m : le navire est conçu de façon à pouvoir résister à une avarie en un point quelconque de sa longueur, celle-ci ne touchant pas les cloisons transversales séparées par une distance supérieure à la longueur de la brèche conventionnelle ni le local des machines si situé à l'arrière. La capacité de survie à un envahissement de l'espace machines doit être considérée.



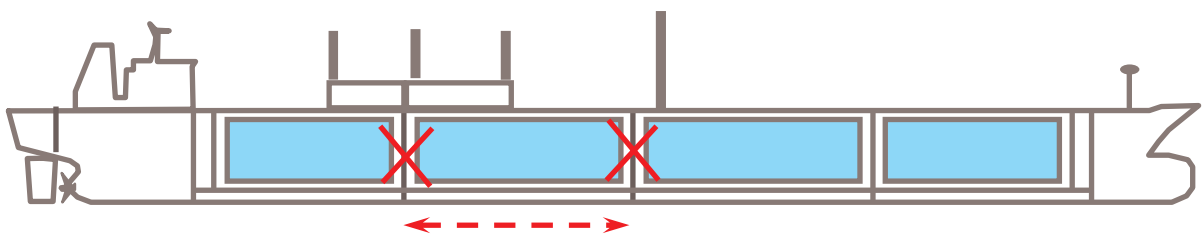
Type 1G ou Type 2G avec  $L > 150m$ :

Avarie à tout endroit



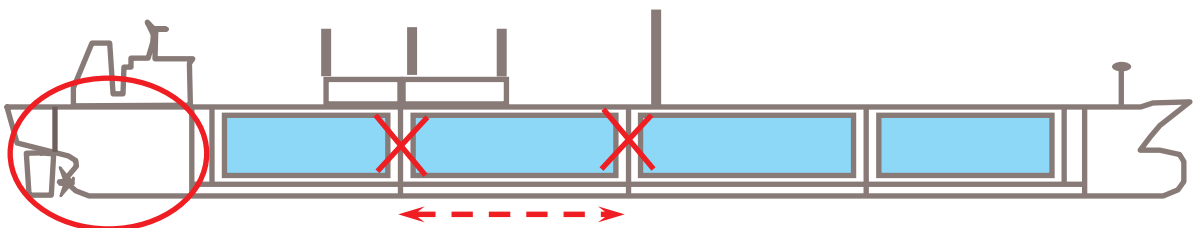
Type 2G de longueur  $\leq 150m$ :

Avarie n'importe où, sauf au niveau des cloisons du compartiment machines (supposées intactes)



Type 2PG ou type 3G de longueur  $> 125m$ :

Comme type 1G, sauf cloisons séparées par une longueur supérieure à la longueur conventionnelle d'avarie



Type 3G de longueur  $\leq 125m$  :

Comme type 2PG, mais pas d'avarie dans le compartiment machines

### 3.5. Critères de survie

Le comportement du navire en cas d'avarie est vérifié pour toutes les conditions de chargement prévues.

Il n'est pas exigé que ces vérifications soient faites dans le cas où le navire est sur ballast (utilisation de la cargaison restant à bord uniquement pour la réfrigération et l'alimentation en combustible des moteurs ou chaudières).

La méthode utilisée pour l'étude de la stabilité d'un navire transporteur de gaz est une méthode déterministe (par rapport à une méthode probabiliste, généralement appliquée pour les navires de charge), ce qui va dans le sens de la sécurité, du point de vue de la stabilité

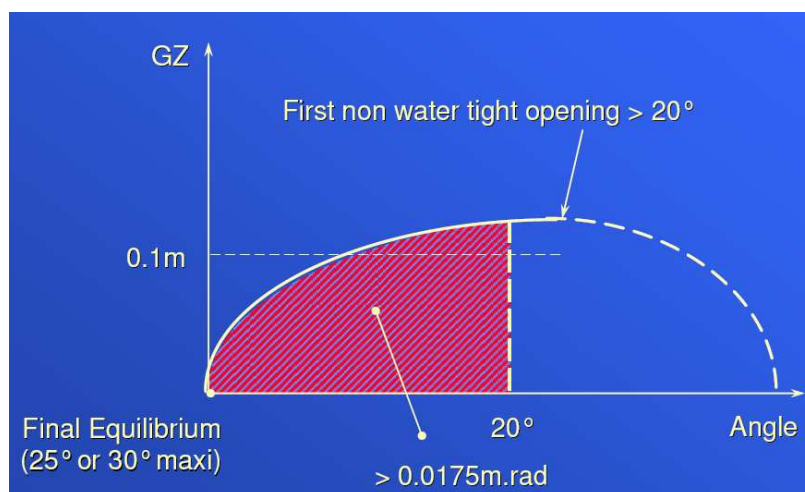
Les critères suivants doivent être respectés pour tout transporteur de gaz :

#### 3.5.1. A un stade quelconque d'envahissement

- la ligne de flottaison doit être située en dessous du bord inférieur de toute ouverture qui permettrait un envahissement progressif (compte tenu de l'enfoncement, de la gîte et de l'assiette du navire)
- l'angle de gîte ne doit pas excéder  $30^\circ$
- la stabilité résiduelle doit rester suffisante aux états d'envahissement intermédiaires.

#### 3.5.2. Au stade final d'envahissement

- l'intervalle de gîte de la courbe des bras de levier de redressement doit être d'au moins  $20^\circ$  à partir de la position d'équilibre
- le bras de levier de redressement maxi doit être d'au moins 100 mm dans cet intervalle
- l'aire sous la courbe doit être d'au moins 0,0175 m.rad
- les ouvertures non protégées ne doivent pas être immergées quand l'angle d'inclinaison est dans la limite minimum spécifiée sauf si le local concerné est considéré comme envahi
- dans les situations intermédiaires, des ouvertures étanches aux intempéries peuvent être immergées
- les dispositifs de sauvetage du côté inférieur doivent être opérationnels à l'angle de gîte final
- la source d'alimentation en énergie de secours doit pouvoir fonctionner à l'angle de gîte final



### 3.6. Organisation en cas d'urgence

Les sociétés de classification proposent généralement un service optionnel aux armateurs, leur assurant une assistance 24 heures sur 24, en cas d'avarie ou d'accident mettant en cause la stabilité ou la résistance du navire ou faisant apparaître un risque de pollution important.

Ce service (ERS pour Bureau Veritas) permet à des experts en calculs structurels et en calculs de stabilité, d'effectuer dans un délai très bref les calculs de stabilité et de résistance longitudinale afin de pouvoir donner à l'armateur un avis technique approprié sur la flottabilité, la résistance résiduelle, la stabilité après avarie.

Cet avis constitue une aide à la décision pour la détermination des actions à entreprendre.

## 4. LA SECURITE A BORD DES TRANSPORTEURS DE GAZ

### 4.1. Les zones dangereuses

3 types de zones dangereuses sont définies pour les navires transporteurs de gaz et leur environnement, en fonction du potentiel de présence de gaz dans la zone considérée.

- Les zones 0 sont celles où du gaz inflammable est présent en permanence (par exemple, intérieur des citernes ou des collecteurs de liquide ou de vapeurs).
- Les zones 1 sont celles où du gaz inflammable est susceptible d'être présent en opération normale (par exemple, la zone autour des orifices d'évacuation de soupapes de sûreté, ou la zone située sur le pont au dessus de la tranche de cargaison)
- Les zones 2 dans lesquelles du gaz n'est pas susceptible d'être présent en opération normale, et dans lesquelles, s'il était présent, il ne resterait que pour une durée limitée et peu fréquemment. (par exemple, ou les zones situées à juste après la zone 1 entourant les orifices d'évacuations des soupapes de sûreté des citernes).

La détermination des zones dangereuses permet l'identification des endroits où il faut prendre des dispositions pour éviter d'avoir simultanément la présence d'une atmosphère explosive et une source d'inflammation.

Un deuxième but de cette classification est de permettre la sélection des équipements électriques qui, étant indispensables pour la sécurité du navire ou pour son opération, doivent être installés dans les zones concernées. Les équipements électriques qui ne sont nécessaires ne peuvent pas être installés dans des zones dangereuses. [Référence R-15].

Toute la tranche de cargaison est classé zone dangereuse, et seules quelques zones ponctuelles de la zone arrière, voire de l'avant du navire si par exemple des tuyauteries étaient installées pour permettre un transfert de cargaison par l'avant, sont classées zones dangereuses.



La définition des zones dangereuses est basée sur l'hypothèse que le navire est en situation normale d'opération. Dans le cas d'une évaporation massive de cargaison, à la suite d'un dommage impliquant les citernes à cargaison, les quantités de vapeurs créées seraient beaucoup plus importantes et du gaz pourrait être présent dans des proportions pouvant permettre la formation de mélanges inflammables en des endroits non réputés dangereux.

## 4.2. Les soupapes de sécurité

Chaque citerne est protégée contre les surpressions par deux soupapes (sauf pour les citernes de capacité inférieure à 20 m<sup>3</sup>).

Les soupapes sont connectées à un mât de dégazage qui s'élève à une hauteur égale au tiers de la largeur du navire, avec un minimum de 6m.

Chaque soupape est dimensionnée de façon à permettre l'évacuation de 100% du débit estimé de gaz qui serait généré en cas d'incendie au voisinage de la citerne. [Référence R-16].

Les tuyauteries de cargaison sont aussi protégées par des soupapes, en particulier les tronçons de tuyauterie pouvant être isolés en contenant du liquide, de façon à les protéger du risque de surpression qui pourrait advenir après le réchauffement du produit.

## 4.3. Le système de détection de gaz

Un système fixe de détection de gaz est exigé par la réglementation. [Référence R-17]

En plus de la surveillance des paramètres liés aux systèmes de confinement de la cargaison (espaces primaires et secondaire d'un système à membrane par exemple), ce système fixe de détection doit permettre la surveillance des locaux et espaces suivants :

- chambre des pompes ou des compresseurs
- local moteurs électriques des compresseurs
- poste de commande de la cargaison (« cargo control room », ou CCR), sauf s'il est considéré comme sûr vis-à-vis du risque de présence de gaz
- Tout autre local fermé situé dans la tranche de cargaison et dans lequel des vapeurs pourraient s'accumuler (espaces de cales ou espaces inter barrière des citernes indépendantes autres que les citernes de type C)
- Hottes de ventilation et double gainage quand ils sont exigés pour l'alimentation en gaz des chaudières ou des moteurs
- sas entre espaces sûrs et zones dangereuses

Des alarmes visuelles et sonores sont activées à la passerelle et au poste de commande cargaison en cas de détection de gaz.

#### 4.4. Les systèmes de lutte contre l'incendie

Les navires transporteurs de gaz doivent être équipés, comme le sont tous les navires, d'un collecteur d'eau sous pression tel que tout point du navire doit pouvoir être atteint par deux jets provenant de deux bouches différentes.

Sur un transporteur de gaz, le système doit être capable de maintenir une pression de 5 bars à toutes les bouches.

Ce réseau d'eau sous pression alimente aussi le système de protection par rideaux d'eau qui est prévu sous les traverses de chargement / déchargement pour protéger la coque métallique des petites fuites éventuelles de gaz liquéfié aux connexions.

D'autres dispositifs spécifiques sont installés sur les transporteurs de gaz :

- système d'extinction à poudre sèche
- système d'eau pulvérisée
- système CO<sub>2</sub>

Un système d'extinction à poudre sèche est obligatoire sur les navires transportant des gaz inflammables. Il doit permettre de combattre un feu de nappe de gaz liquide en tout point du pont découvert dans la tranche de cargaison, et éventuellement sur l'avant ou l'arrière du navire si des tuyauteries de chargement / déchargement y sont installées.

Les systèmes à poudre, efficaces sur des feux de nappes de gaz liquides, ont cependant un faible pouvoir de refroidissement.

Des canons et des manches sont répartis de façon à pouvoir atteindre chaque point à partir de deux sources différentes.

Au moins deux ensembles à poudre sèche indépendants et autonomes sont installés sur les transporteurs de gaz, sauf lorsque le navire a une capacité de transport totale inférieure à 1000 m<sup>3</sup>. Dans ce cas, on peut ne trouver qu'un seul ensemble.

La quantité de poudre stockée dans les réservoirs doit permettre une durée de fonctionnement de 45 secondes au minimum.

[Référence R-18]

Le système d'eau pulvérisée est destiné à protéger des effets d'un incendie ou d'une fuite de produit la face avant du château, les zones où sont situées les embarcations de sauvetage, les faces latérales du roof cargaison (local des compresseurs et local des moteurs électriques), les dômes liquides et dômes gaz et les zones des traverses de chargement / déchargement.

La capacité des pompes du système d'eau pulvérisée doit permettre soit l'arrosage de toutes les zones à protéger simultanément, soit un arrosage par zones quand le système est découpé en plusieurs sections.

[Référence R-19]

Le système d'extinction au gaz carbonique est prévu pour l'extinction des incendies dans les espaces fermés (chambre des compresseurs ou local des moteurs électriques par exemple). On peut trouver en alternative un système à brouillard d'eau.

## 4.6. Le système d'arrêt d'urgence

Le système d'arrêt d'urgence (« Emergency Shut Down », ou ESD) est un dispositif qui est actionné en cas d'urgence, soit manuellement, soit automatiquement, principalement lors des opérations de chargement / déchargement, mais aussi lorsque le navire est à la mer.

L'objectif initial est d'interrompre les transferts de produit (liquide ou vapeur), d'isoler les citernes et de mettre le navire dans une configuration plus sûre.

Le principe reste de n'avoir qu'une seule commande pour, en cas d'urgence, fermer les vannes qui permettent l'interruption des transferts de liquide ou de vapeurs et arrêter les pompes, les compresseurs, l'alimentation en gaz des espaces machines (pour les méthanières et les autres navires transporteurs de gaz si ils sont autorisés à brûler les gaz d'évaporation dans les machines).

Le système ESD peut être activé manuellement sur décision du bord grâce à des boutons-poussoirs installés à deux emplacements au minimum qui sont en général le poste de contrôle de la cargaison et la passerelle.

D'autres sécurités ont été rattachées au système ESD ; les situations d'urgence suivantes entraînent une activation automatique du système ESD:

- incendie / explosion (éléments fusibles installés au niveau des postes de chargement / déchargement et des dômes)
- niveau très haut dans une citerne
- risque de dépression dans une citerne
- détection de gaz ou autre anomalie dans le système lié à l'utilisation du gaz comme combustible

De plus, les vannes du système ESD sont conçues de façon à se fermer automatiquement en cas de perte de l'énergie de leur système de commande.

Toutes les situations d'urgence ne sont pas traitées de la même façon : la réponse à un niveau très haut dans une citerne sera limitée à la fermeture de la vanne correspondante, sans qu'il soit nécessaire d'isoler les autres citernes par exemple ; de même, un incident relatif à l'utilisation du gaz dans les espaces machines ne nécessite pas forcément l'arrêt des compresseurs ou des pompes.

## 4.6. L'accès à l'avant du navire

Les navires transporteurs de gaz, en tant que navires citerne, sont soumis à la réglementation qui impose de prévoir pour l'équipage un itinéraire sûr entre les parties arrière et avant du navire.

[Référence R-20]

Un passage d'au moins un mètre de large, muni de rambardes et d'abris régulièrement disposés, construit avec un matériau non dérapant et résistant à l'incendie doit être prévu le plus près possible du centre du navire.

## 4.7. Le rejet de la cargaison à la mer

L'installation d'un système de rejet à la mer en cas d'urgence (« jettisoning ») n'est obligatoire que pour les navires transportant de l'oxyde d'éthylène.

Les transporteurs de gaz sont cependant souvent équipés d'un tel système, dont l'utilisation reste excessivement rare et demande à ce que des précautions particulières soient prises.

## 5. REFERENCES

- (1) Code IGC: International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, 1993 edition + amendments
- (2) Code IBC: International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Dangerous Chemicals in Bulk, 1998 Edition + amendments
- (3) ICS TANKER SAFETY GUIDE (liquefied gas)

### Références réglementaires

- R-1: SOLAS Chapitre II-2 partie B règle 4 §5.1
- R-2 : SOLAS Chapitre II-2 partie C règle 9 §2.4
- R-3 : SOLAS Chapitre II-1 partie C règle 29 § 15 à 20
- R-4 : SOLAS Chapitre II-1 partie A-1 règle 3.4
- R-5 : IGC chapitre 7 règle 7.1.1
- R-6 : IGC chapitre 3, règle 3.3.1.1
- R-7 : IGC chapitre 3 règles 3.1.5.3 et 3.1.5.4
- R-8 IGC chapitre 4 règle 4.7.4
- R-9 IGC chapitre 4 règle 4.7.3
- R-10 IGC chapitre 4 règle 4.7.2
- R-11 IGC chapitre 4 règle 4.4.5
- R-12 IGC chapitre 3 § 3.1
- R-13 IGC chapitre 3 règle 3.1.4
- R-14 IGC chapitre 2 § 2.8 et § 2.5
- R-15 IGC chapitre 10 règle 10.1.4
- R-16 IGC chapitre 8 § 8.5
- R-17 IGC chapitre 13 § 13.6.7
- R-18 IGC chapitre 11 § 11.4
- R-19 IGC chapitre 11 § 11.3
- R-20 Résolution MSC.62 (67)

## ANNEXE 1 :

### REGLEMENTATION APPLICABLE AUX NAVIRES TRANSPORTEURS DE GAZ

#### EN FONCTION DE LEUR DATE DE CONSTRUCTION

KEEL LAYING DATE		ON OR BEFORE 31.12.76			BEFORE 01.07.86		< 01.10.94	≥ 01.10.94		
DELIVERY DATE		≤31.10.76	≤30.06.80	> 30.06.80	≤30.06.80	>30.06.80	IGC CODE	AMENDED IGC CODE		
CONTRACT	NO	CODE FOR EXISTING SHIPS	A 329	A 328	A 328	A 328			IGC CODE	AMENDED IGC CODE
	≤31.10.76				A 329					
	>31.10.76				A 328					

## ANNEXE 2 :

### LISTE DES PRODUITS CONCERNES PAR LE CODE IGC

Product name	
Acetaldehyde	Monoethylamine
Ammonia, anhydrous	Nitrogen
Butadiene	Pentanes (all isomers)
Butane	Pentene (all isomers)
Butylenes	Propane
Chlorine	Propylene
Diethyl ether	Propylene oxides
Dimethylamine	Refrigerant gases
Ethane	Dichlorodifluoromethane (R12)
Ethyl chloride	Dichloromonofluoroethane (R21)
Ethylene	Dichlorotetrafluoroethane (R114)
Ethylene oxide	Monochlorodifluoromethane (R22)
Isoprene	Monochlorotetrafluoroethane (R124)
Isopropylamine	Monochlorotrifluoromethane (R13)
Methane (LNG)	Sulphur dioxide
Methyl acetylene/propadiene mixture	Vinyl chloride
Methyl bromide	Vinyl ethyl ether
Methyl chloride	Vinylidene chloride

DATE 18 mai 2006  
CLASSIFICATION Restreint  
INITIALE

## Le transport du GNL par navire

---

**RÉF.:** n° de référence fourni par votre secrétariat

---

PÔLE ÉMETTEUR Pôle Environnement GNL Sécurité

AUTEURS INTERNES SAUTER Vincent

AUTEURS EXTERNES



MOTS-CLÉS Navire méthanier, transport de GNL, GNL

RÉSUMÉ / ABSTRACT Ce document présente, d'une manière très générale, le transport de GNL par navire.

DOC(S) ASSOCIÉS

CHRONO OUI

CLASSEMENT Restreint

TYPOLOGIE

GESTION ÉLECTRONIQUE DE DOCUMENTS (GED)

NOM DE PROJET / AFFAIRE

COMPTE DE GESTION

VALIDATION	NOM	FONCTION	VISA	DATE
RÉDACTEUR	Vincent SAUTER	Ingénieur de recherche		
VÉRIFICATEUR	Michael GODEAU	Chef de projet		
APPROBATEUR	Bénédict WEISS	Chef de prgramme		

	NOM	VISA
ÉMETTEUR DU DOCUMENT	Laurent DUQUESNE	

DURÉE DE LA CLASSIFICATION INITIALE	
-------------------------------------	--

DIFFUSION INITIALE :

destinataires repérés par (S) : papier comportant seulement les pages de garde et la synthèse

destinataires repérés par (E) : pas de papier, mais accessible par la Gestion Electronique des Documents (GED)

autres destinataires : document papier complet

-----  
DIFFUSION COMPLÉMENTAIRE :

# TABLE DES MATIERES

<b>1.LE GNL</b>	<b>124</b>	
<b>1.1.Introduction</b>		<b>124</b>
<b>1.2.Les propriétés physiques – quelques chiffres</b>		<b>124</b>
<b>1.3.Les risques spécifiques au GNL</b>		<b>124</b>
<b>2.LES NAVIRES METHANIERES</b>	<b>126</b>	
<b>2.1.Généralités</b>		<b>126</b>
<b>2.2.Les différentes technologies</b>		<b>126</b>
2.2.1. La technologie membrane		
2.2.2. La technologie Moss-Rosenberg		
2.2.3. La technologie « prismatique »		<b>128</b>
<b>3.LES DISPOSITIFS DE SECURITE</b>	<b>129</b>	
<b>4.LES VOIES DE NAVIGATION</b>	<b>129</b>	

# 1. LE GNL

---

## 1.1. Introduction

Pour faciliter son transport, le Gaz Naturel est liquéfié en abaissant sa température à  $-160^{\circ}\text{C}$  environ. Ainsi, le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) occupe 600 fois moins de place que du Gaz Naturel pour la même quantité d'énergie. Le GNL, produit dans une usine de liquéfaction, près du gisement de gaz, est chargé dans un navire méthanier. Après la traversée, ce navire décharge sa cargaison dans un terminal méthanier, appelé aussi terminal de réception GNL. Au cours de cette traversée, le GNL est conservé à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique (quelques dixièmes de bars, dans des cuves isolées thermiquement afin de limiter les apports de chaleur et ainsi limiter l'évaporation du liquide).

## 1.2. Les propriétés physiques – quelques chiffres

Voici quelques chiffres concernant le GNL :

- Composition : méthane ( $\geq 80\%$ ), éthane, propane, butane, azote...
- Température :  $-160^{\circ}\text{C}$  environ à 1 bar
- Masse volumique :  $450\text{ kg/m}^3$  environ (en fonction de la composition)
- $1\text{ m}^3$  de GNL devient  $600\text{ m}^3$  de gaz naturel à  $20^{\circ}\text{C}$ .

Quelques chiffres concernant les vapeurs de GNL :

- Masse volumique à 1 bar et  $-160^{\circ}\text{C}$  :  $1.7\text{ kg/m}^3$  environ, densité par rapport à l'air : 1.3. Le gaz, plus lourd que l'air lorsqu'il est froid, aura donc tendance à rester près du sol.
- Masse volumique à 1 bar et  $20^{\circ}\text{C}$  :  $0.8\text{ kg/m}^3$  environ, densité par rapport à l'air : 0.6. Le gaz, plus léger que l'air, aura donc tendance à se disperser rapidement.
- Les vapeurs de GNL deviennent plus légères que l'air en se réchauffant au contact de l'environnement (air, sol, eau...), leur masse volumique atteignant celle de l'air aux alentours de  $-100^{\circ}\text{C}$ . La rapidité avec laquelle les vapeurs de GNL se réchauffent dépend fortement des conditions atmosphériques (températures de l'air et de l'eau, vitesse du vent, turbulences ...).
- Les vapeurs de GNL, qui ne se distinguent du gaz naturel que par leur température, sont inflammables pour des concentrations volumiques comprises entre 5% et 15%.
- Les vapeurs de GNL sont inodores et incolores.

## 1.3. Les risques spécifiques au GNL

- Le GNL est inodore et incolore. Les vapeurs de GNL, à cause de leur très basse température, condensent l'eau contenue dans l'air, ce qui provoque l'apparition d'un nuage visible (brouillard).
- Le GNL et ses vapeurs ne sont pas toxiques.

- Si la concentration en CH<sub>4</sub> dans l'air dépasse 20%, il y a un risque d'asphyxie par déplétion d'oxygène.
- Du fait de sa très basse température, le GNL, provoque des gelures lorsqu'il entre en contact avec la peau ainsi qu'une fragilisation des matériaux (fissure du pont) lors de projection.
- Sous certaines conditions, lorsque le GNL est mélangé à l'eau, il peut se produire des Transitions Rapides de Phase, sorte d'explosions (mais sans phénomène de combustion) provoquant une onde de choc et des projections d'eau, de GNL, de gaz, mais dont les effets sont limités au champ proche.
- Les vapeurs de GNL sont inflammables :
  - En milieu non confiné, l'inflammation d'un nuage de vapeur de GNL provoque une déflagration lente avec des surpressions négligeables.
  - En présence d'obstacles ou dans un milieu confiné, la combustion du nuage de gaz peut provoquer une déflagration rapide voire une détonation avec de fortes surpressions.
  - Le principal danger de la combustion du nuage de vapeurs ou de la nappe de GNL est lié au rayonnement thermique très intense. En général on considère que :
    - Il n'y a pas d'effet sur les structures
    - Le seuil de létalité est limité à la taille du nuage.
- Les installations GNL ne sont pas sujettes au risque de BLEVE. En effet, les méthaniers sont sous faible pression et équipés de dispositifs empêchant la montée en pression, car incapables de travailler sous pression.
- Les stockages terrestres de GNL sont susceptibles d'être exposés au risque de roll-over. Ce phénomène, appelé aussi « basculement de couches », peut se produire lorsque deux GNL de type différent (compositions et donc masses volumiques différentes) sont stockés dans un même réservoir. Dans certains cas se produit une stratification qui, à terme, peut entraîner un basculement des deux couches, la couche inférieure se retrouvant brutalement soulagée de la pression hydrostatique générée par la couche supérieure. Dans ce cas, il y a une forte augmentation de la quantité de gaz évaporé pouvant engendrer une forte pression dans le réservoir. Il est très improbable que ce phénomène de roll-over se produise dans un navire pour deux raisons :
  - Il n'y a qu'une seule qualité de GNL qui est chargée dans les cuves (le talon n'ayant pas une épaisseur suffisante pour provoquer un roll-over) ;
  - Les mouvements du navire, en induisant des mouvements du GNL, ont pour effet de limiter le risque de stratification.

## 2. LES NAVIRES METHANIERES

### 2.1. Généralités

Les navires méthaniers transportent le GNL dans des cuves séparées. Celles-ci sont étanches et isolées thermiquement. La forme et la structure de l'isolation diffèrent selon le type de technologie considérée. Le GNL est transporté à une pression légèrement supérieure à la pression atmosphérique (de l'ordre de quelques dixièmes de bar au-dessus de la pression atmosphérique).

Les navires méthaniers sont des navires à double coque. Les cuves peuvent être autoporteuses (ie. elles supportent le poids de la cargaison) ou non (elles s'appuient sur la coque interne et n'ont qu'une fonction d'étanchéité).

La taille des navires est exprimée en terme de volume de cargaison emportée. Elle peut varier entre 25 000 m<sup>3</sup> et 155 000 m<sup>3</sup>, des navires d'une capacité de 210 000 m<sup>3</sup> ont d'ores et déjà été commandés. En terme de gabarit ceci correspond à des longueurs de l'ordre de 300 m environ.

Les technologies « membrane » et « Moss » représentent chacune environ la moitié de la flotte mondiale de navires méthaniers. Quelques rares navires sont encore équipés de cuves prismatiques.

Les risques environnementaux liés aux navires méthaniers ne sont pas spécifiques au type de cargaison transportée. En effet, le GNL n'est pas polluant, il s'évapore rapidement sans laisser de trace sur ou dans l'eau. Les vapeurs se dispersent dans l'atmosphère une fois réchauffées. Les pollutions susceptibles de se produire proviennent de la fonction navire (carburants des moteurs, etc.).

### 2.2. Les différentes technologies

#### 2.2.1. La technologie membrane

L'appellation « technologie membrane » regroupe en fait les technologies développées par Gaz Transport et Technigaz (sociétés qui ont fusionné pour devenir GTT). C'est sous cette appellation que sont rangées les technologies NO96 (ainsi que les précédentes : NO85, NO88, etc.), Mark III (et autre Mark I) et CS1.

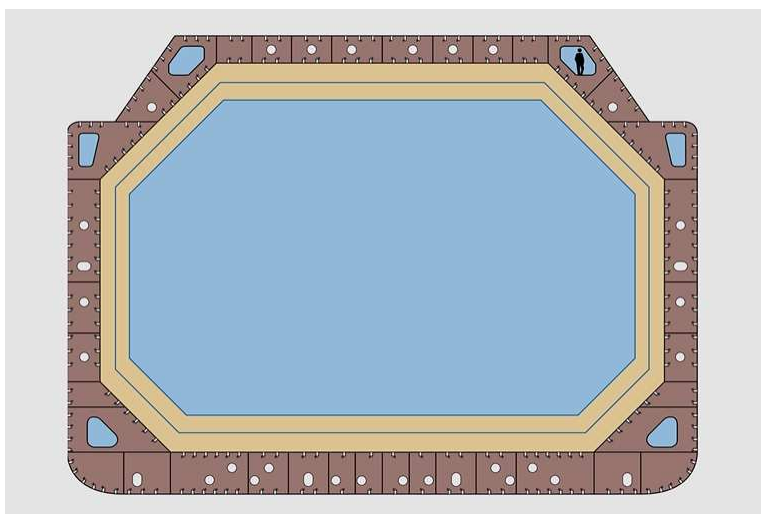


Figure 19 : Coupe d'une cuve type « membrane »

Cette technologie se caractérise par des cuves (4 ou 5 par navires), indépendantes les unes des autres, épousant les formes du navire (voir Figure 19 et Figure 20) et reposant sur la coque interne (cuves non autoportées). Ces cuves sont composées d'une fine membrane métallique (acier inox ou Invar) en contact avec le GNL, de deux couches d'isolation séparées par une membrane secondaire, le tout venant s'appuyer sur la coque interne (voir Figure 19). La membrane secondaire a pour fonction de confiner le GNL en cas de fuite sur la barrière primaire. Elles sont construites à l'intérieur de la coque interne. Cette coque-là est protégée de l'extérieur par la coque externe. L'espace entre ces deux coques est occupé par les ballasts.

Cette technologie permet d'optimiser le volume de cargaison emportée par rapport à la taille du navire.



Figure 20 : Navire méthanier à technologie membrane (Gaz Transport)

### 2.2.2. La technologie Moss-Rosenberg

Cette technologie est constituée de cuves sphériques (voir Figure 21 et Figure 22). Ces cuves sont autoportées et reposent sur une « jupe » métallique accrochée à la sphère au niveau de son équateur. La cuve interne, en contact avec le GNL est en aluminium ou en acier à 9% Nickel. Là encore, une couche d'isolant permet de limiter les entrées de chaleur. La partie entre la sphère et la coque interne est maintenue en air sec. Une deuxième barrière est constituée d'une rigole permettant de recueillir le GNL s'écoulant par une éventuelle fissure dans la cuve (voir

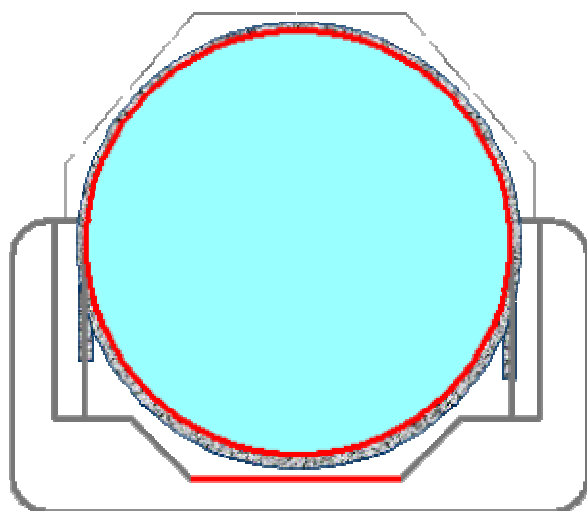


Figure 21).

**Figure 21 : Coupe d'une sphère Moss**

Les cuves sont construites à l'extérieur du navire et mise en place une fois terminée.



**Figure 22 : Navire méthanier à technologie Moss**

### 2.2.3. La technologie « prismatique »

A l'instar des sphères Moss, les cuves prismatiques sont des cuves autoporteuses pré-fabriquées hors du navire et posées toutes faites dans la coque. Elles ont une forme permettant d'optimiser le volume occupé. Très peu de navires en sont équipés, les navires en commande actuellement sont tous équipés des technologies Moss et membrane. La Figure 23 présente une coupe d'une cuve prismatique. On remarquera que la cuve repose sur la coque interne par le biais de cales et n'est pas en contact direct avec la coque interne.

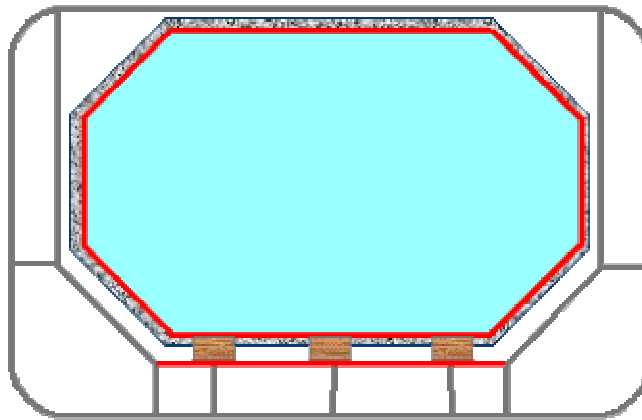


Figure 23 : Coupe d'une cuve prismatique

### 3. LES DISPOSITIFS DE SECURITE

---

Les navires méthaniers sont équipés de divers dispositifs de sécurité. Les plus visibles sont les mâts d'évents permettant d'évacuer le surplus de gaz évaporé lorsque celui-ci ne peut être brûlé par les machines et d'éviter ainsi une montée en pression des cuves. Il y a un évent par cuve, reliés à un collecteur. Ces événements sont complétés par des dispositifs de type soupapes.

Dans le registre de la sécurité intrinsèque, les navires méthaniers sont des navires à double coque. Cela offre non seulement une plus grande protection de la cargaison contre tout événement extérieur, mais aussi une plus grande rigidité du navire.

Ils sont par ailleurs équipés de divers moyens de lutte contre l'incendie auquel il convient d'ajouter les zones ATEX.

### 4. LES VOIES DE NAVIGATION

---

De par la structure de la chaîne GNL, c'est-à-dire usine de liquéfaction – navire méthanier – terminal méthanier, les routes maritimes se situent entre une usine et un terminal. Les navires suivent donc des routes bien identifiées entre les usines et les terminaux, ceux-ci étant en nombre limité.

Dans un passé récent, les contrats long terme entre fournisseurs et acheteurs de gaz définissaient les routes empruntées par les navires, les navires se limitant aux allers-retours entre une usine et un terminal. Depuis l'apparition du marché « spot », les navires peuvent charger à une usine et décharger dans n'importe quel terminal, en fonction des besoins du marché et de l'évolution du prix du GNL (à condition, bien sûr, que le port puisse accueillir le navire en question, notamment en terme de tirant d'eau, etc.). Les contrats long terme représentent cependant toujours une part largement majoritaire des flux.





19 AVRIL 2007

Le transport des gaz liquéfiés et des produits évaporants par navire

3ème partie  
le transport des gaz liquéfiés autres que le GNL  
AT 05213 DT4/06/03588

RÉSUMÉ	<p>Cette note décrit dans sa première partie les principes régissant la conception des navires destinés au transport en vrac des gaz liquéfiés.</p> <p>Les seconde et troisième parties présentent d'une manière générale le transport par navire du GNL et des autres produits.</p> <p>Les produits évaporants autres que les gaz liquéfiés sont transportés dans des navires chimiques, qui font l'objet de la dernière partie de ce document.</p>
--------	--

	NOM	VISA	DATE
RÉDACTEUR	D. de Castelet		19/04/2007
VÉRIFICATEUR	P. Ricou		

Révision	Date
0	28/12/2006
1	19/04/2007

## TABLE DES MATIERES

<b>1.INTRODUCTION</b>	<b>132</b>
1.1. Navires mono produit et navires polyvalents	132
1.2. les choix du type de citerne pour transporter un gaz liquéfié	132
1.3. les différents types de navire gaziers	133
<b>2.LES NAVIRES</b>	<b>134</b>
2.1. les navires pressurisés	134
2.2. les navires semi-pressurisés	134
2.3. les éthyléniers	135
2.4. les navires réfrigérés	136
<b>3.LES GAZ LIQUEFIES ET LEUR TRANSPORT PAR NAVIRE</b>	<b>136</b>
3.1. Le transport du butane et du propane	137
3.2. Le transport de l'ammoniac	137
3.3. Le transport du chlorure de vinyle	137
3.4. Le transport de l'éthylène	138
3.5. Le transport du propylène	138
<b>4.REFERENCES</b>	<b>139</b>

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Navires mono produit et navires polyvalents

A quelques exceptions près [(voir note (1))], les méthaniers constituent une catégorie de navires destinés au transport d'un seul produit.

Les autres navires transporteurs de gaz sont en général polyvalents, c'est-à-dire que leur conception permet le transport de plusieurs produits différents, éventuellement de façon simultanée dans des citernes différentes.

Ils sont parfois dénommés en fonction du produit transporté de façon préférentielle. On trouve ainsi :

- des propaniers, butaniers ou GPLiers - (« LPG carriers ») : conçus principalement pour le transport du propane, du butane ou du GPL
- des éthyléniers (« Liquid Ethylene carrier » ou « LEG carrier ») : conçus pour permettre le transport de l'éthylène, produit qui se caractérise par une température d'ébullition à la pression atmosphérique (-104°C), sensiblement plus basse que celle de tous les autres gaz, à l'exception du méthane

Malgré leur dénomination, la liste des produits transportables dans ces navires est rarement limitée à un seul gaz.

Il n'existe pas de nom particulier pour les navires qui permettent le transport des autres gaz liquéfiés. Cependant, du fait qu'ils permettent aussi le transport du GPL et que ces produits constituent une partie importante du volume transporté des gaz liquéfiés, les termes propanier, butanier ou GPLier sont communément employés.

Note (1) : quelques navires méthaniers très anciens, équipés de citernes expérimentales, peuvent aussi transporter des gaz liquéfiés plus denses que le GNL. Il existe aussi des projets de navires conçus pour le transport du GNL, de l'éthylène et du GPL.

### 1.2. le choix du type de citerne pour transporter un gaz liquéfié

La sélection du type de citerne convenant au transport d'un produit est faite en fonction :

- des propriétés physiques des produits transportés
- des quantités transportées
- de l'évaluation des risques liés au transport des produits considérés.

Propriétés physiques :

La température critique de l'éthylène est, comme pour le méthane (GNL), inférieure à la température ambiante. Il ne peut donc pas exister à l'état liquide en étant simplement pressurisé et doit être réfrigéré.

L'éthane a une température critique proche de l'ambiante et doit aussi être transporté en étant réfrigéré.

Les autres gaz peuvent être transportés dans des citernes sous pression sans nécessité absolue d'être réfrigérés.

Quantités transportées :

Si les besoins industriels sont importants, l'utilisation de citernes sous pression, de capacités limitées, n'est pas appropriée et il sera fait appel à des citernes réfrigérées qui permettent le transport de grandes quantités de gaz liquéfié.

Risques liés au transport d'un produit :

La réglementation impose à certains gaz, du fait des risques liés à leur manutention, d'être transportés dans des citernes sous pression uniquement. La quantité de produit chargée est parfois limitée à quelques milliers de mètres cube par navire. Aucun des produits étudiés dans le cadre du projet Galerne n'entre dans cette catégorie.

### 1.3. les différents types de navire gaziers

Les navires transporteurs de gaz peuvent être regroupés en 5 catégories :

- les méthaniers
- les navires pressurisés (« fully pressurized ships »)
- les navires semi-pressurisés (« semi pressurized ships »)
- les éthyléniers (« ethylene carrier », « LEG carrier »)
- les navires réfrigérés (« fully refrigerated »)

Ce classement, qui prend en compte aussi bien la nature de la cargaison que les conditions de transport est cependant couramment rencontré dans la littérature [voir par exemple référence 1].

Une description des méthaniers est faite dans la seconde partie de cette note.

Le second chapitre de cette partie traite des 4 autres types de navires et le chapitre suivant récapitule les conditions du transport par navire des produits étudiés dans le cadre du projet Galerne.

## 2. LES NAVIRES

### 2.1. les navires pressurisés

Les navires pressurisés utilisent des citernes sous pression de type C, dont la pression maximale de service typique est de l'ordre de 18 à 20 bar.

La cargaison est transportée à la température ambiante.

Les citernes sont conçues de façon à pouvoir supporter la pression correspondant à toute température susceptible d'être subie par le navire ; la limite habituellement considérée est 45°C (des températures différentes sont utilisées dans des cas particuliers). Les gaz d'évaporation sont donc contenus dans les citernes.

La conception de ces navires est assez simple, puisqu'ils n'ont ni double coque complète, ni isolation, ni barrière secondaire, ni installation de re-liquéfaction.

La réalisation de citernes pouvant résister à la pression de service rend les navires pressurisés lourds et ne permet pas d'obtenir des capacités de transport élevées : 10 000 m<sup>3</sup> représente un maximum et les dimensions standards permettent le transport de 4 000 m<sup>3</sup> à 6 000 m<sup>3</sup> dans 2 ou 3 citernes.

Les citernes n'étant pas utilisées à basse température, elles peuvent être construites en acier au carbone.

Les conditions de température et de pression lors du chargement et du déchargement ne peuvent pas être gérées. L'exploitation des navires pressurisés est donc moins souple que celle d'autres types de navires.

Les navires pressurisés sont généralement utilisés pour le transport du GPL et de l'ammoniac.

### 2.2. les navires semi-pressurisés

Les navires semi-pressurisés sont très semblables aux navires pressurisés, puisqu'ils utilisent également des citernes de type C. La pression maximale de service est cependant limitée à environ 7 bar.

Les premiers navires semi-pressurisés (début des années 1960) transportaient les gaz à un état semi-pressurisé / semi-réfrigéré. Les progrès effectués notamment au niveau des matériaux et des équipements permettent la conception de navires semi-pressurisés / réfrigérés (« semi-pressurised / fully refrigerated », ou SP / FR) dans lesquels le gaz peut être indifféremment transporté à la pression atmosphérique (état réfrigéré), ou sous-pression.

L'expression « navire semi-pressurisé » se rapporte à cette catégorie de navires.

Une réduction de l'épaisseur des citernes est possible au prix d'une isolation thermique et d'une installation de réfrigération.

Ils n'ont pas de barrière secondaire et ne sont pas forcément équipés d'une double coque complète, sauf si le transport de l'éthylène est prévu.

La réduction de la pression maximale de service des citernes par rapport aux navires pressurisés permet la réalisation de citernes de plus grande taille. Les navires semi-pressurisés peuvent typiquement transporter des cargaisons de 3 000 m<sup>3</sup> à 15 000 m<sup>3</sup> de gaz liquéfié; il existe quelques navires ayant une capacité de transport de 30 000 m<sup>3</sup>.

Les citernes doivent être construites avec des matériaux résistant à la température minimale de service : aciers basse température (-48°C), aciers alliés spéciaux (-104°C) ou aluminium sont utilisés.

La faculté qu'ont ces navires à s'adapter aux conditions de chargement / déchargement du terminal (température et pression) leur donne une grande souplesse d'exploitation.

Les navires semi-pressurisés permettent le transport d'une grande variété de gaz liquéfiés : GPL, éthylène, propylène, chlorure de vinyle, butadiène ...

### 2.3. les éthyléniers

A cause de la faible valeur de sa température critique, l'éthylène doit être réfrigéré. Il est habituellement transporté à la pression atmosphérique dans des citernes indépendantes de type C, qui peuvent donc être pressurisées.

Le choix de ce type de citerne est motivé par :

- le fait que l'industrie ne demande pas de très grandes quantités d'éthylène et que des navires de capacité limitée (quelques milliers de mètres cube) suffisent à ses besoins
- la relative facilité de concevoir des navires équipés de citernes de type C résistant à la très basse température de transport de l'éthylène (- 104°C) et pour lesquels aucune barrière secondaire n'est exigée

Une autre conséquence de la faible température d'ébullition de l'éthylène est que les navires destinés à leur transport doivent être équipés d'une installation de re-liquéfaction de grande capacité, les quantités de vapeurs traitées par cette installation étant plus importantes que pour les autres produits.

La capacité de transport des éthyléniers varie dans une fourchette allant de 1 000 à 12 000 m<sup>3</sup>. Il existe des projets de navires avec des capacités jusqu'à 22 000 m<sup>3</sup>.

En Europe de l'ouest, la taille des navires habituellement rencontrés se situe dans la gamme des 5000 m<sup>3</sup>.

Une isolation thermique est prévue pour limiter l'évaporation et limiter le refroidissement de la structure du navire.

Les éthyléniers doivent être pourvus d'une double coque complète, puisque la température de transport est inférieure à - 55°C (voir partie 1, § 3.3.2).

Les éthyléniers sont en général construits pour des routes spécifiques.

En plus de leur capacité à transporter l'éthylène à sa température d'ébullition, les éthyléniers peuvent transporter de nombreux autres gaz liquéfiés et sont capables de charger ou décharger à pratiquement tous les terminaux pressurisés ou réfrigérés, ce qui fait d'eux les navires semi-pressurisés les plus sophistiqués.

## 2.4. les navires réfrigérés

Les navires réfrigérés transportent leur cargaison à une pression proche de la pression atmosphérique.

La pression maximum de service ne doit pas excéder 0,7 bar.

Les citernes le plus communément employées sont du type A, mais d'autres systèmes ont parfois été utilisés, sans toutefois obtenir la faveur des opérateurs de navires.

Un navire réfrigéré a typiquement entre 3 et 6 citernes indépendantes de type A prismatiques, isolées thermiquement. Il possède aussi une installation de liquéfaction.

Si la température de transport est inférieure à -10°C, une barrière secondaire complète est obligatoire et le navire doit avoir des double fonds, qui servent de ballasts à eau de mer (voir partie 1 §3.3.2). Une simple coque est en général prévue avec parfois des ballasts latéraux.

L'espace entre la citerne et la barrière secondaire est sous atmosphère inerte quand le produit transporté est inflammable.

Des réchauffeurs et pompes de reprise sont souvent installés de façon à permettre le déchargement dans des installations pressurisées et augmenter la flexibilité du navire.

Les navires réfrigérés sont conçus pour le transport sur de longues distances de grandes quantités de GPL ou d'ammoniac : plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup>.

## 3. LES GAZ LIQUEFIÉS ET LEUR TRANSPORT PAR NAVIRE

### 3.1. Le transport du butane et du propane

Le transport du butane et du propane représente une grande part du transport des gaz liquéfiés. Il était estimé en 2000 à environ 44 millions de tonnes par an, soit environ 25% de la production mondiale (voir note en fin de chapitre).

Il s'effectue aussi bien dans des citernes réfrigérées (type A) que dans des citernes sous pression (type C).

Les navires réfrigérés permettent le transport de très grandes quantités de GPL, pouvant atteindre 84 000 m<sup>3</sup>.

Les navires pressurisés ou semi-pressurisés sont utilisés lorsque le volume transporté est plus faible, de quelques milliers de m<sup>3</sup> (navires pressurisés) jusqu'à 20 000 m<sup>3</sup> (navires semi-pressurisés).

Lorsque le navire est équipé de citernes réfrigérées ou semi-pressurisées, une installation de re-liquéfaction est installée pour assurer la régulation de la température et de la pression dans les citernes.

Les navires pressurisés peuvent quant à eux être munis de réchauffeurs de cargaison pour permettre le chargement à partir d'un terminal de type réfrigéré.

Le transport du butane et du propane requiert l'utilisation de navires du type 2G/2PG (voir partie 1, §3.2).

### 3.2. Le transport de l'ammoniac

Le transport de l'ammoniac représente aussi une part très importante du trafic des gaz liquéfiés (environ 12 millions de tonnes par an, 10% de la production mondiale).

Il s'effectue dans les mêmes types de navires que celui du propane ou du butane : navires réfrigérés, semi-pressurisés ou pressurisés.

A cause de la réactivité de l'ammoniac avec certains métaux, des règles spéciales doivent être respectées lors de la conception des installations de stockage ou de transfert de la cargaison. Ces règles concernent le choix et les caractéristiques des matériaux utilisés.

De même, en raison de la toxicité de l'ammoniac, les navires destinés à son transport doivent respecter quelques règles supplémentaires relatives à la protection du personnel [Référence R-1] : appareils respiratoires et équipements de sécurité additionnels, douches de décontamination, protection oculaire etc...

Le transport de l'ammoniac requiert l'utilisation de navires du type 2G/2PG (voir partie 1, §3.2)

### 3.3. Le transport du chlorure de vinyle

Environ 2 millions de tonnes de chlorure de vinyle sont transportées chaque année par navire, soit environ 10% de la production mondiale.

Des dispositions spéciales doivent être prises en ce qui concerne les matériaux utilisés sur les navires destinés à le transporter.



Le chlorure de vinyle ne peut être transporté que dans des citernes indépendantes [Référence 2], ce qui interdirait l'utilisation de systèmes à membranes ou de cuve intégrées ; les citernes type A ou C conviennent cependant.

Sa forte réactivité avec l'oxygène (polymérisation) impose un maintien permanent des citernes en surpression, y compris lors du voyage retour sur ballasts grâce à du gaz inerte dont la teneur en oxygène ne doit pas dépasser 0.1% en volume (0.2% si un inhibiteur est utilisé).

Des dispositions relatives à la protection du personnel, similaires à celles qui sont applicables aux navires transportant de l'ammoniac, doivent être respectées pour le transport du chlorure de vinyle [Référence R-3].

Une autre particularité du chlorure de vinyle est sa forte densité (0.97) par rapport aux autres gaz liquéfiés, ce qui oblige à adapter la structure du navire en conséquence.

L'utilisation de navires du type 2G/2PG (voir partie 1, §3.2) est requise pour le transport du chlorure de vinyle.

### 3.4. Le transport de l'éthylène

La quantité d'éthylène transportée annuellement est d'environ 2.5 millions de tonnes, ce qui représente une faible part (environ 3%) de la production.

L'éthylène est transporté dans les éthyléniers, navires du type semi-pressurisés, utilisés à la pression atmosphérique (voir §2.1).

Du point de vue de la résistance à la collision et à l'échouement, le transport de l'éthylène requiert l'utilisation de navire du type 2G.

### 3.5. Le transport du propylène

La quantité de propylène transportée annuellement est d'environ 1.5 millions de tonnes, ce qui représente aussi environ 3% de la production.

Les navires sont généralement du type semi-pressurisés.

L'utilisation de navires du type 2G/2PG (voir partie 1, §3.2) est requise pour le transport du propylène.

Note : les données sur les quantités transportées annuellement proviennent du document en référence 1 ci-dessous, publié en 2000.

## 4. REFERENCES

- (1) Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals - McGuire and White - third edition - 2000

### Références réglementaires

R-1 : Code IGC §14.4.2 à 14.4.4

R-2 : Code IGC §17.3.1

R-3 : Code IGC §14.4.2 et 14.4.3

# CHAPITRE 4



ATA 1160A  
 Rapport DEL-L.5-02  
 DR/ABr-LP  
 DT4/DDC



GALERNE  
 T1.5 Etablissement des Scénarios d'Accident  
 Rapport final



## Etablissement des Scénarios d'Accident

### Méthaniers GPLiers Chimiquiers

Issue	0	1	2
Date	15/11/06	13/02/07	15/06/07
Author	A. Breuillard	L. Prat	A. Breuillard
Verified by	Guy Parmentier	A. Breuillard	Damien de Castelet

## Table des matières

<b>1.INTRODUCTION</b>	<b>146</b>
<b>2.METHODOLOGIE POUR L'ETABLISSEMENT ET LA SELECTION DES SCENARIOS D'ACCIDENTS ENTRAINANTS UNE FUITE DE PRODUIT</b>	<b>148</b>
<b>2.1.Critères généraux pour le choix des scénarios</b>	<b>148</b>
<b>2.2.Principes méthodologiques et application</b>	<b>148</b>
2.2.1. Typologie des risques	148
2.2.2. Structure formelle d'un scénario d'accident	149
2.2.3. Procédure de sélection des scénarios	149
<b>3.SCENARIOS D'ACCIDENTS SELECTIONNES</b>	<b>150</b>
<b>3.1.Transport de Gaz Naturel Liquéfié « navires GNL »</b>	<b>150</b>
3.1.1. Contexte de l'analyse	150
3.1.2. Structure type d'un méthanier à membrane	150
3.1.3. Principaux éléments retenus pour le cas d'un méthanier	151
3.1.4. Scénarios sélectionnés pour les méthaniers	151
<b>3.2.Transport de Gaz de Pétrole Liquéfiés « navire GPL »</b>	<b>154</b>
3.2.1. Equipe d'Experts	154
3.2.2. Structure type des GPLiers par type de produit	154
3.2.3. Principaux éléments analysés pour le cas d'un GPLier	155
3.2.4. Scénarios sélectionnés pour les GPLiers	156
<b>3.3.Transport de produits chimiques « navires chimiques »</b>	<b>158</b>
3.3.1. Equipe d'Experts	158
3.3.2. Structure type des Chimiquiers par type de produit	158
3.3.3. Principaux éléments analysés pour le cas d'un Chimiquier	159
3.3.4. Scénarios sélectionnés pour les Chimiquiers	160
3.3.5. Valeurs de référence pour les rejets accidentels des chimiques	163
<b>4.CONCLUSION</b>	<b>165</b>
<b>5.REFERENCES</b>	<b>166</b>
<b>6.ANNEXE 1 : ELEMENTS D'ANALYSES POUR L'ETABLISSEMENT DES SCENARIOS METHANIERES ET GPLIERS REFRIGERES</b>	<b>167</b>
<b>7.ANNEXE 2 : ELEMENTS D'ANALYSES POUR L'ETABLISSEMENT DES SCENARIOS GPLIERS</b>	<b>185</b>
<b>8.ANNEXE 3 : ELEMENTS D'ANALYSES POUR L'ETABLISSEMENT DES SCENARIOS CHIMIQUIERS</b>	<b>188</b>
<b>9.ANNEXE 4 : CALCUL DES VOLUMES DE REFERENCE CONCERNANT LES REJETS ACCIDENTELS DE PETROLE</b>	<b>191</b>

## Table des Scénarios Retenus

Scénario 1 : Méthaniers : Collision – au-dessus flottaison – brèche cm <sup>2</sup> .....	151
Scénario 2 : Méthaniers : Collision – en-dessous flottaison – brèche m <sup>2</sup> .....	152
Scénario 3 : Méthaniers : Collision – au-dessus flottaison – brèche m <sup>2</sup> .....	152
Scénario 4 : Méthaniers : Echouement – en-dessous flottaison – brèche m <sup>2</sup> .....	153
Scénario 5 : Méthaniers : Fuite de pont .....	153
Scénario 6 : GPLiers type C – Ammoniac – Collision – Impact sous flottaison .....	156
Scénario 7 : GPLier type C – Chlorure de Vinyle – Collision .....	156
Scénario 8 : GPLier Type C – Butane ou Propane ou Propylène – Collision .....	157
Scénario 9 : GPLier Type C – Ethylène – Collision .....	157
Scénario 10 : Chimiquier – Xylènes – Collision – Impact au dessus ligne flottaison .....	160
Scénario 11 : Chimiquier – Xylènes – Collision – Impact sous ligne flottaison .....	160
Scénario 12 : Chimiquier – Benzène – Collision – Impact au dessus de ligne flottaison .....	161
Scénario 13 : Chimiquier – Benzène – Collision – Impact sous ligne flottaison .....	161
Scénario 14 : Chimiquier – Benzène – Explosion – Effet domino .....	162
Scénario 15 : Chimiquier – Benzène – Benzène – Fuite circuit – Incendie .....	162

## Table des figures

Figure 1 : Schéma de principe d'un accident et les moyens d'intervention et de communication .....	147
Figure 2 : Chronologie des événements qui suivent un accident nautique .....	149
Figure 3 : Méthanier type : membrane, 4.5 cuves, 45 000m <sup>3</sup> par cuve, 300 m. ....	150
Figure 4 : Flotte Mondiale et commandes de Méthaniers 2006, (Colton [ 2 ]).....	168
Figure 5 : Flotte Mondiale et commandes de navires GPL réfrigérés 2006, (Colton [ 2 ]) .....	168
Figure 6 : Architecture dans la flotte mondiale Méthaniers 2006, [ 2 ].....	170
Figure 7 : Types d'architecture dans le carnet de commandes Méthaniers 2006-2010, [ 2 ].....	171
Figure 8 : Port en lourd dans la flotte mondiale Méthaniers 2006, [ 5 ] .....	171
Figure 9 : Répartition des longueurs des navires dans la flotte mondiale Méthaniers 2006, [ 5 ] .....	172
Figure 10 : Méthanier type : membrane, 5 cuves, 45 000m <sup>3</sup> par cuve (sauf cuve 1), 300 m. ....	172
Figure 11 : Chronologie des événements qui suivent une collision.....	173
Figure 12 : Données géométriques de collision.....	174
Figure 13 : Formes des navires impactants.....	175
Figure 14 : Coupe au niveau d'une membrure (à gauche) et entre deux membrures (à droite) .....	175
Figure 15 : Différents cas d'impact dans différentes zones selon différentes configurations.....	177
Figure 16 : Impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle.....	177
Figure 17 : Impact au dessous de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle.....	177
Figure 18 : Impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve vide, avec ou sans obstacle.....	178
Figure 19 : Impact au dessous de la ligne de flottaison, cuve vide, avec ou sans obstacle.....	178
Figure 20 : Année de construction de la flotte de GPLier 2006, [ 5 ].....	185
Figure 21 : Répartition des Longueurs des navires dans la flotte mondiale GPLier 2006, [ 5 ].....	186
Figure 22 : Port en lourd des navires qui ont transporté du GPL en 2006 pour Total [ 16 ].....	187
Figure 23 : Année de construction de la flotte de Chimiquier 2006, [ 5 ].....	188
Figure 24 : Répartition des ports en lourd des Chimiquiers purs flotte 2006, [ 5 ].....	189
Figure 25 : Répartition des ports en lourd des Chimiquiers pétroliers flotte 2006, [ 5 ].....	190

## Glossaire

GALERNE	<b>GAz et Liquides Evaporants et Risques de Nuisances Environnementales et humaines</b>
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié : Tous les produits gazeux issue de la distillation du pétrole ici butane, propane, propylène, éthylène, plus l'ammoniac et le chlorure de vinyle.
BLEVE	<i>Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion</i> : Ebullition-explosion violente d'un liquide - avec en général inflammation, si le produit est inflammable.
TRP	Transition Rapide de Phase : ici, brusque vaporisation d'un liquide permise par un apport d'énergie en quantité suffisante. Le phénomène est plus ou moins rapide selon les quantités et provoque des ondes de pression plus ou moins violentes.
HCl	Chlorure d'hydrogène : ici, produit de combustion du Chlorure de Vinyle. Gaz extrêmement irritant.
ARI	Appareil de Respiration Autonome.



## 1. Introduction

### Rappel sur les objectifs du projet

Galerie est un projet de recherche orienté sur la modélisation et l'expérimentation. Il vise à améliorer la connaissance et les procédures d'intervention sur les accidents en mer impliquant des navires qui transportent des produits chimiques évaporant.

Le projet est découpé en trois parties : La première s'intéresse aux scénarios à prendre en compte, la deuxième aux modèles de dispersion atmosphérique et la troisième à la mise en place de fiches synthétiques d'intervention et d'outils pour la cartographie de la dispersion.

### Rappel sur les objectifs de la sous-tâche 1.5

La tâche 1.5 élabore les scénarios d'accident conduisant à une fuite de la cargaison. Elle fait suite à la tâche 1.1 qui cadre le projet, à la tâche 1.2 qui apporte l'analyse des données sur les accidents passés, et aux tâches 1.3 et 1.4 qui portent sur la technologie des navires transportant des substances chimiques auxquelles on s'intéresse. Ces cinq sous-tâches sont synthétisées aux travers de la tâche 1.5 qui porte sur la sélection des scénarios à prendre en compte pour la phase de modélisation et d'expérimentation (T2).

INPUTS : Cadre du projet, retour d'expérience Galerie T1.2, rapports techniques transports et produits T1.3, T1.4.

OUTPUTS : Scénarios d'intérêt : Dimension fuite, mode de fuite, débit de fuite.

### Structure du rapport

Le document se découpe en deux parties : la première présente la méthode de description et de sélection des scénarios, la deuxième présente la sélection appliquée aux trois grands groupes de navires transportant des produits évaporants. Trois sous parties synthétisent les scénarios impliquant des navires GNL (dits Méthaniers), ceux qui impliquent les navires GPL, où l'on distingue les navires réfrigérés (proche des méthaniers) et les navires pressurisés, et enfin ceux qui concernent les navires chimiquiers en se limitant à la liste des produits considérés dans le projet (cf. sous-tâche 1.4).

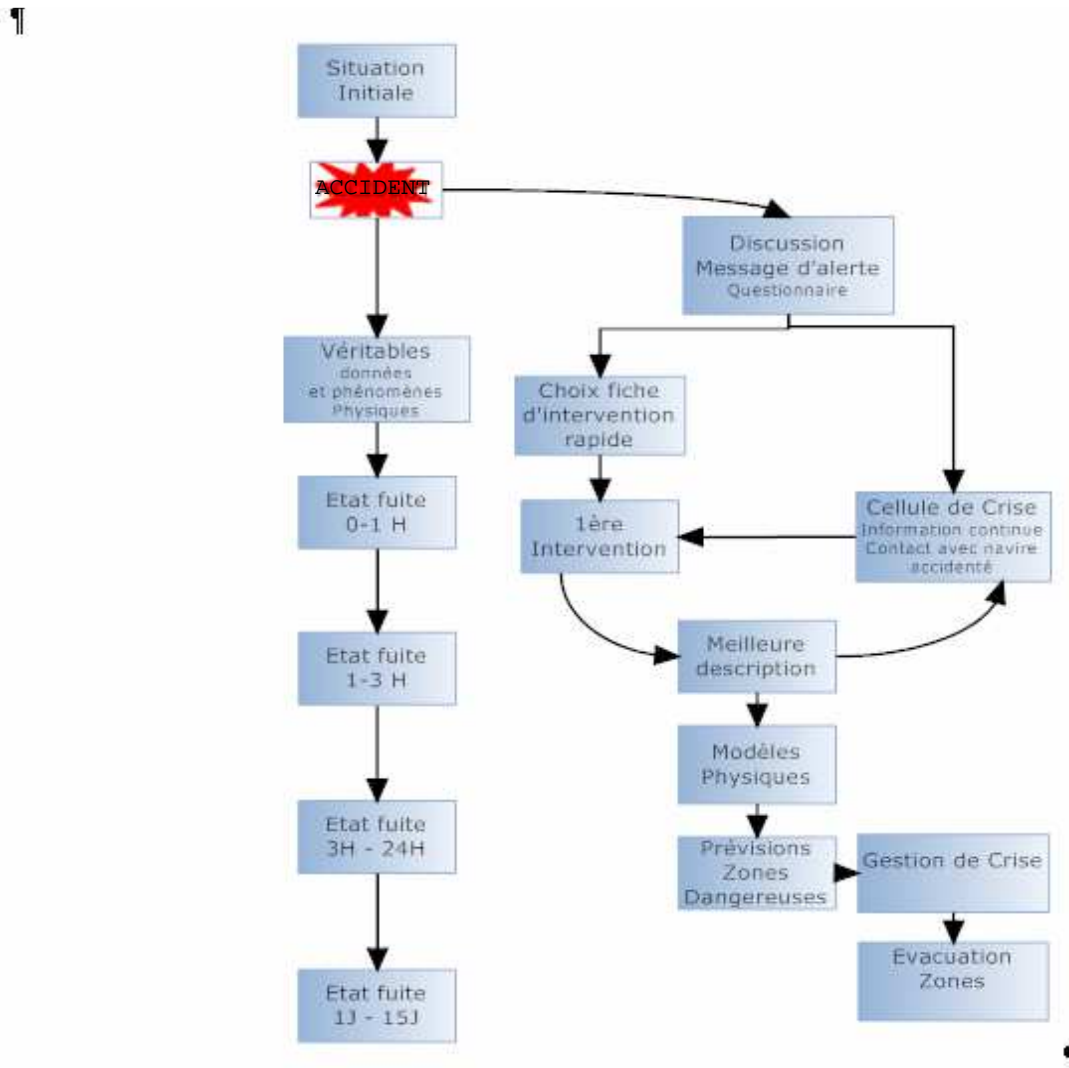
### Point d'entrée

Le lecteur est invité à se référer au document *GALERNE T1.2 Retour d'Expérience des Accidents Passés* [ 2 ] avant de parcourir celui-ci. Le point essentiel est qu'il n'y a pas assez de données statistiques sur les accidents méthaniers et GPLiers pour conclure sur les scénarios les plus probables. Pour ces deux types de navires, une analyse qualitative basée sur le retour d'expérience, le jugement d'expert et sur l'emploi de méthode d'analyse événementielle (non probabilisée) est utilisée.

Pour les chimiquiers, l'analyse statistique permet de s'orienter vers une probabilité d'événement incitateur. Les scénarios sont ensuite établis comme pour les deux autres types de navires sur la base des retours d'expérience, du jugement d'expert et des méthodes d'analyse événementielle.

Représentation schématique des objectifs du projet

Le diagramme ci-dessous décrit suivant deux branches les objectifs du projet, à savoir, augmenter la connaissance et la prévision des effets à court moyen et long terme d'une fuite impliquant un produit évaporant. Il y a d'un côté les grandeurs physiques et leurs valeurs réelles sur un accident donné, et de l'autre, l'information obtenue sur l'accident par les différents moyens de communication des services d'opération. Galerie vise à améliorer la connaissance sur les processus physiques de fuites, d'une part, et d'autre part, à les lier aux différents moyens de prise d'information et de communication sur un accident réel.



**Figure 1:: Schéma de principe d'un accident et les moyens d'intervention et de communication**

Les scénarios qui seront mis en place doivent à la fois permettre de décrire des dispositifs expérimentaux et des hypothèses de calcul représentatives d'accidents réels, et permettre la mise en place de questionnaires d'opérations qui leur correspondent.

## 2 Méthodologie pour l'établissement et la sélection des scénarios d'accidents entraînant une fuite de produit

### 2.1. Critères généraux pour le choix des scénarios

Voici quelques rappels qui définissent la tâche 1.5 dans le projet Galerie. Les accidents concernés par l'étude doivent respecter les critères suivants :

- i- *accident ayant déjà été observé ou étant jugé réaliste sur un navire du type de ceux qui sont concernés par le projet*
- ii- *origine de l'accident limitée à la collision, sauf si les statistiques d'accidents ou les études des différents systèmes de cargaison démontrent que d'autres cas d'accident pourraient entraîner des effets similaires (hors agression)*
- iii- *scénarios ne prenant pas en compte les cas de mélange de produits ou de réaction avec l'air ou avec l'eau.*

*Si l'explosion d'une cuve reste possible mais vraisemblablement peu probable en tant que cause initiale d'accident, une fois le produit libéré hors de la cuve les risques d'incendie / explosion seront pris en compte notamment en termes de conséquences sur les autres cuves du navire.*

### 2.2. Principes méthodologiques et application

#### 2.2.1. Typologie des risques

Pour l'étude des scénarios probables d'accident à considérer dans le cadre du projet Galerie, les différents risques doivent être regroupés en deux catégories :

Les risques opérationnels : il s'agit des risques qui sont intrinsèquement liés aux opérations spécifiques d'un type de navire et de sa cargaison. Par exemple, un porte-conteneur et un navire chimiquiers génèrent des risques liés aux opérations spécifiques de l'un et l'autre type (présence et transferts de produits toxiques ou inflammables dans le cas d'un tanker chimiquier).

Les risques nautiques : il s'agit des risques dont la cause ou l'événement initiateur sont communs à tous les types de navires. Les tempêtes, les échouements et les collisions sont susceptibles d'affecter tous les navires, alors même que les conséquences seront différentes.

Cette distinction permet de mieux organiser l'analyse et de se représenter plus objectivement les situations à l'étude.

### 2.2.2. Structure formelle d'un scénario d'accident

La description d'un scénario est complexe et nécessairement empreinte d'incertitude. Le tableau suivant récapitule les principales étapes de la méthode proposée :

Niveau 0	Caractérisation du navire type (dimensions, capacité, arrangement général, type et conditions d'opérations).
Niveau 1	Facteurs caractérisant l'événement initiateur = événement / situation à partir de laquelle le scénario se développe.
Niveau 2	Conséquences immédiates possibles.
Niveau 3	Facteurs déterminants, aggravant ou accélérant du scénario.
Niveau 4	Risques à moyen terme

Il est tout à fait clair que cette formalisation est générale et doit être précisée dans sa mise en œuvre pratique. Le schéma illustre cette méthodologie sous la forme d'une chronologie linéaire :

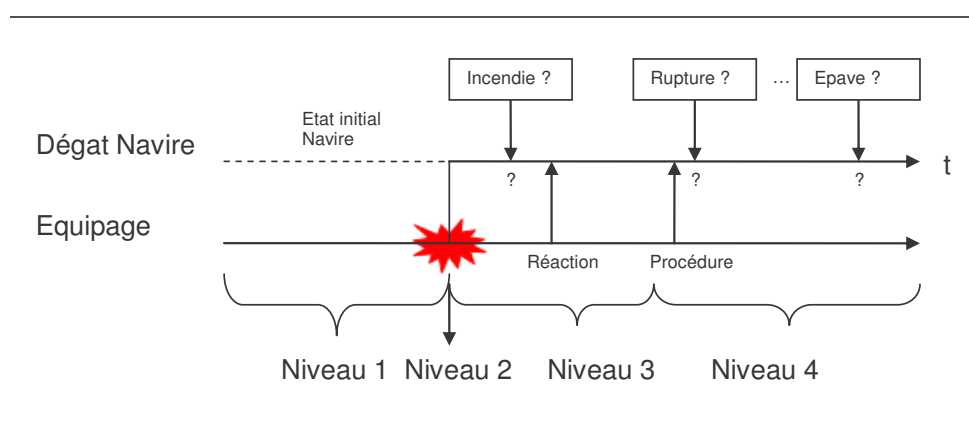


Figure 2 : Chronologie des événements qui suivent un accident nautique

### 2.2.3. Procédure de sélection des scénarios

Pour obtenir les résultats qui sont présentés dans ce rapport, Bureau Veritas a mis en place une procédure type, analogue à la méthodologie conseillé par l'Organisation Maritime Internationale mais simplifiée et adaptée aux objectifs de l'étude. Cette procédure comprend deux étapes :

Analyse préliminaire des dangers et des risques : effectuée en interne au Bureau Veritas, cette phase permet d'identifier sans restriction a priori tous les problèmes qui se réfèrent à l'objet de l'étude. Couplée au retour d'expérience, cette phase a pour but de présenter tous les scénarios possibles au groupe d'experts.

Réunion d'experts de type « brainstorming » : il s'agit d'une analyse qualitative permettant d'affiner les scénarios et de retenir les plus intéressants (qui présentent un niveau de risque le plus élevé) qui feront l'objet d'une analyse plus poussée, notamment grâce à des méthodes quantitatives et essais.

### 3. Scénarios d'accidents sélectionnés

Dans cette section, nous présentons les résultats de notre analyse à l'issue des réunions d'experts qui ont été organisées pour chacun des trois types de navires considérés. Les éléments plus détaillés de l'analyse sont disponibles en annexe.

#### 3.1. Transport de Gaz Naturel Liquéfié « navires GNL »

##### 3.1.1. Contexte de l'analyse

Cette partie résume le brainstorming effectué le 1<sup>er</sup> Décembre 2007 avec les experts dans les domaines :

- transport de GNL (GdF)
- enquête post accident (BEA mer)
- risque chimique (Ineris)
- intervention (DDSC)
- pollution en mer (*Cedre*)
- sécurité des transports de produits gazeux (BV)
- analyse de risque (BV)

La méthodologie établie pour les méthaniers présentée en annexe 1, §0, les documents techniques sur le mode de transports et le retour d'expérience [ 2 ] ont été utilisés pour parvenir à cette synthèse.

##### 3.1.2. Structure type d'un méthanier à membrane

Il a été décidé de se concentrer sur un seul type de méthanier dont le système de confinement est dit de type « membrane », cf. justification en annexe 1, §6.

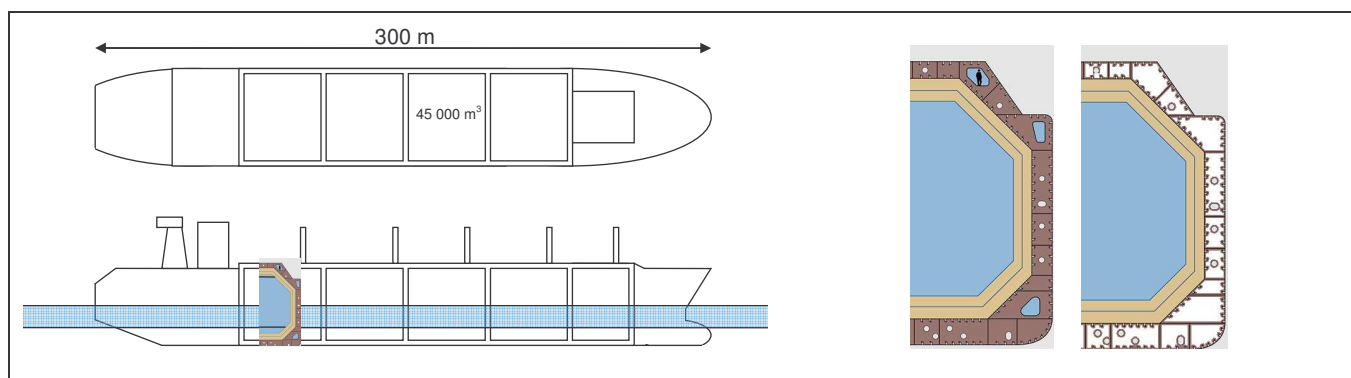


Figure 324 : Méthanier type : membrane, 4.5 cuves, 45 000m<sup>3</sup> par cuve, 300 m.

### 3.1.3. Principaux éléments retenus pour le cas d'un méthanier

Niveau 1 <i>Événement initiateur</i>	Niveau 2 <i>Conséquences immédiates</i>	Niveau 3 <i>Facteurs aggravants</i>	Niveau 4 <i>Risques à moyen terme</i>
Collision	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuite latérale (sous ou au-dessus ligne de flottaison)</li> <li>Débit de fuite (faible ou important)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inflammation du rejet gazeux, feu de nappe</li> <li>Transition Rapide de Phase (TRP)</li> <li>Rupture fragile de la coque</li> <li>Formation d'un bouchon de glace</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nappe de GNL avec gaz d'évaporation</li> <li>Impact d'un feu de nappe sur les autres cuves</li> <li>Etat de fragilisation structurelle, inapte au remorquage</li> </ul>
Echouement	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fuite sous ligne de flottaison</li> <li>Débit de fuite (faible ou important)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Envahissement de la double coque</li> <li>Phénomène de marée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Immobilisation du navire, nécessité de transférer le GNL</li> </ul>
Fuite de pont (rupture de vanne ou tuyauterie au cours d'un transfert cuve à cuve en mer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Apparition de fractures sur le pont</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rupture fragile de la coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Etat de fragilisation structurelle, inapte au remorquage</li> </ul>

### 3.1.4. Scénarios sélectionnés pour les méthaniers

#### Scénario 1 : Méthaniers : Collision – au-dessus flottaison – brèche cm<sup>2</sup>

Niveau	Scénario 1 Méthaniers : Collision - au-dessus flottaison - brèche cm <sup>2</sup>	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>collision avec un autre navire</li> <li>impact sur le flanc du méthanier</li> <li>double coque transpercée</li> <li>membrane endommagée localement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>navire impactant de tonnage moyen sans bulbe</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration au dessus de la ligne de flottaison</li> <li>surface de l'orifice est faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration par proue</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>cuve pleine (rq : cuve vide pas de risque pour le scénario considéré)</li> <li>une partie peut se vaporiser à la sortie de la membrane dans la double coque</li> <li>un bouchon de glace peut se former</li> <li>l'eau peut s'infiltrer dans la membrane secondaire endommagée, geler et « élargir » les fissures</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>présence de gaz possible dans la double coque</li> </ul>
Output	<ul style="list-style-type: none"> <li>rejet nul ou très faible pour une ouverture de la membrane de l'ordre du cm<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pas de données historiques, modélisation à considérer</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>pour l'équipe d'intervention, il y a un risque d'ouverture plus importante de la brèche dans la membrane mais la cinétique d'un tel phénomène est inconnue</li> </ul>	

**Scénario 2 : Méthaniers : Collision – en-dessous flottaison – brèche m<sup>2</sup>**

Niveau	Scénario 2 Méthaniers : Collision - en-dessous flottaison - brèche m <sup>2</sup>	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>collision avec un autre navire</li> <li>impact sur le flanc du méthanier</li> <li>double coque transpercée</li> <li>membrane endommagée localement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>navire impactant de gros tonnage avec bulbe</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration en dessous de la ligne de flottaison.</li> <li>surface de l'orifice est importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration par un bulbe</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>cuve pleine : rejet important de GNL dans l'eau sous la flottaison (différence de pression hydrostatique) + entrée d'eau dans la cuve</li> <li>cuve vide (10% GNL) : entrée d'eau dans la cuve</li> <li>envahissement de la double coque par eau de mer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>contact direct GNL – eau de mer à étudier en milieu ouvert et en milieu fermé</li> </ul>
Output	<ul style="list-style-type: none"> <li>rejet important possible de GNL sous la flottaison pour une ouverture de la membrane de l'ordre du m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mélange en milieu ouvert à étudier</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>les réactions du mélange sont incertaines. Si l'eau pénètre la cuve, il y a un phénomène de surpression (car réchauffement) qui conduit probablement à un rejet par le mât de dégazage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>difficultés de remorquage, nécessité de transférer le GNL dans un autre navire</li> </ul>

**Scénario 3 : Méthaniers : Collision – au-dessus flottaison – brèche m<sup>2</sup>**

Niveau	Scénario 3 Méthaniers : Collision + au-dessus flottaison + brèche m <sup>2</sup>	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>collision avec un autre navire</li> <li>impact sur le flanc du méthanier</li> <li>double coque transpercée</li> <li>membrane endommagée localement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>navire de gros tonnage</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration au dessus de la ligne de flottaison.</li> <li>surface de l'orifice est importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration par proue</li> </ul>
2/3	<ul style="list-style-type: none"> <li>cuve pleine</li> <li>jet de GNL dans la mer</li> <li>Transitions Rapides de Phases (TRP)</li> <li>nappe de GNL s'évapore rapidement (nuage blanc visible)</li> <li>feu de nappe (frottements mécaniques =&gt; étincelles) ; pas d'explosion mais combustion jusqu'à épuisement de la nappe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>étude expérimentale d'un épandage pour étude de dispersion.</li> <li>étude d'un feu de nappe avec impact thermique sur les autres cuves.</li> <li>moyens de détection = caméra IR pour identifier les zones de fuites (froide)</li> </ul>
Output	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rejet important de GNL « sur » la mer pour une ouverture de la membrane de l'ordre du m<sup>2</sup></li> </ul>	
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>projections probables de GNL sur la coque et dans la double coque du méthanier =&gt; risque important de rupture fragile de l'acier « mouillé » par le GNL</li> <li>fragilisation plus ou moins grave de la coque dans son ensemble.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>difficultés de remorquage, nécessité de transférer le GNL dans un autre navire</li> </ul>

**Scénario 4 : Méthaniers : Echouement – en-dessous flottaison – brèche m<sup>2</sup>**

Niveau	Scénario 4 Méthaniers : Echouement - en-dessous flottaison - m <sup>2</sup>	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>échouement de type échouement sur banc rocheux</li> <li>impact sur le fond de la coque</li> <li>double coque transpercée</li> <li>membrane endommagée sur une grande surface</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>déchirure de la coque avec l'inertie du navire</li> <li>(ex: Paul Kaiser)</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>pénétration en dessous de la ligne de flottaison</li> <li>surface de l'orifice importante</li> </ul>	
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>plusieurs cuves endommagées</li> <li>envahissement de la double coque</li> <li>phénomène de marée =&gt; immobilisation + risque structurel</li> <li>cuves pleines : rejet important de GNL dans l'eau sous la flottaison (différence de pression hydrostatique) + entrée d'eau dans les cuves</li> <li>cuve vide (10% GNL) : entrée d'eau dans la cuve, donc mélange et réchauffement =&gt; dégazage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>contact direct GNL – eau de mer à étudier en milieu ouvert et en milieu fermé</li> <li>problème de stabilité</li> </ul>
Output	<ul style="list-style-type: none"> <li>rejet important de GNL sous la flottaison pour une ouverture de la membrane de l'ordre du m<sup>2</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mélange en milieu ouvert à étudier</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>risque d'immobilisation du navire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nécessité de transférer le GNL dans un autre navire</li> </ul>

**Scénario 5 : Méthaniers : Fuite de pont**

Niveau	Scénario 5 Méthaniers : Fuite de pont	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>transfert cuve à cuve en mer</li> <li>défaillance ou erreur humaine =&gt; vannes ou tuyauterie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pratique de plus en plus courante</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>fuite de GNL sur le pont</li> <li>choc thermique entraîne la rupture fragile de l'acier et la formation de fractures sur le pont</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>débit estimé = 1700 m<sup>3</sup>/h pour la section d'un manifold ou 50 m<sup>3</sup>/h pour une fuite de type « spray »</li> </ul>
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>état de la mer</li> <li>fragilisation structurelle =&gt; mise en péril du navire tout entier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>cinétique mal connue</li> </ul>
Output	<ul style="list-style-type: none"> <li>non applicable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Il est difficile de prévoir le développement et les conséquences de la rupture fragile, à considérer pour la suite</li> </ul>



### 3.2 Transport de Gaz de Pétrole Liquéfiés « navire GPL »

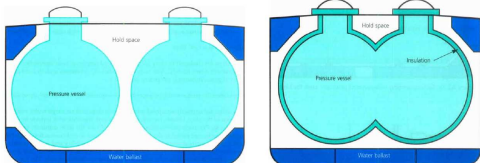
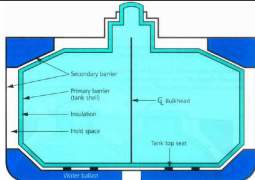
#### 3.2.1. Equipe d'Experts

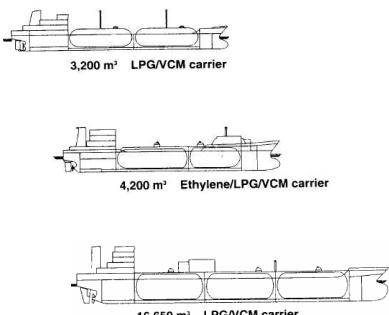
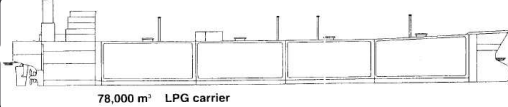
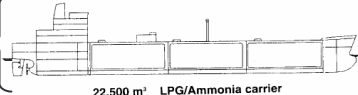
Cette partie résume la première partie du brainstorming effectué le 27 Février 2007 avec les experts dans les domaines :

- transport de GNL (Gaz de France)
- transport de produits chimiques GPL (Total Petrochemicals)
- transport de butane et propane GPL (Total Gaz Electricité)
- enquête post accident (BEA mer)
- risque chimique (Ineris)
- intervention (DDSC)
- sécurité des transports de produits gazeux (BV)
- sécurité des transports de produits chimiques (BV)
- analyse de risque (BV)

La méthodologie établie pour les méthaniers a été reprise et transposée au cas des GPLiers.

#### 3.2.2. Structure type des GPLiers par type de produit

<p>▸ Type de confinement possible</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type C : Pressurisé et/ou réfrigéré</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Type A : Réfrigéré (volumes importants)</li> </ul>	
<p>▸ Type de produit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ammoniac (C ou A)</li> <li>• Chlorure de Vinyle (C)</li> <li>• Butane Propane (C ou A)</li> <li>• Ethylène Propylène (C ou A)</li> </ul>	
<p>▸ Type d'accident</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision</li> <li>• Fuite tuyauterie si circuit de réfrigération</li> <li>• Navire coulé (envahissement, perte de stabilité, rupture structurelle)</li> <li>• Explosion/Incendie</li> <li>• Echouement</li> </ul>	
<p>▸ Port en Lourd représentatifs</p>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tout GPL stocké en cuve de type C : 5000 t</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Butaniers et Propaniers de type A : 45 000 t (100 000 m<sup>3</sup>)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ammoniac liquéfié stocké en cuve de type A: 12 000 t</li> </ul>	

Cf. annexe 2, §7

### 3.2.3. Principaux éléments analysés pour le cas d'un GPLier

Niveau 1 <i>Événement initiateur</i>	Niveau 2 <i>Conséquences immédiates</i>	Niveau 3 <i>Facteurs aggravants</i>	Niveau 4 <i>Risques à moyen terme</i>
Collision	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuite latérale (sous ou au-dessus ligne de flottaison)</li> <li>• Débit de fuite (faible ou important)</li> <li>• Risque toxique intervention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflammation du rejet gazeux, feu de nappe</li> <li>• Transition Rapide de Phase (TRP)</li> <li>• Rupture fragile de la coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact d'un feu de nappe sur les autres cuves - risque de BLEVE</li> <li>• Etat de fragilisation structurelle, inapte au remorquage</li> <li>• Risque toxique population</li> </ul>

*Remarque : Le risque d'incendie est envisagé après l'événement collision, en tant qu'élément aggravant. Les échouements et les envahissements sont considérés comme ayant des conséquences similaires au cas de la collision sous ligne de flottaison.*

### 3.2.4. Scénarios sélectionnés pour les GPLiers

#### Scénario 6 : GPLiers type C – Ammoniac – Collision – Impact sous flottaison

Particularités :

- Port en lourd caractéristique : 5000 t
- Pression 8.4 bar à 20°C. Possibilité de réfrigération
- Très soluble

Niveau	Scénario 6 GPLier type C - Ammoniac - Collision Impact au-dessus de la flottaison	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire</li> <li>• Impact sur le flanc du GPLier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque d'allumage à l'impact</li> <li>• Risque d'explosion si fuite dans ballast (LIE=16%)</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé au dessus de la ligne de flottaison.</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> <li>• Jet dans les ballastes/double coque/air</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>).</li> </ul>
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuage gazeux toxique</li> <li>• Risque Aérosol</li> <li>• Risque d'incendie (flamme jet)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ARI obligatoire</li> </ul>

Remarque : pour les GPLiers de type A de 12 000 t transportant de l'ammoniac liquéfié, se référer à l'analyse des méthaniers avec une modération du risque de TRP et de rupture cryogénique et l'apparition du risque toxique.

#### Scénario 7 : GPLier type C – Chlorure de Vinyle – Collision

Particularités :

- Port en lourd caractéristique : 5000 t
- Pression 3.4 bar
- Fumées très irritantes (HCl)/toxiques
- Peu soluble

Niveau	Scénario 7 GPLier type C – Chlorure de Vinyle – Collision	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire</li> <li>• Impact sur le flanc du GPLier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort risque d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> <li>• Gaz peu soluble</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque incendie par flamme jet</li> <li>• Fumée toxique/irritante pour l'intervention</li> <li>• Si incendie extérieur risque de BLEVE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ARI</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navire coule</li> <li>• Echappement complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exposition de longue durée dangereuse</li> </ul>

### Scénario 8 : GPLier Type C – Butane ou Propane ou Propylène – Collision

Particularités :

- Port en lourd caractéristique : 5000 t
- Tout type de réfrigération / pressurisation
- Peu soluble

Niveau	Scénario 8 GPLier type C – Butane ou Propane ou Propylène – Collision	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire</li> <li>• Impact sur le flanc du GPLier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort risque d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> <li>• Gaz peu soluble</li> </ul>
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque incendie par flamme jet</li> <li>• Si incendie extérieur risque de BLEVE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque toxique</li> <li>• Pas risque de rupture cryogénique</li> <li>• Pas de TRP</li> </ul>

*Remarque pour les GPLiers de type A de 45 000 t transportant du butane ou du propane, se référer à l'analyse des méthaniers avec une modération du risque de TRP et de rupture cryogénique.*

### Scénario 9 : GPLier Type C – Ethylène – Collision

Particularités :

- Port en lourd caractéristique : 5000 t
- Réfrigéré (-104°C)
- Peu soluble

Niveau	Scénario 9 GPLier type C – Ethylène – Collision	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire</li> <li>• Impact sur le flanc du GPLier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fort risque d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> <li>• Gaz peu soluble</li> </ul>
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque incendie par flamme jet</li> <li>• Fumée toxique/irritante pour l'intervention</li> <li>• Risque de Rupture cryogénique</li> <li>• Risque de TRP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque toxique</li> </ul>

### 3.3. Transport de produits chimiques « navires chimiques »

#### 3.3.1. Equipe d'Experts


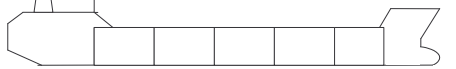


Cette partie résume la deuxième partie du brainstorming effectué le 27 Février 2007 avec les experts dans les domaines :

- transport de GNL (Gaz de France)
- transport de produits chimiques GPL (Total Petrochemicals)
- transport de butane et propane GPL (Total Gaz Electricité)
- enquête post accident (BEA mer)
- risque chimique (Ineris)
- intervention (DDSC)
- sécurité des transports de produits gazeux (BV)
- sécurité des transports de produits chimiques (BV)
- analyse de risque (BV)

La méthodologie établie pour les méthaniers a été reprise et transposée au cas des chimiques. Une partie utilisant des statistiques sur les rejets pétroliers est adjointe. Elle présente un résultat de débit minimum et débit maximum des produits chimiques en cas de collision.

#### 3.3.2. Structure type des Chimiquiers par type de produit

Il existe deux catégories de chimiques : les chimiques purs et les chimiques pétroliers cf [ 2 ]. Les deux produits choisis pour le projet sont le Benzène et le Xylène. Ces produits se transportent indifféremment sur les deux types de chimiques. Le Xylène nécessite cependant une double barrière de confinement (dans les cuves centrales d'un navire à simple coque, ou dans les cuves d'un navire à double coque). Le benzène lui n'est pas soumis à cet impératif. Le benzène par contre a un point de fusion assez élevé, ce qui nécessite un réchauffement du produit.

<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Type de produits sélectionné par Galerie             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Xylène</li> <li>• Benzène</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Dispositions possibles :</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Type de coque associée:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Xylène double confinement uniquement</li> <li>• Benzène tout type de confinement</li> </ul> </li> </ul>	 
<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Port en Lourd :             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimiquier : 5 000 t</li> <li>• Chimiquier/pétrolier : 40 000 t</li> </ul> </li> </ul>	 

Cf. annexe 3, §8

### 3.3.3. Principaux éléments analysés pour le cas d'un Chimiquier

<b>Niveau 1</b> <i>Evénement initiateur</i>	<b>Niveau 2</b> <i>Conséquences immédiates</i>	<b>Niveau 3</b> <i>Facteurs aggravants</i>	<b>Niveau 4</b> <i>Risques à moyen terme</i>
Collision	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuite latérale (sous ou au-dessus ligne de flottaison)</li> <li>• Débit de fuite (faible ou important)</li> <li>• Risque toxique intervention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflammation du rejet gazeux, feu de nappe</li> <li>• Transition Rapide de Phase (TRP)</li> <li>• Rupture fragile de la coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impact d'un feu de nappe sur les autres cuves</li> <li>• Etat de fragilisation structurelle, inapte au remorquage</li> <li>• Risque toxique population</li> </ul>
Explosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrachement cuve</li> <li>• Déversement</li> <li>• Incendie de cuve</li> <li>• Risque toxique intervention</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envahissement</li> <li>• Perte de stabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet domino</li> <li>• Risque toxique population</li> </ul>
Fuite de pont	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incendie local non maîtrisé</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effet sur les autres cuves</li> <li>• Risque de BLEVE</li> </ul>	

Le risque d'incendie est envisagé après l'événement collision et explosion, en tant qu'événement aggravant. Il est considéré en tant qu'événement initiateur dans le cas où il existe un système de réchauffage du produit transporté (circuit de réchauffage). Les échouements et les envahissements sont considérés comme ayant des conséquences similaires au cas de la collision sous ligne de flottaison.

### 3.3.4. Scénarios sélectionnés pour les Chimiquiers

#### Scénario 10 : Chimiquier – Xylènes – Collision – Impact au dessus ligne flottaison

Particularités :

- Ports en lourd caractéristiques : 5000 t et 40 000 t
- 1 Cuve < 3 000m<sup>3</sup>
- Densité 0.88
- Point de fusion Para (13°C), iso et ortho (<20°C)

Niveau	Scénario 10 Chimiquier – Xylènes – Collision Impact au dessus ligne flottaison	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire,</li> <li>• Impact sur le flanc du chimiquier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé au dessus de la ligne de flottaison</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> <li>• Déversement dans les ballastes/double coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déversement à la mer</li> <li>• Xylène igniteur d'un incendie : faiblement probable</li> <li>• Peut entretenir un incendie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> <li>• Protéger la nappe d'un autre incendie</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navire coule</li> <li>• Ecoulements complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> </ul>

#### Scénario 11 : Chimiquier – Xylènes – Collision – Impact sous ligne flottaison

Niveau	Scénario 11 Chimiquiers – Xylènes – Collision Impact sous ligne flottaison	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire,</li> <li>• Impact sur le flanc du chimiquier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé en dessous de la ligne de flottaison</li> <li>• Quel que soit le remplissage</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> <li>• Possible rejet par les événements si remplissage faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> <li>• Jeu des pressions donne les sens des débits</li> <li>• Fuite stabilisée à l'équilibre des pressions</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut entretenir un incendie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> <li>• Protéger la nappe d'un autre incendie</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navire coule</li> <li>• Ecoulements complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> </ul>

**Scénario 12 : Chimiquier – Benzène – Collision – Impact au dessus de ligne flottaison**

Particularités :

- Tailles caractéristiques : 5000 t et 40 000 t
- 1 Cuve < 3 000m<sup>3</sup>
- Densité 0.86
- Point de fusion (4-5°C), maintenu à 12°C

Niveau	Scénario 12 Chimiquiers – Benzène – Collision Impact au dessus de ligne flottaison	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire</li> <li>• Impact sur le flanc du chimiquier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Probabilité moyenne d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé au dessus de la ligne de flottaison</li> <li>• Cuve pleine</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> <li>• Déversement dans les ballastes/double coque</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>)</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Déversement à la mer</li> <li>• Benzène igniteur d'un incendie moyennement probable. Peut entretenir un incendie</li> <li>• Risque d'explosion</li> <li>• Si incendie extérieur risque de BLEVE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> <li>• Protéger la nappe d'un autre incendie</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navire coule</li> <li>• Ecoulements complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> </ul>

**Scénario 13 : Chimiquier – Benzène – Collision – Impact sous ligne flottaison**

Niveau	Scénario 13 Chimiquiers – Benzène – Collision Impact sous ligne flottaison	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Collision avec un autre navire,</li> <li>• Impact sur le flanc du Chimiquier</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas d'allumage à l'impact</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Double confinement transpercé en dessous de la ligne de flottaison.</li> <li>• Quelques soit le remplissage</li> <li>• Surface de la brèche est faible à importante</li> <li>• Possible rejet par les événements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tous ordres de grandeur (cm<sup>2</sup>, dm<sup>2</sup>, m<sup>2</sup>).</li> <li>• Jeu des pressions donne les sens des débits. Fuite stabilisée à l'équilibre des pressions.</li> </ul>
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peut entretenir un incendie extérieur.</li> <li>• Si incendie extérieur risque de BLEVE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire.</li> <li>• Protéger la nappe d'un autre incendie.</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Navire coule</li> <li>• Ecoulements complexe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de risque produit supplémentaire</li> </ul>



**Scénario 14 : Chimiquier – Benzène – Explosion – Effet domino**

Niveau	Scénario 14 Chimiquiers – Benzène – Explosion – Effet domino	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Explosion due à un point chaud dans une cuve non inerté</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allumage par point chaud</li> <li>• Electricité statique</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arrachement des confinements des autres cuves</li> <li>• Ouverture ciel ouvert + incendie</li> <li>ou</li> <li>• Déversement latéral en mer (type collision)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque Boil Over si mélange Eau-Benzène + Incendie</li> </ul>
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perte de flottabilité, à rapprocher de scénarios collisions</li> <li>• Risque pour les autres cuves : BLEVE</li> </ul>	

**Scénario 15 : Chimiquier – Benzène – Benzène – Fuite circuit – Incendie**

Niveau	Scénario 15 Chimiquiers – Benzène – Benzène – Fuite circuit – Incendie	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rupture dans le circuit de réchauffement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allumage par point chaud</li> <li>• Electricité statique</li> </ul>
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incendie local non maîtrisé par les moyens de lutte</li> </ul>	
3/4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risque pour les autres cuves : BLEVE</li> </ul>	

### 3.3.5. Valeurs de référence pour les rejets accidentels des chimiquiers

Des valeurs de références sont données dans la littérature ([ 12 ], [ 13 ], [ 14 ] et [ 15 ] ) pour les quantités de pétrole déversées en moyenne, en valeur maximales, navire à flot, et les valeurs maximales, navire coulé, ce pour différents paramètres. Ces références sont issues de calcul probabiliste d'impact sur la coque d'un pétrolier simple ou double coque. La base de ce calcul est constituée par les données statistiques sur les rejets accidentels de pétrole (MARPOL).

Afin de se donner des ordres de grandeur, ces valeurs ont été calculées pour quatre designs « enveloppe » représentatifs de la flotte chimiquiers et chimiquiers-pétroliers (cf §0):

- Ports en lourd de 5.000 t ou 40.000 t
- Simple ou double coque

Dans ce calcul il est supposé que la structure des chimiquiers est proche de celle du pétrolier et que les propriétés des produits considérés sont proches de celles du pétrole.

Le tableau ci-dessous résume les résultats de ce calcul (cf §0):

Type de coque et % déversé	Déversement moyen (m <sup>3</sup> )		Déversement extrême (m <sup>3</sup> )		Déversement extrême et perte du navire (m <sup>3</sup> )	
	Double 2%	Simple 5%	Double 10%	Simple 20%	Double 50%	Simple 50%
<b>Port en Lourd</b>						
<b>5.000 t</b>	100	250	500	1.000	2.500	2.500
<b>40.000 t</b>	800	2.000	4.000	8.000	20.000	20.000

Pour les besoin du projet on peut se donner trois ordres de grandeur de déversement qui couvrent les pages ci-dessus : 500 m<sup>3</sup>, 4 000m<sup>3</sup> et 8 000m<sup>3</sup>.

Si l'on admet l'hypothèse d'un débit stationnaire, à partir de ces déversements de référence, on peut calculer les débits maximum auxquels seraient soumis les équipes de secours, à n h après l'accident soit à un débit en m<sup>3</sup> par heure égal au déversement maximum divisé par n.

On considère dans le tableau suivant deux phases clés de l'intervention et qui intéressent Galerie:

- la première approche hélicoptérée de l'équipe de secours, une heure après l'accident
- la deuxième approche par d'éventuels renforts (autre hélicoptère, remorqueur, assistance) cinq heures après l'accident

Volume du rejet	Débit stationnaire sur 1h (m <sup>3</sup> /s)	Débit stationnaire sur 5h (m <sup>3</sup> /s)
<b>500 m<sup>3</sup></b>	0,14	<b>0,03</b>
<b>4.000 m<sup>3</sup></b>	1,11	<b>0,22</b>
<b>8.000 m<sup>3</sup></b>	<b>2,22</b>	0,44

De ce tableau trois ordres de grandeur de débit de fuite ressortent. Ils sont de l'ordre du centième, du dixième et de l'unité de mètre cube par seconde. Les valeurs  $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $2.22 \text{ m}^3/\text{s}$  peuvent être choisies.

Remarque : En ce qui concerne les méthaniers et les GPLiers, il n'existe pas de base statistique comparable à celle des accidents de pétroliers. De plus, il est difficile d'admettre que les structures de navire et que le comportement du produit lors du rejet sont comparables avec celles d'un pétrolier, ce pour les raisons suivantes :

- A leur avantage, les méthaniers et les GPLiers réfrigérés sont plus solides qu'un pétrolier. A leur désavantage, ils ont des cuves de capacité bien supérieure à celles d'un pétrolier. De surcroît, le risque de rupture cryogénique (aggravation de la fuite) n'existe pas pour le pétrolier, et le comportement eau/gaz liquéfié est mal maîtrisé.
- Pour les GPLiers pressurisées, la dimension des cuves est comparable à celles des pétroliers mais, en cas de fuite, l'écoulement se fait à une pression de plusieurs atmosphères, ce qui risque de donner des rejets totalement différents.

Dés lors, un tel calcul n'est possible que pour les chimiquiers. Seule l'analyse descriptive des accidents permet d'évaluer les dimensions de brèche pour les méthaniers et GPLiers. Ces dimensions serviront de base à l'estimation du débit par les « experts produit » en deuxième partie du projet.

## 4. Conclusion

Ce rapport conclue la première tranche de travaux réalisés dans le cadre du projet Galerie.

Dans la première partie la méthodologie qui a servie de base à l'analyse des accidents menant à une fuite est présentée. Elle détaille les critères généraux pour le choix de scénario et les principes d'application. Les risques pour les navires sont découpés en risques nautiques et risques opérationnels. Les événements sont décrits de manière chronologique. Le détail est donné aux événements qui suivent l'accident et qui pourraient concerner l'équipe de secours, comme cela est l'objectif du projet Galerie.

Dans la deuxième partie, la méthode est appliquée aux trois grands groupes de navires qui intéressent Galerie : Méthaniers, GPLiers et Chimiquiers. Ces trois catégories sont analysées suivant la méthodologie décrite en première partie et suivant les événements initiateurs déterminés par la tâche *GALERNE T1.2 Retour d'Expérience des Accidents Passés [ 2 ]*. Les éléments d'analyse détaillée sont fournis en annexe.

On retient 15 scénarios : 5 scénarios méthaniers (3 collisions, 1 échouement, 1 fuite de pont), 4 scénarios GPLiers, différents selon les produits et l'intérêt qu'ils apportent (4 collisions), et 6 scénarios chimiquiers, dépendant aussi du produit transporté et de l'intérêt qu'ils apportent (4 collisions, 1 explosion, 1 incendie). Dans chacun des cas, le risque d'incendie a été envisagé soit en tant qu'événement initiateur soit en tant qu'événement consécutif à un accident.

Des ordres de grandeurs de la dimension des ouvertures dans les cuves sont donnés dans le cas des GPLiers et des méthaniers, n'ayant pas de retour d'accident ayant provoqué de fuite pour ces navires. Il a été envisagé des ouvertures de l'ordre du  $\text{cm}^2$ , du  $\text{dm}^2$  et du  $\text{m}^2$ . Les modes de fuites sont détaillés et discutés en annexe. Ils sont complexes et leur analyse devra être confirmée par les résultats des différentes expériences qui seront menées en deuxième tranche.

En ce qui concerne les chimiquiers, l'analyse des retours d'expérience avait donné trois risques principaux : collision, incendie/explosion et rupture de coque/cuve. Les scénarios sont décrits en fonction de ces résultats. La similitude entre un chimiquier et un pétrolier a permis un calcul probabiliste basé sur des statistiques de rejet pétrolier à la mer. Un dernier paragraphe propose donc pour les chimiquiers des ordres de grandeur de rejet et des débits correspondants. Ces débits balayent des ordres de grandeur du  $1/100^{\text{ème}}$  à l'unité de  $\text{m}^3/\text{s}$ . Ces valeurs pourront être utilisées en référence pour les expérimentations et calculs qui seront menés en deuxième tranche à propos du risque chimiquier.

## 5. Références

- [ 1 ] ANR Programme PRECODD – Dossier de réponse projet Galerie – F. Cabioch' 2004
- [ 2 ] GALERNE - Retour d'Expérience, T1.2, A. Breuillard, BUREAU VERITAS 2006
- [ 3 ] GALERNE – Le transport des gaz liquéfiés et des produits évaporants par navire, T1.3, D. de Castelet, BUREAU VERITAS 2007
- [ 4 ] Colton Sept 2006 : <http://www.coltoncompany.com/shipbldg/worldsbldg/gas/lngactivefleet.htm>
- [ 5 ] SEAWAY 2006
- [ 6 ] Use of Risk Analysis for Emergency Planning of LNG Carriers, Skramstad, Musaeus, Capt. Melbo, Gastech 2000.
- [ 7 ] Consequence of LNG Marine Accidents, Pitblado et Al CCPS Conf., Orlando 2004
- [ 8 ] On Accidental Limit State Design of Spherical Type LNG Carrier Structures against Ship Collision, J.K.Paik, 2<sup>nd</sup> International Conference on Collision and Groundings of Ships.
- [ 9 ] Germanische Lloyd Rules 2005, Strengthening against Collisions, Section 33, Chap 1 p33-1.
- [ 10 ] Collision and Grounding Practical Analytical Methods, J. Poudret, M. Huther, Bureau Veritas and W.A. Wood and D.E. Edinberg, Giannotti Associates INC, SNAME, Calgary 1981.
- [ 11 ] Maritime Transportation, Safety Management and Risk Analysis, S. Kristiansen, Elsevier, Edition 2005
- [ 12 ] Transportation of liquid bulk chemicals by tankers in the Baltic Sea, S Hänninen, J. Rytönen, VTT pub n° 595, 2006
- [ 13 ] Convention MARPOL, ANNEX I, Appendice 7
- [ 14 ] Herbert Engineering Corp. 1998, Oil Outflow Analysis for a series of Double Hull Tankers. Report 9749-1.
- [ 15 ] Dailoa et al., 1997. Oil Outflow Estimates for Tankers and Barges. Spill Science & Technology Bulletin, vol 4., No 2, pp.89-98
- [ 16 ] Total - Opérations GPL 2006

## 6. Annexe 1 : Eléments d'analyses pour l'établissement des scénarios méthaniers et GPLiers réfrigérés

### Critère de choix des scénarios

Voici quelques rappels qui définissent la tâche 1.5 dans le projet Galerie [ 1 ]. Les accidents concernés par l'étude doivent respecter les critères suivants :

- i- *accident ayant déjà été observé ou étant jugé réaliste sur un navire du type de ceux qui sont concernés par le projet*
- ii- *origine de l'accident limité à la collision, sauf si les statistiques d'accidents ou les études des différents systèmes de cargaison démontrent que d'autres cas d'accident pourraient entraîner des effets similaires (hors agression)*
- iii- *scénarios ne prenant pas en compte les cas de mélange de produits ou de réaction avec l'air ou avec l'eau.*

*Si l'explosion d'une cuve reste possible mais vraisemblablement peu probable en tant que cause initiale d'accident, une fois le produit libéré hors de la cuve les risques d'incendie/ explosion seront pris en compte notamment en termes de conséquences sur les autres cuves du navire.*

Etant donné les résultats du retour d'expérience sur les accidents impliquant des méthaniers et les navires GPL réfrigérés, il n'y a pas eu de cas de fuite importante pouvant mettre en danger l'environnement ou d'éventuelles équipes de secours.

Dés lors suivant le point i- précédent, il faut s'attacher à un scénario jugé réaliste. Suivant le point ii-, il s'avère que la collision est bien un accident qui peut provoquer une fuite majeure. Le retour d'expériences nous indique aussi que la collision est un scénario à retenir. Quant à l'incendie et l'explosion, leur occurrence est peu fréquente, et ils seront éventuellement considérés comme consécutifs à une collision. Enfin, le point iii- est respecté systématiquement par les méthaniers (seul du GNL est transporté), tandis que pour les navires GPL il se peut qu'un accident réel sorte de cette étude puisqu'ils peuvent transporter plusieurs types de gaz liquéfiés en même temps.

Concernant les occurrences faibles des accidents des navires gaziers, elles peuvent s'expliquer par les quatre points suivants qui concernent ces navires :

- ils sont différents des autres types de navires en terme de structure et de réglementation ce qui peut constituer un facteur explicatif de leur meilleur niveau de sécurité
- le niveau de formation des équipages est supérieur à la moyenne (notamment induit par le caractère plus stricte de la réglementation pour ces navires)
- l'entretien des gaziers est aussi plus rigoureux (réglementation ou perception déjà acquise du risque supplémentaire associé au transport de gaz)
- La taille des flottes est restreinte
- Il s'agit d'un transport très technique et onéreux.

Cependant, les statistiques (source Colton [ 2 ] 2006), permettent de dire que les flottes de ces deux catégories vont connaître un grand essor, ceci est du au fait de l'augmentation des importations de gaz naturel et pétrolier. Les tableaux suivants en témoignent :

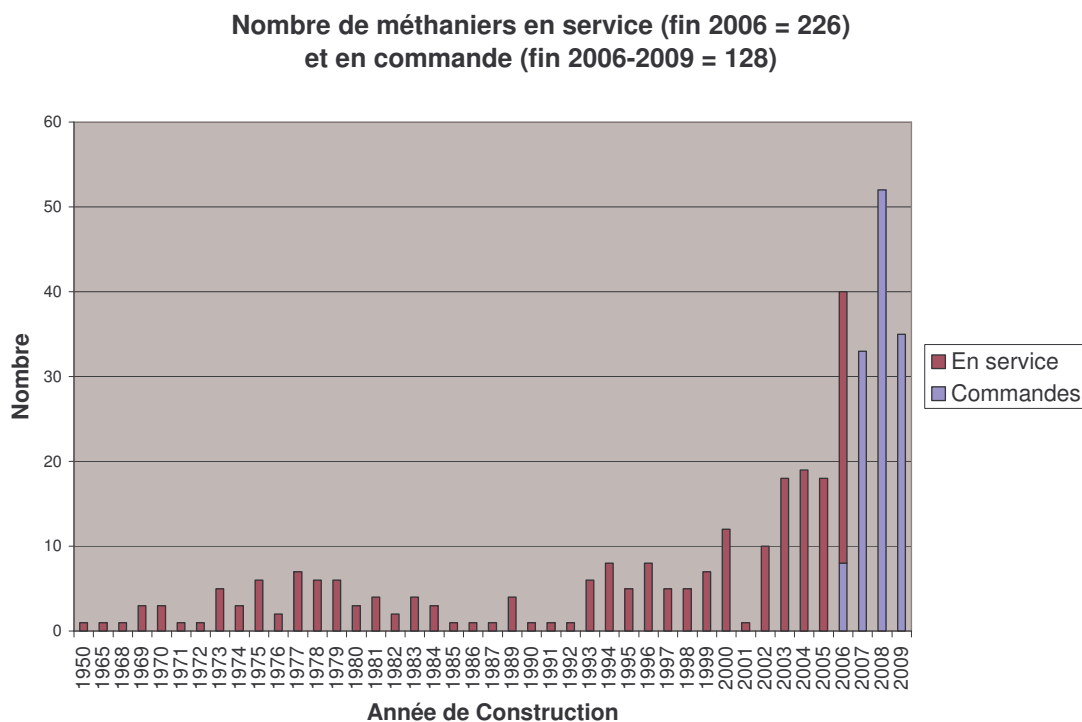


Figure 4 : Flotte Mondiale et commandes de Méthaniers 2006, (Colton [ 2 ])

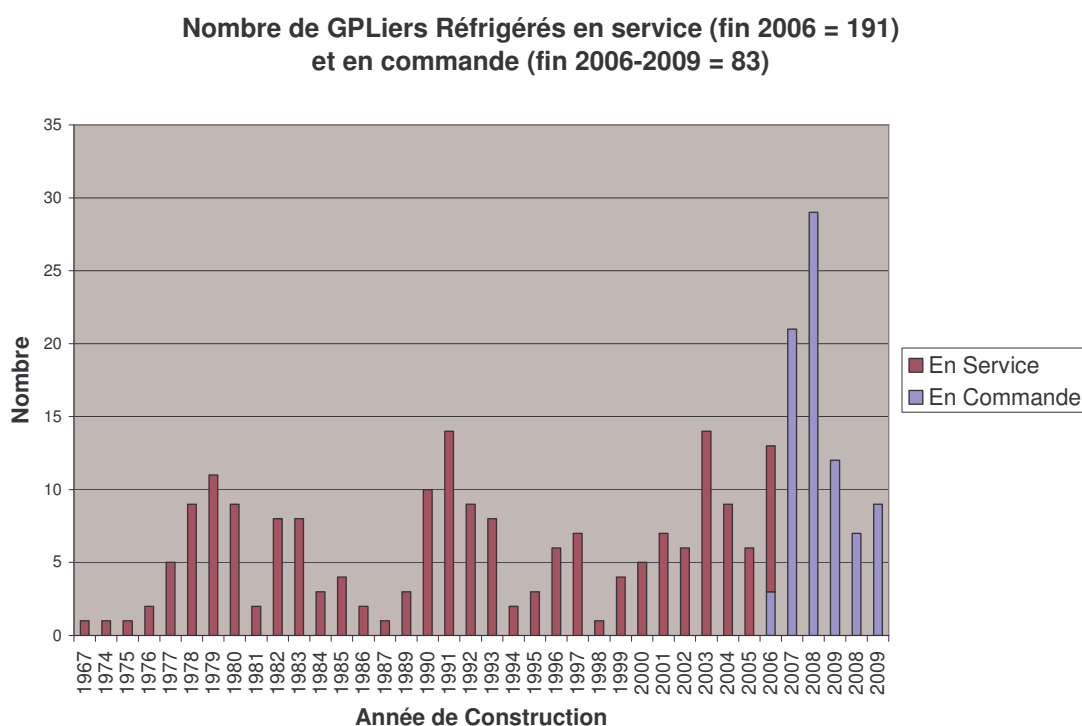


Figure 5 : Flotte Mondiale et commandes de navires GPL réfrigérés 2006, (Colton [ 2 ])

Il faut noter qu'aucun méthanier n'a été retiré du service en 2006 et que 5 navires GPL réfrigérés l'ont été. Le niveau de sécurité intrinsèque, est reconnu pour ce type de navire. Le nombre de navires en service va cependant doubler dans les prochaines années, et leur trafic s'intensifier autour des côtes françaises, ce qui augmente de facto les fréquences d'accidents, en particulier à la suite de collisions.

## **Risques nautiques**

Les accidents nautiques à envisager pour les méthaniers sont la collision et l'échouement. Comme l'a montré le retour d'expérience, ce type d'accident peut se produire même si les conséquences sont restées limitées jusqu'à présent (GALERNE T1.2 [ 2 ]).

- La collision du Norman Lady avec un sous-marin s'est produite à faible vitesse, quels auraient les dégâts si le sous-marin avait été en vitesse de croisière ?
- Le Paul Kayser a subi un échouement et est resté bloqué sur le rivage. Que se serait-il produit s'il avait été dans une zone où la marée est importante ?
- Le LNG Taurus n'est pas resté bloqué sur le haut fond qu'il a percuté, c'était une chance, car il se situait sur une mer où la marée est importante.
- Le LNG Libra a subi une panne moteur en mer agitée. Que se serait-il passé sans l'intervention des secours et sans remorquage ?

Selon l'expertise de Bureau Veritas, les principaux types de risques nautiques pour les méthaniers sont :

Le talonnage suivi d'un échouement dans une zone où la marée est importante.

La collision avec un navire ou un sous-marin qui ont des vitesses, des masses, des trajectoires d'impact et une sailli de l'étrave telles que l'intégrité des cuves peut être atteinte.

Ce sont les cas de la collision et de l'acte terroriste qui ont été retenus comme les plus risqués par deux analyses de risque (Skramstad [ 6 ], Pitalbo [ 7 ]) environnementaux et humains des méthaniers. Cependant l'analyse des conséquences du scénario de collision est jugée succincte, car elle ne s'intéresse pas au problème de la rupture fragile, mentionnée mais jugée trop complexe, et qui semble pourtant au cœur du problème de la collision. Ce rapport vise notamment à améliorer la description de ce danger.

## **Risques opérationnels**

### *Risques opérationnels exceptionnels*

Les opérations exceptionnelles sur le méthanier ou sur le navire GPL réfrigéré qui peuvent générer un risque pour l'équipe d'intervention sont les suivantes :

- transfert de cuve à cuve avec défaillance du système hydraulique
- vidange à la mer
- transfert de navire à navire

Les transferts entre cuves sont possibles pour les navires modernes, en mer (tous les niveaux de remplissage sont possibles pour certains méthaniers), et, en cas d'urgence, si une cuve menace de rompre, la vidange à la mer est prévue dans les procédures. Enfin, comme cela a été le cas pour le Paul Kayser et le LNG Libra, le transfert de méthanier à méthanier est aussi une configuration possible que peuvent rencontrer les équipes de secours.

La vidange à la mer n'implique pas de dégradation supplémentaire du navire et de l'intégrité de la cargaison.

Le transfert de cuve à cuve peut amener le même type de fuites que celles qui se produisent sur des systèmes de tuyauterie.

Le transfert de navire à navire peut comporter le même type de dangers que les transferts au terminal.



Ces procédures nécessitent certaines conditions spécifiques pour leur bon déroulement : mer calme, manifolds disponibles, manifolds sous le vent...

#### *Risques opérationnels*

Ces risques sont maîtrisés par une réglementation forte, des protections passives importantes, une compétence élevée et de nombreux systèmes et dispositifs de sécurité. Cependant une défaillance en chaîne peut être envisagée et elle mènerait aux risques suivants :

#### *Risque de fuites*

fuite par perte d'intégrité du confinement (membrane primaire, puis secondaire, puis coque interne) – ce qui serait dû à un problème de fiabilité de l'alarme et aux facteurs humains.

fuite par perte d'intégrité du confinement (coque interne, puis secondaire, puis primaire) – ce qui serait aussi dû à un problème de fiabilité de l'alarme et aux facteurs humains.

#### *Risque d'incendie*

Un incendie dans les zones autres que la zone de cargaison pourrait dégénérer et se généraliser. Quel serait l'effet sur les cuves et quelle procédure serait employée pour y mettre fin?

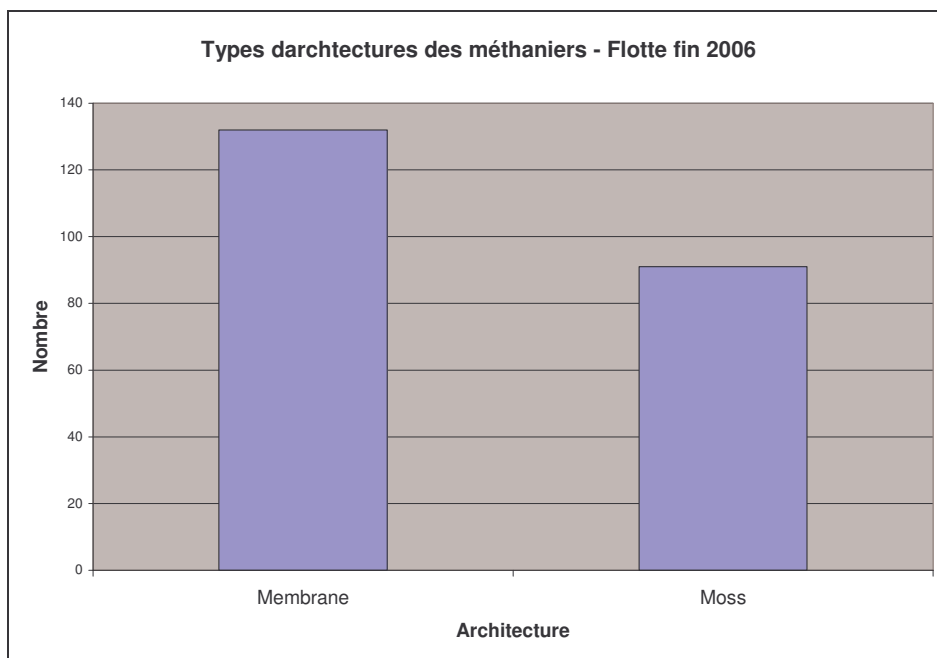
Un incendie dans les zones de ballast dû à l'inflammation de méthane issu d'une fuite de cargaison décrite plus haut peut être aussi envisagé.

### **Caractérisation d'un méthanier type**

Pour définir le méthanier type d'aujourd'hui, les statistiques sur la flotte mondiale actuelle et en commande ont été utilisées.

#### *Arrangement général*

Les types Moss représentent 92 navires sur 226 en 2006, comme en témoigne le graphique ci-dessous :



**Figure 6 : Architecture dans la flotte mondiale Méthaniers 2006, [ 2 ]**

Le type Moss est présent en grande proportion, cependant, les navires de type membrane représentent la majorité des méthanières qui seront construits dans les prochaines années :

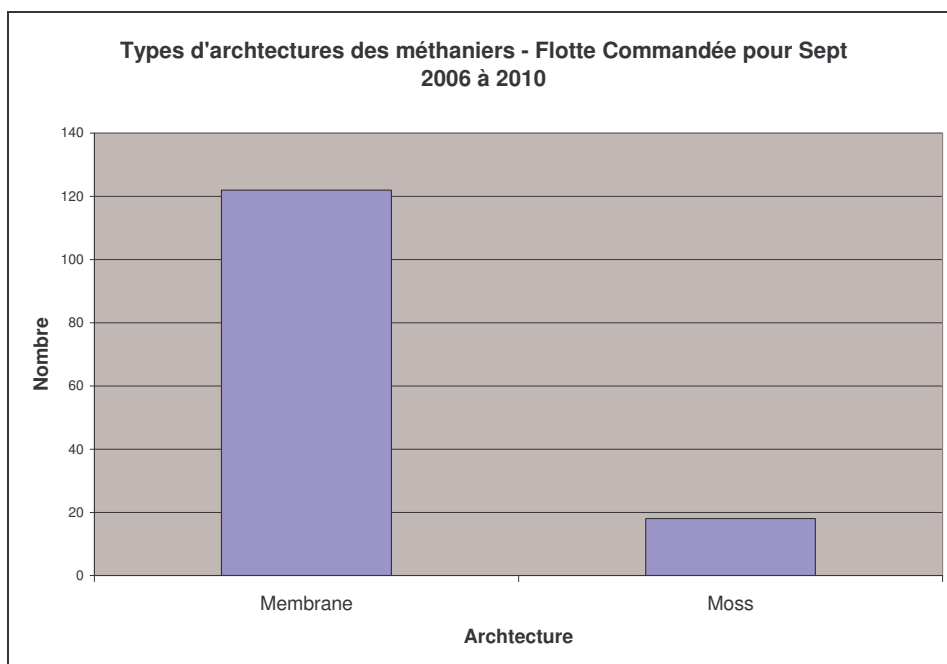


Figure 25 : Types d'architecture dans le carnet de commandes Méthanières 2006-2010, [ 2 ]

Le type d'architecture à considérer a donc été choisi comme étant de type membrane.

*Capacité*

La distribution des capacités est relativement centrée et on peut considérer qu'un navire de port en lourd de 80 000 tonnes (200 000m<sup>3</sup>) est représentatif :

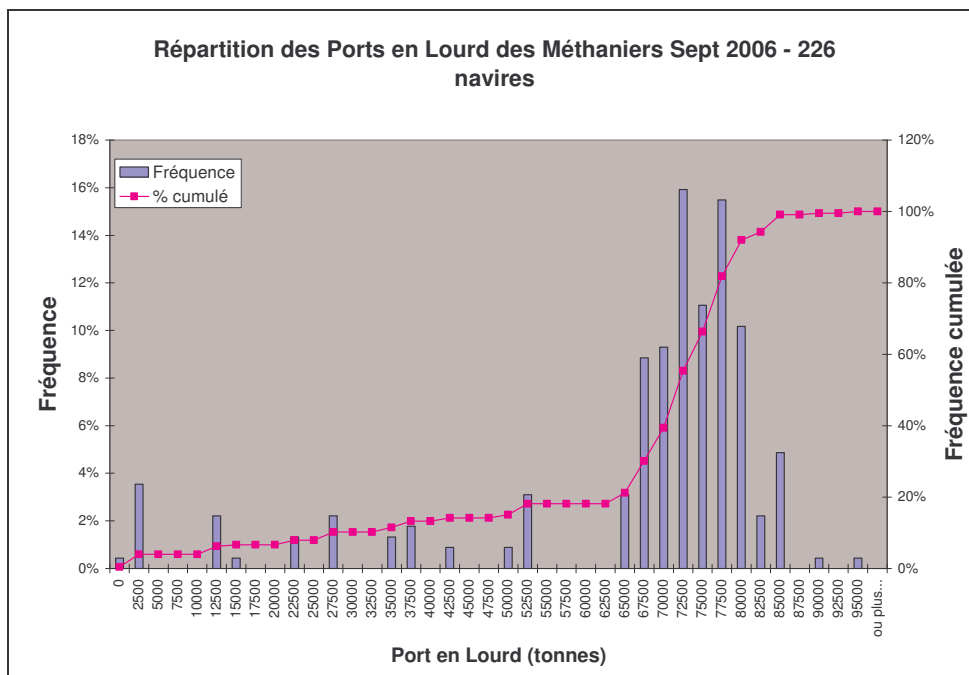
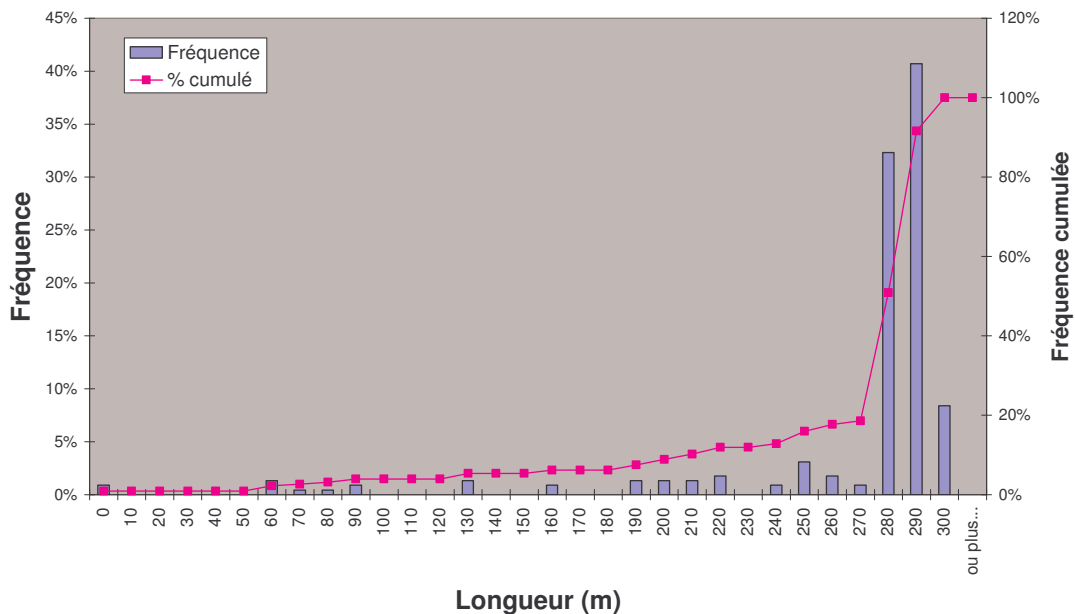


Figure 26 : Port en lourd dans la flotte mondiale Méthanières 2006, [ 5 ]

*Dimensions*

La distribution est aussi centrée, et une valeur de 300 mètres est représentative :

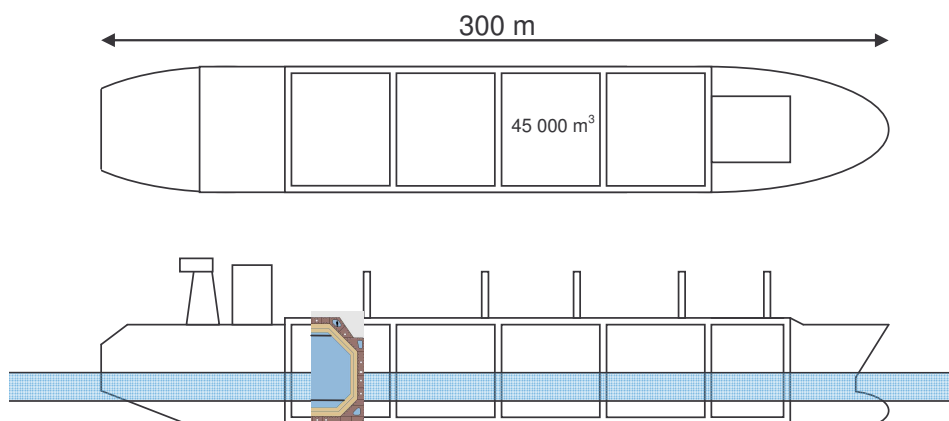
**Répartition des Longueurs des Méthaniers Sept 2006 - 226 navires**



**Figure 9 : Répartition des longueurs des navires dans la flotte mondiale Méthaniers 2006, [ 5 ]**

*Méthanier type*

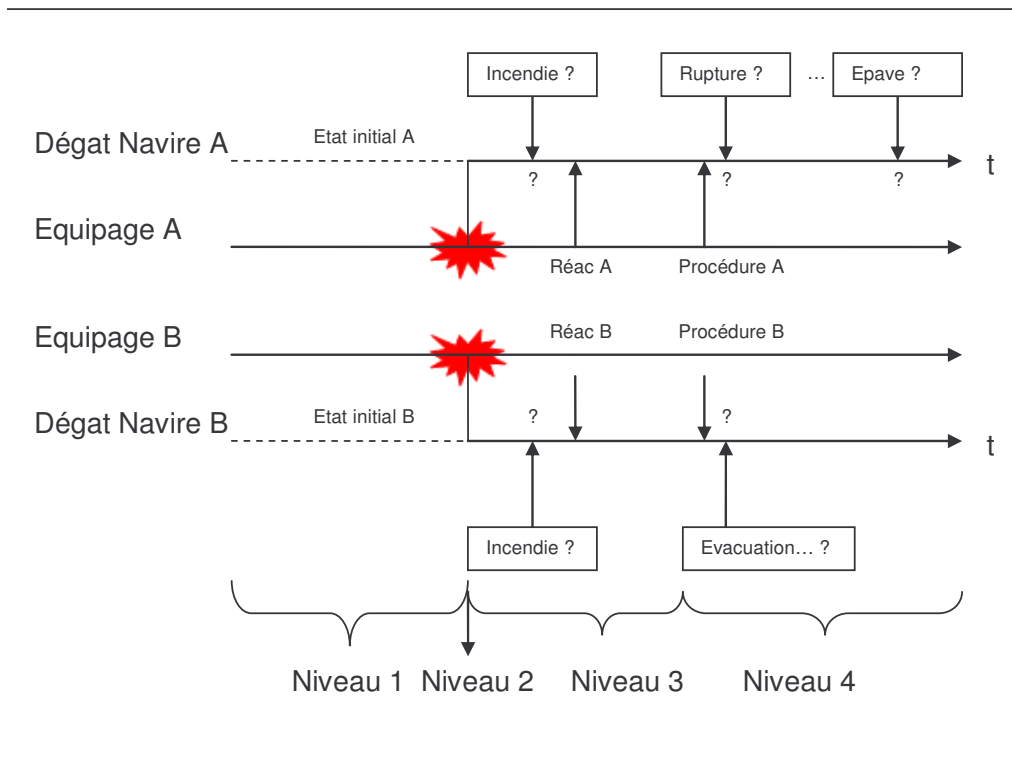
La figure ci-dessous présente le méthanier type retenu :



**Figure 10 : Méthanier type : membrane, 5 cuves, 45 000m<sup>3</sup> par cuve (sauf cuve 1), 300 m.**

**Mise en œuvre de la méthodologie pour le scénario « collision » Méthanier**

La collision est un événement grave qui implique des dégâts, des menaces et des réactions différentes pour les deux navires et les deux équipages impliqués :



**Figure 11 : Chronologie des événements qui suivent une collision**

**Scénario – Niveau 1 : facteurs caractérisant l'événement nautique initiateur**

Dans cette partie, on cherche d'abord à caractériser physiquement le processus d'une collision. Cette description doit permettre de choisir les paramètres importants que pourrait prendre en compte le questionnaire de l'alerte. On tirera donc dans une deuxième partie le maximum de paramètres qui pourront être évalué lors d'une alerte.

L'analyse du crash par éléments finis est possible mais consiste à elle seule en tout un projet. Il existe des règles simples et conservatives sur la capacité d'un navire à résister à la collision perpendiculaire. Une telle méthode pourrait être extrapolée ([ 8 ], [ 9 ], [ 10 ], [ 11 ]). Elle prend en compte une partie des véritables paramètres physiques importants.

Parmi ces paramètres on dispose des données géométriques ci-dessous :

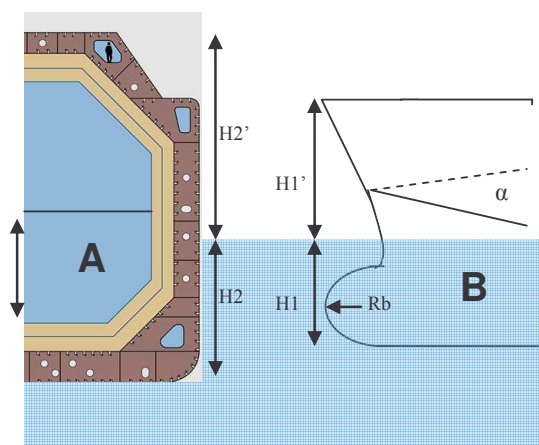
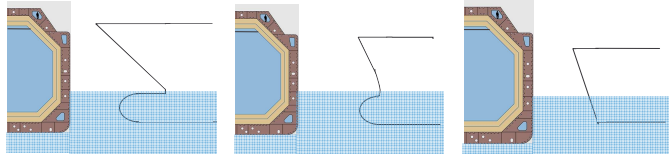
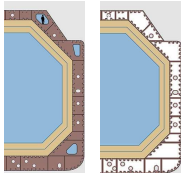


Figure 12 : Données géométriques de collision

Soient le navire A accidenté et le Navire B éperonnant.

Paramètres de niveau 1	Valeurs des paramètres
Type de bateau 'B'	<p>Gravissime : Méthanier, Paquebot                      Grave : Yacht de luxe, sous-marin, Navire à bulbe étroit et avancé, Navire saillant et lourd                      Sérieux : Tout autre navire lourd et haut, Tout navire saillant                      Léger : Pêche légère etc</p>  <p><b>Figure 1327 : Formes des navires impactants</b></p>
Vitesse relative d'impact	15-20 Nœuds 10-15 Nœuds 5-10 Nœuds 0-5 Nœuds
Hauteurs sous flottaison H1, H2, Hauteurs au dessus de flottaison H1', H2'	
Angle caractéristiques Saillie $\alpha$	30-45 ° 45-60 ° 60-75 °
Dimensions caractéristiques Bulbe (Rayon du Bulbe)	0-0.5m 0.5-1 m 1-2.5 m >2.5 m
Masse d'impact (load displacement - tonnes)	0 - 50 50 - 1 000 1 000 -10 000 10 000 - 100 000 100 000 – 200 000
Zones d'impact	Raidisseur Milieu Cuve N° Cuve  <p><b>Figure 14 : Coupe au niveau d'une membrure (à gauche) et entre deux membrures (à droite)</b></p>
Angle d'impact	0-30 ° 30-60 ° 60-90 °
Remplissage de la cuve impactée	10% 50% 98%

Remarque :

Le remplissage de la cuve va jouer sur sa capacité à absorber le choc. A 98% il y a 700 m<sup>3</sup> de gaz gazeux et 17500 m<sup>3</sup> à 50%. Le liquide est incompressible (il transmet l'impact à toute la cuve), le gaz lui, amortira mieux le choc. (Pitblado [ 7 ])

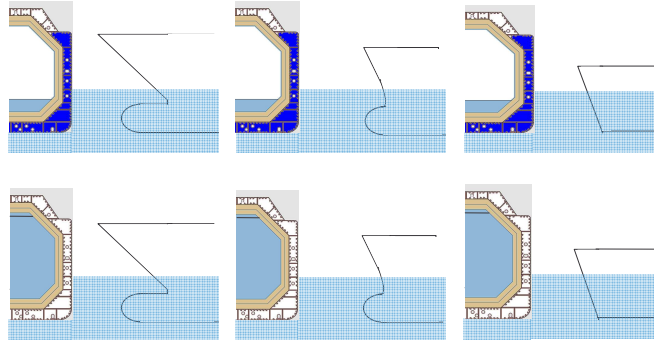
On peut montrer qu'un choc à moins de 6-7 nœuds ne peut pas causer de fuite sur un méthanier type Moss. (Paik [ 8 ], GL [ 9])

Un impact massif sur une membrure, qui est une partie très rigide et qui est mécaniquement liée aux cuves, est plus dangereux qu'un impact entre deux membrures. Si l'impact se produit de biais, entre deux membrures, le navire B risque de riper jusqu'à une membrure.

**Scénario – Niveau 2 : conséquences immédiates possibles**

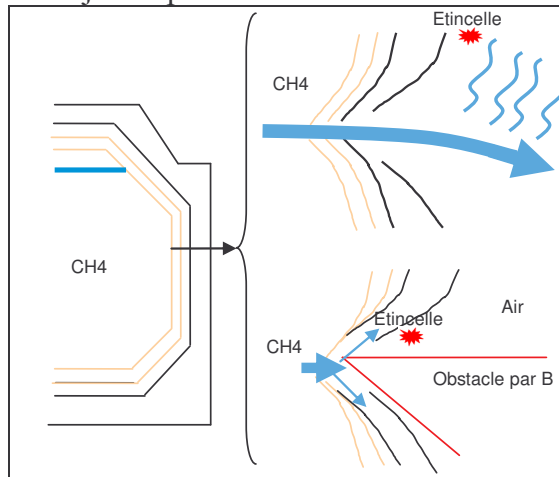
*Conséquences locales*

Les différentes configurations suivantes sont possibles :

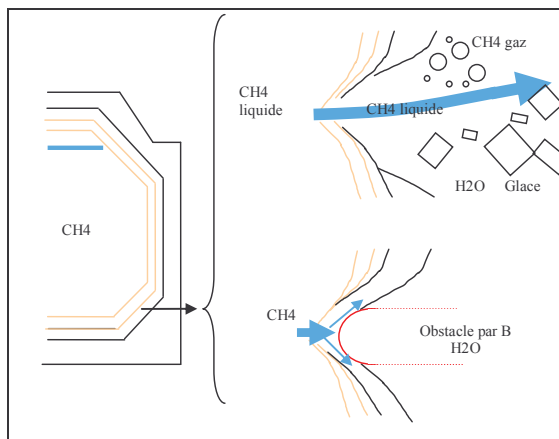


**Figure 15 : Différents cas d'impact dans différentes zones selon différentes configurations**

Les différents cas de début de fuite juste après collision :

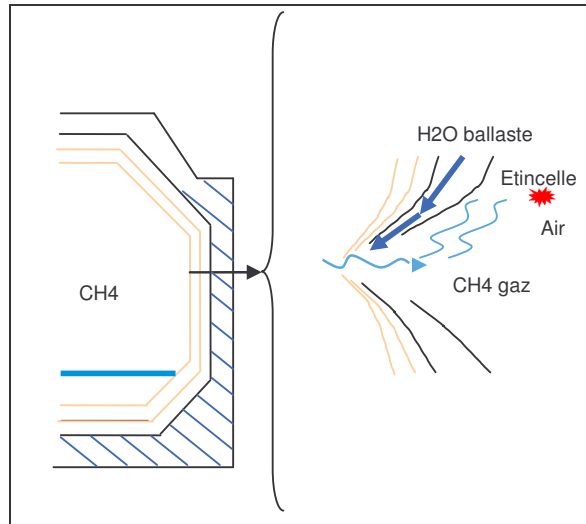


**Figure 16 : Impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle**

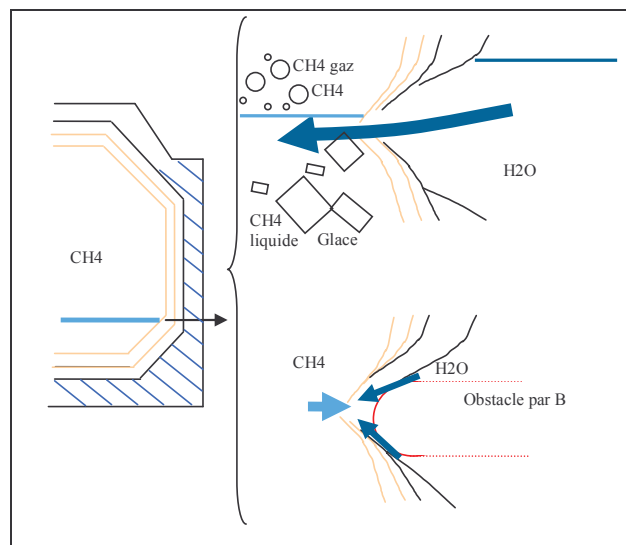


**Figure 28 : Impact au dessous de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle**





**Figure 18 : Impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve vide, avec ou sans obstacle**



**Figure 19 : Impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve vide, avec ou sans obstacle**

L'analyse des phénomènes qui suivent immédiatement la collision est très importante. Les figures ci-dessus permettent de décomposer les modes de fuite juste après un impact dans la double coque. Le conflit thermodynamique entre le gaz (liquide ou gazeux), l'eau ou l'air, le bouchon de glace et la possibilité de TRP sont à analyser.

C'est de cette phase que dépend la cinétique des événements qui vont suivre.

*Danger pour les structures et le navire*

Cuve impactée	Rupture, ouverture Surpression interne Elévation de température Explosion : TRP interne/externe. Glace, bouchon ...
Autres Cuves	Soumise à flux radiatif (si Incendie) Coule Soumise à TRP Soumises au froid Prise dans la glace Surpression Elévation de température
Coque Interne	Rupture fragile (acier standard) + travail normal (mer) + TRP + glace
Coque Externe	Rupture fragile (acier standard) + travail normal (mer) + TRP + glace
Raidisseurs	Perte de capacité mécanique, rupture
Navire	Rupture en deux parties Partie Arrière Dérive Sombre Partie avant Dérive Sombre Chavirement (envahissement + glace) Sombre (peu probable, calculé pour) Voie d'eau ballast

### *Bilan*

Soit la ductilité a joué son rôle et le système est stable, sans fuite.

Soit il se produit une fuite et le système devient instable. Le temps d'évolution dépend de la fuite initiale (mode et surface ouverte), des facteurs aggravants tels que l'état de la mer, les charges supplémentaires, l'éventuel incendie, des manœuvres tentées par les équipages et des facteurs améliorants comme le bouchon de glace et la vidange de la cuve.

**Scénario – Niveau 3 : facteurs générant, aggravant ou accélérant des événements à moyen terme**

*Rupture fragile*

Le déversement de méthane à très basse température sur des structures aciers chargées provoque la rupture fragile. Le phénomène est à cinétique rapide dès que les quantités déversées sont importantes.

*Incendie*

Igniteur	Echauffement structure (impact, houle+emboitement, étincelle (électrique, mécanique), rupture tuyauterie en pression, turbine hélicoptère, fumeur navire B, talkie walkie, opération de secours (matériel électrique), manipulations.
Débit	Suffisant pour générer nappe ? Insuffisant ?
Conditions météorologiques	Turbulence et force du vent atténuent-elles le risque d'incendie ou l'augmentent-elles ?
Type de feu	Feu interne Feu de nappe externe Chalumeau
Effet possible	Echauffement des cuves intactes (surpression dans les évènements et allumage du méthane dégazé) Effet sur les structures Effet sur la possibilité d'abandonner les navires A ou B.

*Manœuvre de B*

Suite à une collision entre un méthanier (A) et un navire éperonnant (B), le comportement de (B) peut être formalisé de la façon suivante :

- B s'extrait et porte assistance
- B s'amarre
- B s'extrait et fuit

*Evacuation*

Navire abandonné, capitaine reste ?  
Hélicoptère

*Procédure d'urgence*

Vidange de la cuve impactée à la mer (risque navire B ?)  
Ballastage, quel risque ?  
Transfert à autre cuve, à la mer, à un autre navire ?

### **Scénario – Niveau 4 : Evénement à long terme**

#### *Rupture avant fuite*

Opération de remorquage

Fatigue/fragilisation après dégât et l'évolution de l'état de la mer et de la météo

Charge supplémentaires : voie d'eau, navire B amarré, répartition inhabituelle de la cargaison après déchargement.

#### *Rupture après fuite « bouchée »*

Il peut exister des configurations où le conflit glace, bouchon, gaz et TRP conduit à la création d'un bouchon relativement stable à un instant donné. Quels sont les événements qui pourraient rendre ce bouchon instable ?

#### *Epave*

Flotte, coule, dérive ?

Diffusion du méthane dans l'eau.

Les modes d'échappement par les événements doivent être étudiés.

### **Scénario – Communication – Questionnaire**

La communication est élément essentiel pour réaliser une intervention réussie en toute sécurité sur un navire en difficulté. En particulier, la communication doit permettre de réduire le temps séparant l'appel de détresse et l'intervention elle-même.

D'après les résultats des réunions d'experts organisées dans le cadre de cette tâche :

- Le temps séparant l'appel de l'intervention est d'environ 1h (optimiste) à 3h (pessimiste)
- Le temps séparant l'accident et l'appel (du commandant ou de l'armateur) vers les autorités maritimes (CROSS, Préfecture maritime) peut varier de 15 minutes à 2 heures.
- Il existe des procédures pour coordonner les différents services qui interviennent dans la gestion de la crise. Le CROSS centralise l'information, coordonne l'intervention et prend en charge les mesures de protection et les déviations des routes de navigation.
- Les informations concernant les risques de fuites sont transmises au *CEDRE* et à la cellule de crise PreMar, et le cas échéant, à la préfecture ou au ministère.

Le tableau ci-après fournit une base de réflexion pour étudier et améliorer les échanges d'information entre deux navires entrés en collision et les services d'intervention compétents.

Liste des thèmes du questionnaire

Message de A	
Cuve impactée	Description Chargement Ou Cuve impliquée pleine Ou Cuve impliquée vide
Collision	Largeur proue/étrave enfoncée Angle d'attaque Profondeur enfoncée sur le pont
Description fuite	Indicateurs pression, niveau. Capteurs émanation méthane ?  Visuel : Explosions ? Flamme ?
Description des conditions extérieures	Etat Mer Et Etat Vent Heure
Message de B	
Collision	Largeur proue/étrave enfoncée Angle d'attaque Profondeur enfoncée sur le pont Diamètre du bulbe Masse totale Vitesse Largeur proue Angle d'attaque
Description fuite	Visuel : Explosions Flamme Nuage
Description des conditions extérieures	Etat Mer Et Etat Vent Heure

*Garder le contact*

Il peut être intéressant, pour la sécurité des secours, étant données les incertitudes sur la cinétique des événements, de s'informer en temps réel de l'évolution de l'accident auprès de l'équipage.

### **Mise en œuvre de la méthodologie pour le scénario « Echouement » Méthaniers**

#### *Mutatis Mutandis*

Le cas de l'échouement est semblable au cas de la collision :

Seuls les modes de fuite sous la flottaison pourraient subsister.

Le cas d'un déchirement sur une partie importante de la longueur du navire est envisageable (sur le Paul Kayser, c'était sur toute la longueur). L'énergie cinétique est amortie dans de meilleures conditions que dans une collision.

L'incendie semblerait beaucoup moins probable.

Si le navire reste bloqué sur le haut fond, l'effet de la marée et de la mer est critique pour la cinétique.

Il n'y a vraisemblablement pas d'autres expérimentations à mener pour ce cas. Par contre le questionnaire doit inclure l'échouement.

### **Description des Scénarios Opérationnels Exceptionnels**

Les scénarios d'incidents /accidents opérationnels en mer sont les suivants :

- Rupture de vanne/tuyauterie pendant transfert de cuve à cuve
- Rupture de vanne/tuyauterie pendant transfert de navire à navire
- Déversement d'urgence à la mer (procédure)

Dans les trois cas, pour les GPLiers, les débits à prendre en compte sont ceux d'une pompe de cuve qui ont des débits nominaux compris entre 800m<sup>3</sup>/h et 1700m<sup>3</sup>/h..

Le cas d'une rupture sur le pont pourrait générer un risque de fragilisation de la structure et se ramener au problème de rupture énoncé plus haut (selon l'état de la mer et du chargement).

Une décharge à la mer pourrait, elle, générer un risque de fragilisation sur la coque.

### **Description des Scénarios Opérationnels**

Les scénarios de fuites non accidentels ne sont peut-être pas d'une cinétique rapide, et leur apparition ne fait peut-être pas l'objet d'une intervention des secours.

Le scénario d'incendie dans la salle des machines est assez possible. Peut-il provoquer des effets thermiques sur la cuve arrière, comme un dégazage par l'évent ? Ce dégazage peut-il conduire à des débits/flammes dangereuses pour l'intervention ?

### **Description des Cibles Humaines**

Cible 1 = Equipage(s)

Cible 2 = Equipe d'intervention

Cible 3 = Individus proches site

Cible 4 = Population côtière

#### *Dangers pour l' (les) Equipage(s)*

- Incendie Généralisé autour du navire : pas de moyen de fuir
- Feu de Nappe
- Rupture Cryogénique : navire coule
- Asphyxie
- Brulures
- Hypothermie
- Gelure (tous degrés)
- Problème d'audition suite à explosion
- Evacuation par life boat impossible
- Equipage confiné dans un local protégé (difficile d'accès)

#### *Dangers pour l'Equipe d'intervention*

- Asphyxie en altitude : appareils respiratoires autonomes ?
- Inflammation du méthane en altitude (turbine hélicoptère)
- Inflammation en approche navire (vent turbulent, retour de nuage...peu probable ?)
- Rupture subite du navire + TRP en dessous de la zone survolée.
- Matériel : protection thermique contre le chaud et le froid.

#### *Dangers pour Individus proches site*

- Incendie généralisé autour du navire, feu de Nappe : Flux rayonné
- Rupture Navire : navire coupé en deux et dérive des deux parties
- Asphyxie
- Brulures
- Hypothermie

#### *Dangers pour Population côtière*

- Rupture Navire : navire coupé en deux et dérive des deux parties vers les côtes
- Panache atteignant la côte

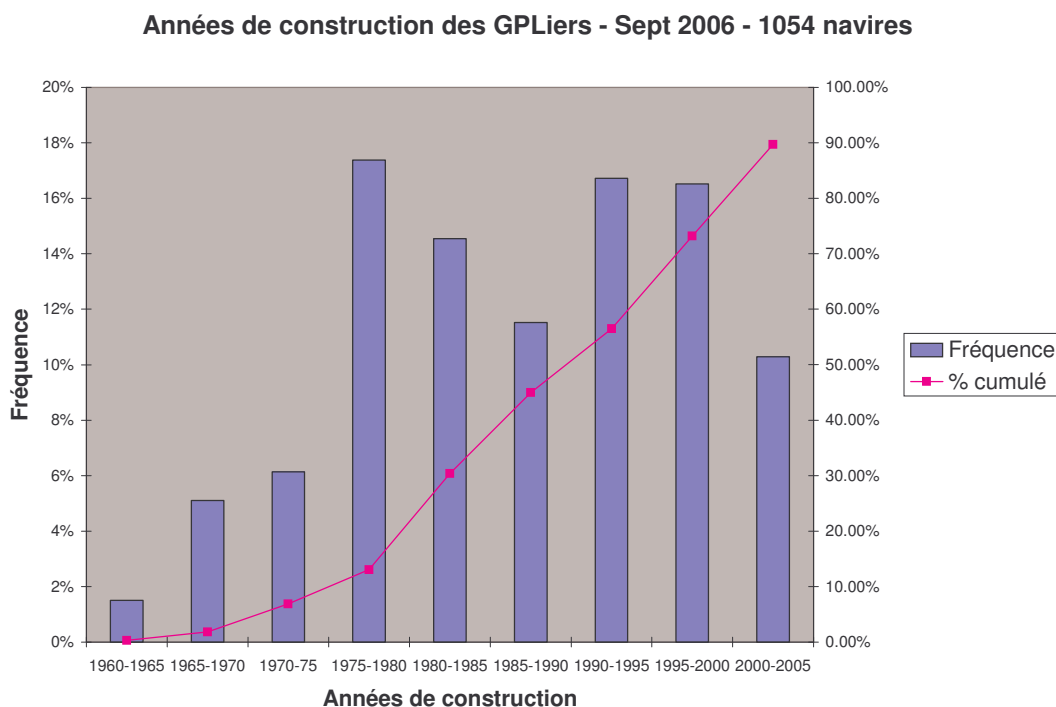
## 7. Annexe 2 : Éléments d'analyses pour l'établissement des scénarios GPLiers

### Caractérisation d'un GPLier type A et d'un GPLier type C

Pour définir ces deux types de GPLiers, les statistiques sur la flotte mondiale actuelle ont été utilisées.

#### *Ancienneté de la flotte et tendances à venir*

Contrairement aux méthaniers, l'ancienneté des GPLiers est relativement uniforme. Plus de 90% de la flotte a été construite après 1975. La distribution est uniforme, avec un léger repli de construction en 2000-2005, qui laisse penser que l'âge de la flotte sera stable, voire en diminution dans les prochaines années.

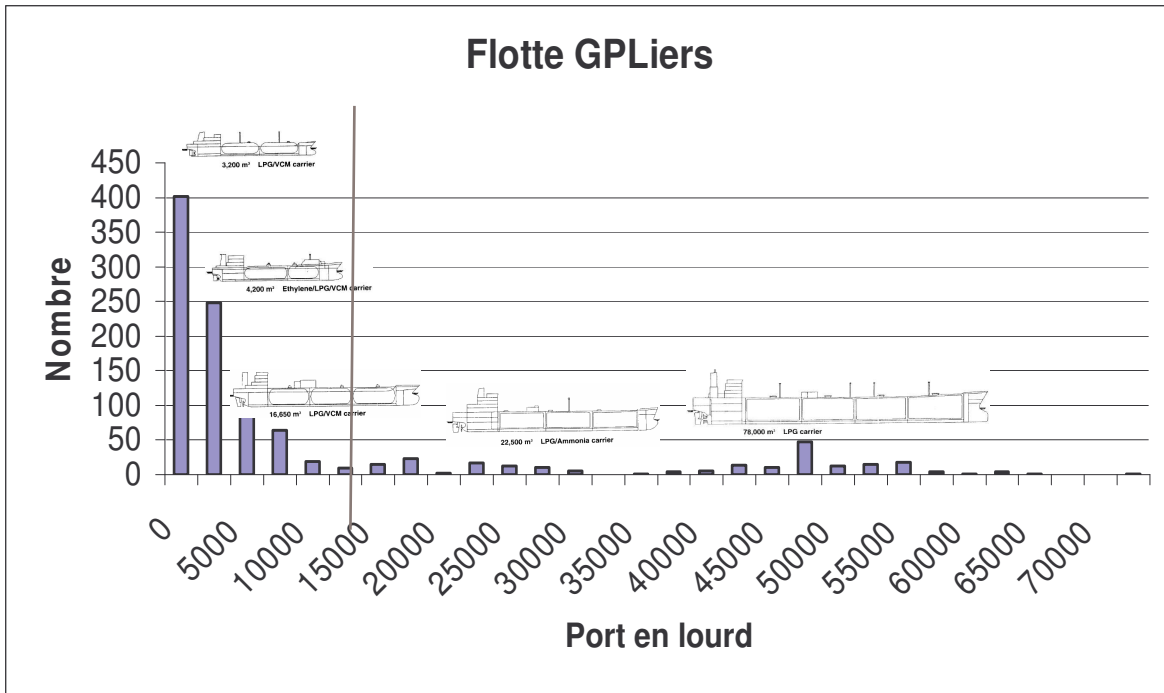


**Figure 20 : Année de construction de la flotte de GPLier 2006, [ 5 ]**



*Port en lourd*

Les navires de type C et les navires de type A se répartissent suivant la distribution suivante :



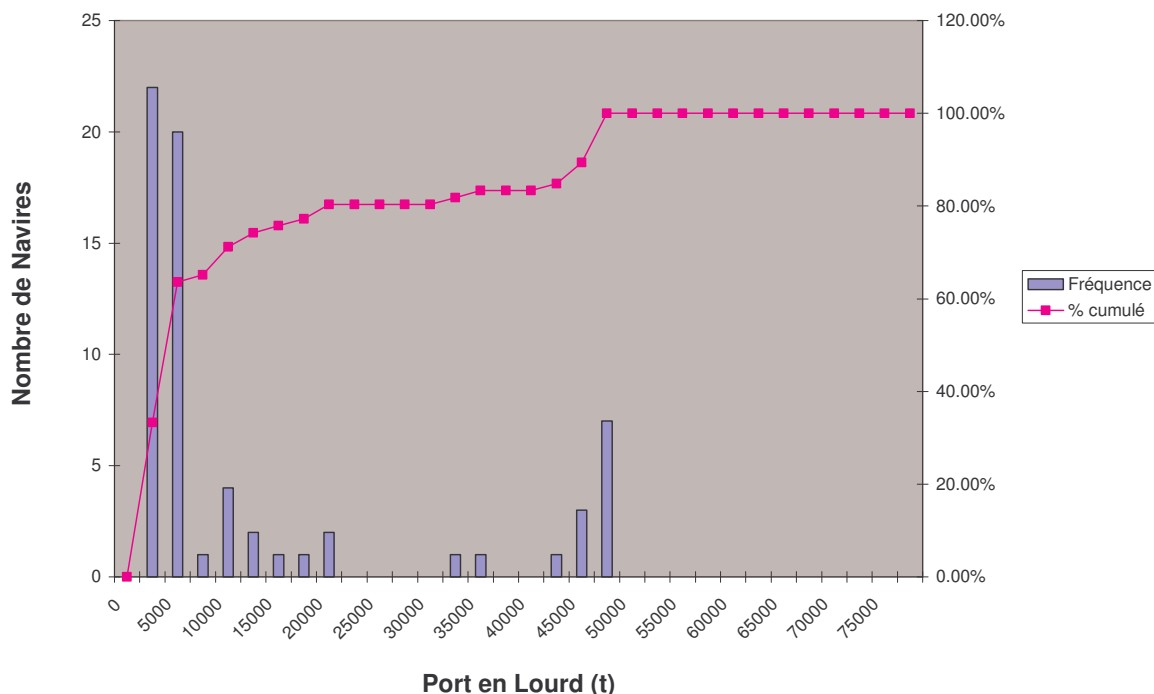
**Figure 21 : Répartition des Longueurs des navires dans la flotte mondiale GPLier 2006, [ 5 ]**

Les deux types de navire se distinguent avec l'un contenant 5 000 t en moyenne de cargaison (type C) et l'autre contenant en moyenne 45 000 t de cargaison.

*Eaux Françaises*

Total Gaz et Electricité a fourni les statistiques en ce qui concerne « sa » flotte. Elle dessert principalement l'Europe, et elle constitue une bonne photographie des GPLiers naviguant dans les eaux françaises :

**TOTAL Shipping Trading Activities**



**Figure 22: Port en lourd des navires qui ont transporté du GPL en 2006 pour Total [ 16 ]**

Cette répartition est en phase avec celle de la flotte mondiale. On retrouve bien les mêmes caractéristiques, à savoir que la population des 5 000 t est majoritaire, tandis que les plus gros transporteurs ont des ports en lourd de 40 000-50 000 t et sont en proportion non négligeable.

Remarque sur les Equipages :

La flotte de GPLiers étant stagnante et la flotte de méthaniers étant en très forte croissance, le besoin en équipiers sur les méthaniers croît très vite. Il a été discuté en réunion, sans conclure, qu'il était possible que les équipages GPLiers expérimentés soient attirés par les conditions avantageuses que propose le transport de GNL.

## 8. Annexe 3 : Éléments d'analyses pour l'établissement des scénarios Chimiquiers

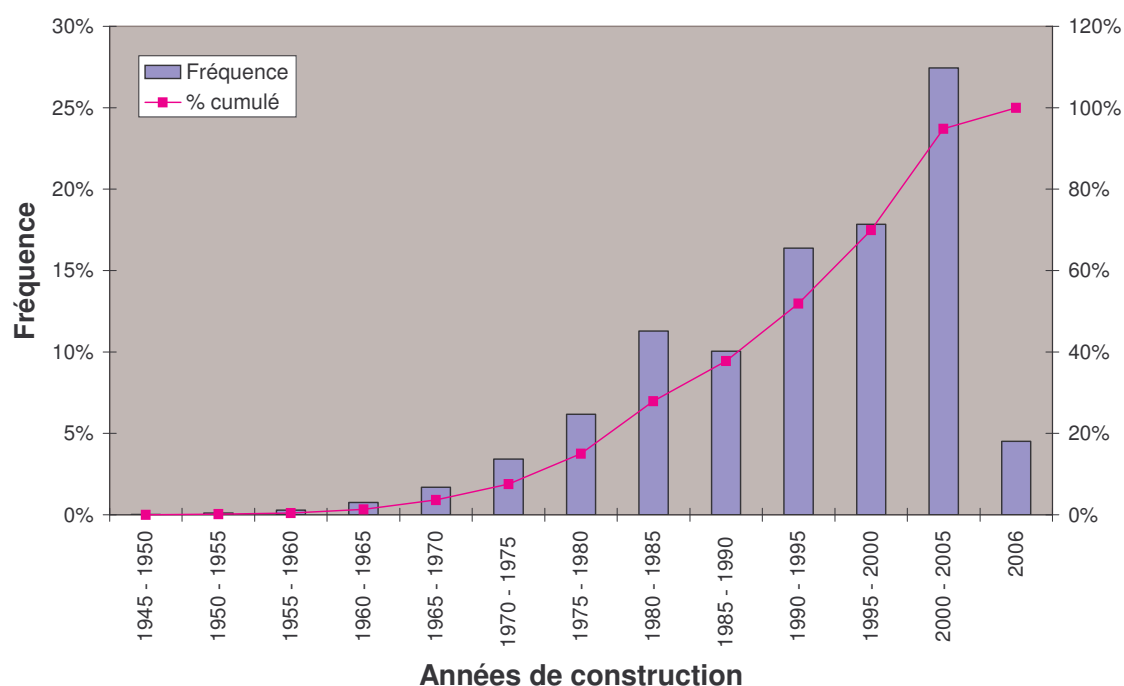
### Caractérisation d'un Chimiquier et d'un Chimiquier Pétrolier

Pour définir ces deux types de chimiquiers, les statistiques sur la flotte mondiale actuelle ont été utilisées.

#### *Ancienneté de la flotte et tendances à venir*

Contrairement aux GPLiers, plus l'âge des chimiquiers est grand et moins il y en a dans la population. Plus de 90% de la flotte a été construite après 1975. La tendance haussière des années de construction de la flotte 2006 laisse penser que la flotte est en extension. Cependant, le trafic européen n'est lui pas forcément en augmentation. La croissance des besoins en produits chimiques de base est surtout concentrée dans les zones des pays émergents.

**Flotte Chimiquiers et Chimiquiers/Pétroliers Sept 2006 - 2949 navires**

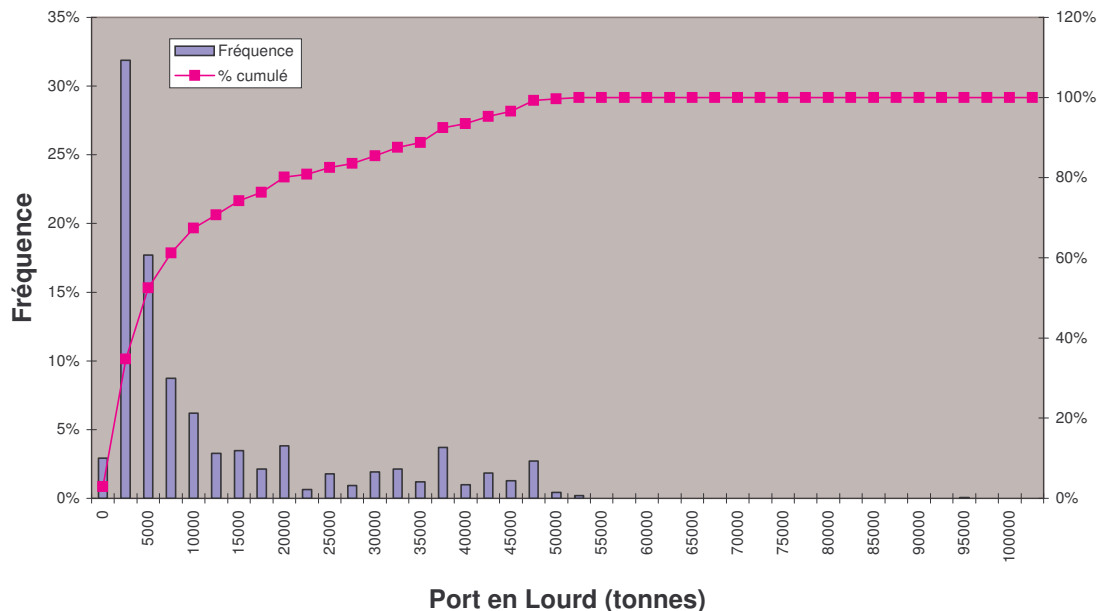


**Figure 23: Année de construction de la flotte de Chimiquier 2006, [ 5 ]**

*Port en lourd*

Les navires de type chimiquier pur et les navires de type chimiquier-pétrolier ont été séparés pour cette analyse :

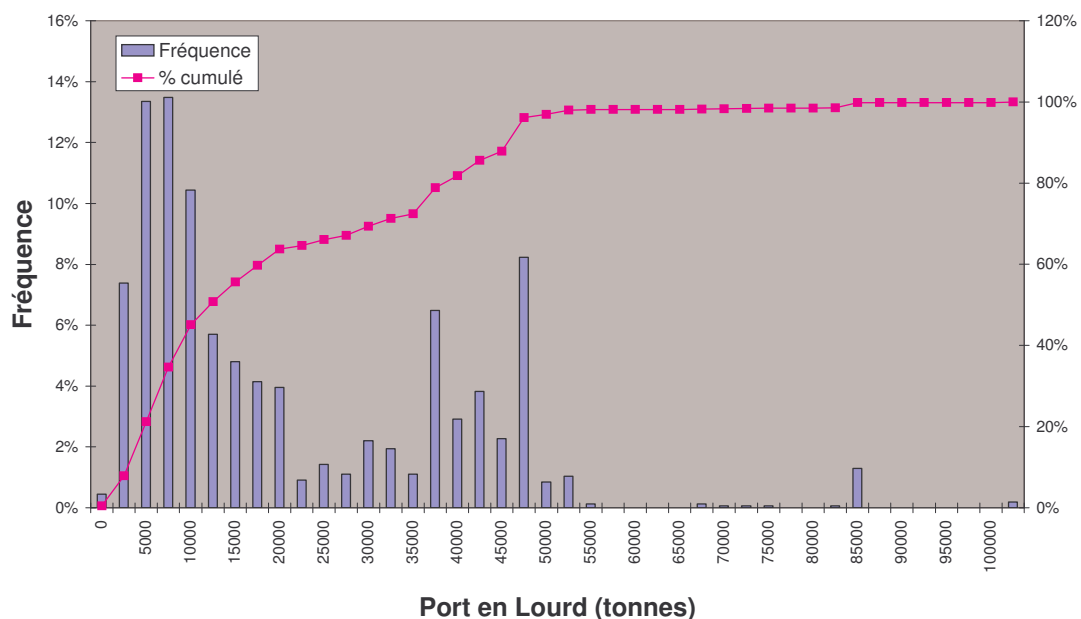
**Répartition des Ports en Lourd de la flotte des chimiquiers Sept 2006**



**Figure 24 : Répartition des ports en lourd des Chimiquiers purs flotte 2006, [ 5 ]**

Les chimiquiers purs sont majoritairement des navires de port en lourd de 5000 t. Cependant, il existe de gros port en lourd dans cette catégorie, jusqu'à 45 000 t.

**Répartition des Ports en Lourd de la flotte des chimiquiers pétroliers  
Sept 2006**



**Figure 25 : Répartition des ports en lourd des Chimiquiers pétroliers flotte 2006, [ 5 ]**

Cette répartition est décalée avec celle de la flotte de chimiquiers purs. Les plus petites cargaisons se répartissent de 5 000 t à 20 000 t, tandis que les plus gros transporteurs se répartissent de 35 000-50 000 t et sont en proportion importante (40% de la flotte).

La remarque sur les équipages GPLiers a aussi été discutée, sans conclure, à propos des équipages chimiquiers.

## 9. Annexe 4 : Calcul des volumes de référence concernant les rejets accidentels de pétrole

### 1. Calcul des volumes moyen et extrêmes rejetés dans le cas des navires à double-coque [ 13 ]

Navire coulé inclus	Port en lourd (t)	Capacité de 98%- (m <sup>3</sup> )	Rejet total moyen (% de cargaison – vol. m <sup>3</sup> )		Rejet extrême (% de cargaison – vol. m <sup>3</sup> )	
Non	5.000	5.849	1,7%	100 m <sup>3</sup>	<b>12,7%</b>	743 m <sup>3</sup>
Oui	5.000	5.849	11,3%	661 m <sup>3</sup>	<b>46,9%</b>	2742 m <sup>3</sup>

*En supposant une densité de produit de 0.855 t/m<sup>3</sup>*

La valeur de 12.7% a été retenue (ramenée à 10%) pour le rejet extrême des cargaisons de 5 000 tonnes (navires coulés exclus) et la valeur de 46.9% (ramenée à 50%) pour le rejet extrême (navires coulés inclus) dans le tableau présenté en §0

### 2. Calcul des volumes moyen et extrêmes rejetés dans le cas des navires à double-coque [ 14 ]

Port en lourd (t)	Capacité de 98%- (m <sup>3</sup> )	Arrangement des cuves	Rejet latéral moyen		Rejet par le fond moyen		Rejet total moyen	
5.000	5.849	5 x 2	<b>2%</b>	115 m <sup>3</sup>	1,2%	68 m <sup>3</sup>	1,5%	87 m <sup>3</sup>
40.000	46.783	5 x 2	1,9%	898 m <sup>3</sup>	1,1%	526 m <sup>3</sup>	1,4%	675 m <sup>3</sup>

*En supposant une densité de produit de 0.855 t/m<sup>3</sup>*

L'arrangement 5x2 est celui qui provoque les plus grandes fuites selon ce calcul d'*Herbert*. Il a été supposé englober les rejets paramétrés avec d'autres arrangements.

Pour la cargaison de 5 000 t et le rejet moyen, la valeur de 2% a été retenue dans le tableau présenté en §0.

### 3. Calcul des volumes moyen et extrêmes rejetés dans le cas des navires à simple-coque [ 15 ]

Port en lourd (t)	Capacité de 98%- (m <sup>3</sup> )	Rejet latéral moyen		Rejet par le fond moyen		Rejet total moyen		Rejet extrême	
40.600	41.948	2,4%	1003 m <sup>3</sup>	4.6%	1944 m <sup>3</sup>	<b>5,5%</b>	2303 m <sup>3</sup>	<b>17,3%</b>	7244 m <sup>3</sup>

*En supposant une densité de produit de 0.968 t/m<sup>3</sup>*

Dans le tableau présenté en §0, pour les cargaisons 40 000 t et le rejet moyen, la valeur de 5.5% (ramenée à 5%) a été retenue et pour le rejet extrême (hors navires coulés) la valeur de 17.3 % a été retenue (ramenée à 20%).

## CONCLUSION de la TACHE 1

Au terme de ce premier rapport, l'objectif principal a été atteint, à savoir, la définition de scénarios réalistes d'accidents.

Les gaz liquides et les produits liquides évaporants choisis ont conduit à définir des classes de navires représentatifs des produits sélectionnés pour l'étude.

L'analyse des accidents passés, en se basant sur ces produits (GNL, GPL, substances évaporantes liquides), et sur le type de navire, a conduit à retenir 15 scénarios. Ceux-ci, en nombre nécessairement limité, pour ne pas multiplier ou alourdir les fiches afin de rester dans un cadre opérationnel, constituent la pierre angulaire de l'étude.

Les discussions avec les opérationnels de l'intervention sur un navire en difficulté en haute-mer ont en effet permis de cadrer les besoins spécifiques à ce genre d'intervention. La Tâche 3 de Galerie reviendra plus précisément sur la structure et la teneur des fiches opérationnelles.

Les expérimentations qui vont être conduites et le développement des modélisations dans le champ proche et/ou lointain constituent l'objectif de la Tâche 2 qui devrait être réalisée entre 2007 et 2008. Les substances qui font l'objet d'expérimentation ont été choisies en prenant en compte les scénarios, les comportements et le niveau de danger des substances. Quatre produits ont été retenus. Ils couvrent un large spectre entre les gaz liquéfiés et les liquides évaporants.

Un accident est unique et les scénarios ne décrivent que très rarement les conditions rencontrées en alerte réelle alors que les modèles, quel que soit leur niveau de sophistication, ne prétendent pas décrire la réalité d'un phénomène. Ces ambiguïtés doivent rester présentes chez les opérationnels, soit sur le terrain, soit dans les PC de crise.

Cependant la première urgence, celle de la phase réflexe qui active les premières équipes dans les premières heures, y trouvera les éléments propres à assurer la sécurité des hommes, à imposer des zones de protection et enfin à préparer la première phase de réflexion. Nous sommes dans la période qui suit les premiers rapports de l'Equipe d'Evaluation Intervention. Les informations sur l'accident se précisent et les fiches-guides des scénarios constituent encore à ce niveau une base relativement fiable pour déjà entrevoir et discuter les premières anticipations.

Cedre  
715, rue Alain Colas, CS 41836  
29218 BREST CEDEX 2 - FRANCE

Tél : 33 (0)2 98 33 10 10  
Fax : 33 (0)2 98 44 91 38  
Courriel : [contact@cedre.fr](mailto:contact@cedre.fr)  
Internet : <http://www.cedre.fr>

Références du contrat : **Convention ANR 0594C0065**

# GALERNE

## TACHE 2 : Etudes sur le comportement des gaz liquéfiés.

**Coordonné par :**  
Fanch Cabioc'h

Validé

**Relu par :**  
Stéphane le Floch

Validé

**Contrôlé par :**  
Georges Peigné,  
Adjoint au Directeur

Validé

**Mots clefs :** Gaz Liquides-Simulations-Expérimentations-Survol Aéronef-Champ proche-Champ lointain-PHAST-CHEMMAP-EVOLCODE-MERCURE-MOTHY-PERLE

**Nombre de pages :** 376

**Diffusion : Envoi informatique**

-Total Gaz	Marine Nationale:
-TPC	-Ceppol
-DSC	-Marins-Pompiers
-Météo France	-Service Environnement
-Bureau Véritas	(LV Brohan)
-BEA Mer	
-INERIS	
-GDF Suez	

**Classement / copies internes :**  
INTERVENTION, DOCUMENTATION

**Références Cedre, date :** R.09.42.C / 3278, octobre 2009.





## TACHE 2

# RÉSUMÉ OPERATIONNEL : ÉTUDES SUR LE COMPORTEMENT DES GAZ LIQUÉFIÉS ET DES LIQUIDES ÉVAPORANTS

### **Introduction et Rappels**

Le projet GALERNE vise avant tout à produire des fiches d'intervention pour les personnels des Equipes Intervention Evaluation de la Marine nationale hélicoptères sur un navire sinistré transportant un gaz liquéfié. Pour ce faire, il nous fallut définir des scénarios d'accidents (objet de la Tâche 1 du projet) et approfondir nos connaissances pratiques et théoriques sur le comportement des substances définies dans la Tâche 1.

L'approfondissement de ces connaissances constitue la Tâche 2 du projet, objet du présent rapport.

Le plan initialement prévu dans notre proposition a été remanié, certaines parties ayant été naturellement regroupées pour des raisons avant tout pragmatiques.

Ainsi, la partie 2.4 du programme initial, « Les risques spécifiques liés au transport de GNL » sera intégrée dans la partie 2.1 « Modélisation des scénarios de fuite dans le champ proche ».

Les expérimentations en bassin, construit pour l'occasion au centre d'essai de l'INERIS (et non pas au *Cedre* comme prévu dans le programme initial), ont permis de mesurer le comportement des gaz liquéfiés libérés en surface, bien au-delà de ce que prévoyait le projet initial, avec 23 tirs effectués à l'aide d'un dispositif expérimental très complet.

Compte tenu de la complexité des études conduites, dont la densité va bien au-delà de ce qui était prévu initialement, nous n'avons pas abordé la problématique « épaves reposant sur le fond », ni celle relative à la dissolution de substances solubles à partir de ces épaves.

## **Les scénarios (rappel de la Tâche 1)**

La partie 1 du projet Galerne est parue il y a plus de deux ans (juin 2006). Cette première tâche visait à cadrer et définir les scénarios de déversement à partir desquels les « fiches intervention » doivent être rédigées.

Neuf gaz liquides et substances liquides flottantes évaporantes ont ainsi été considérés, aboutissant à l'élaboration de 15 scénarios d'accidents :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL) : cinq scénarios
- Ammoniac : un scénario
- Chlorure de vinyle : un scénario
- Butane ou Propane ou Propylène : un scénario
- Ethylène réfrigéré : un scénario
- Xylènes : deux scénarios
- Benzène : quatre scénarios

A chaque scénario correspondent trois diamètres de brèche dans la coque du navire : 20 cm<sup>2</sup>, 5 dm<sup>2</sup>, 2 m<sup>2</sup>.

Quatre niveaux d'événement ont été définis :

- facteur initiateur ;
- conséquences immédiates ;
- facteurs aggravants ;
- risque à moyen terme.

## **Les conditions atmosphériques choisies dans les scénarios**

Météo France a fourni un descriptif complet de différentes situations météorologiques réelles en Manche correspondant à des forces du vent, stabilités d'atmosphère et coefficients de marée variables (Tableau 1).

Date	Coefficient de marée	Vitesse du vent (m.s <sup>-1</sup> )	Classe de stabilité (Pasquill)	Nébulosité	Température de surface (K)
24/04/1979	95	10,2	D	Peu nuageux à nuageux	282,9
18/10/1980	37	9,8	C	Très nuageux	287,5
04/07/1979	42	2,0	F	Ciel clair, brume possible	288,1
17/10/1985	89	4,5	B	Couvert	288,4
16/04/1984	112	6,6	C-D	Peu nuageux à nuageux	282,6
23/04/1991	50	5,6	E-D	Peu nuageux à nuageux	282,6

*Tableau 1 : Dates de simulation retenues avec leurs principales caractéristiques océanographiques et météorologiques.*

La classification de Pasquill, notée de A à F par ordre de stabilité croissante, permet de quantifier de manière aisée le niveau de stabilité de l'atmosphère. Le niveau de stabilité influe fortement sur la dispersion du gaz et, par voie de conséquence, sur les niveaux de concentration obtenus en fonction de la distance du point de rejet.

### **La dispersion atmosphérique dans le « champ proche »**

Les gaz réfrigérés se comportent pendant une première phase comme des gaz denses, se traduisant par un nuage s'étalant en surface sous l'effet de la gravité et par la réduction du mélange avec l'atmosphère ambiante du fait de la stratification.

Le comportement dans le champ proche (moins de un kilomètre de la source) des gaz libérés a été modélisé à l'aide de trois logiciels :

PHAST, logiciel de dispersion dit « intégral » des gaz lourds provenant de la vaporisation de gaz liquéfiés ou l'évaporation de liquides. Comme tout modèle de ce type, les hypothèses de calculs prennent en compte des situations simplifiées (nappes circulaires, gradient horizontal constant, épaisseur de nappe supérieure à 1 mm, absence de module pour des vents très faibles ou des stabilités atmosphériques très fortes...). Cependant PHAST est un modèle relativement simple d'utilisation qui a été validé à de nombreuses reprises par différents instituts opérationnels ou de recherche. Son emploi est reconnu davantage lors de planifications que lors de situations accidentelles.

EVOLCODE (développé par GDF SUEZ) dispose d'un logiciel de calculs d'étalement et de vaporisation de nappes liquides (EVANUM) et d'un modèle de dispersion de GNL/GPL (EOLE).

MERCURE (développé par EdF) est un modèle complexe traitant de la dispersion des gaz lourds. Il prend en compte des équations complètes de mécanique des fluides.

Les simulations concernant le GNL donnent des distances à la LII (Limite Inférieure d'Inflammabilité) légèrement supérieures à l'aide d'EVOLCODE pour les scénarios de brèche jusqu'à 2m<sup>2</sup> alors que MERCURE, qui a été utilisé pour simuler un déversement à travers une brèche de 4,5 m<sup>2</sup> de surface donne des résultats très différents de PHAST. Bien que non définie dans les scénarios initiaux, il est apparu ultérieurement que cette surface correspondait à une vidange de cuve plus « instantanée ». La majoration observée avec MERCURE de la distance à la LII est de l'ordre de 40%. La prise en compte de la présence du navire permet en partie d'expliquer ces différences, mais aucune validation de « terrain » n'a à ce jour été faite.

Sans entrer dans le détail des résultats qui seront précisés dans les « fiches intervention » de la partie 3 du projet, il faut retenir les points suivants :

- importance fondamentale des conditions de stabilité atmosphérique sur les zones d'exclusions. Les distances dangereuses peuvent varier d'un facteur 10 à 30 entre des conditions stables (ciel couvert, vents faibles) et instables (vent fort, ensoleillement) ;
- les gaz réfrigérés se comportent comme des gaz denses tant qu'ils sont froids. Les gaz froids restent visibles dans un premier temps du fait de la condensation de l'humidité de l'air ;
- une cuve de 40 000 m<sup>3</sup> se déversant en mer par l'intermédiaire d'une brèche de 2 m<sup>2</sup> entraînerait une zone d'extension de nuage correspondant à 50% de la LII de 7 500 m par atmosphère stable (vents faibles) et de 1 300m pour une atmosphère plus instable (17/10/1985)
- un déversement d'Ammoniac (le plus toxique des gaz choisis) en surface présente des zones de danger très importantes, allant bien au-delà du champ proche (10 km) pour les Seuils d'Effets Réversibles (30') ;
- l'impact de l'Ammoniac est tempéré par le fait de sa solubilité importante dans l'eau, non prise en compte dans les modèles. En cas de fuite sous la ligne de flottaison, certaines sources mentionnent que plus de la moitié de l'ammoniac libéré se dissoudra avant d'atteindre la surface. De même la pluie, les embruns, la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, joueront un rôle important dans sa dissolution. Si la modélisation présentée dans ce rapport prend en compte uniquement un transport pressurisé à température ambiante, un transport d'Ammoniac réfrigéré impacté au dessus de la ligne de flottaison, verra la création d'une flaque en surface de l'eau, flaque qui se dissoudra en grande partie, ce qui limitera la propagation du nuage gazeux toxique ;
- l'impact réel des substances cryogénées (GNL, Ethylène, Ammoniac sous certaines formes de transport...) sur la structure du navire, n'est pas défini avec certitude (pas de cas survenu dans le passé), surtout en cas de fuite dans les ballasts et de Transition Rapide de Phase.

## La dispersion des gaz dans le champ lointain

Pour ce qui concerne les **gaz liquéfiés**, les termes sources du modèle PERLE de METEO FRANCE sont constitués de parallélépipèdes de volume donné contenant une masse de produit gazeux donnée. Dans le but de fournir un terme source au modèle de grande échelle PERLE, le logiciel PHAST a été utilisé. La méthode est relativement simple et pour chaque scénario définit un ou deux parallélépipèdes dont la distance au sol n'excède pas 10 km, distance maximum de fiabilité de PHAST. Les volumes de chaque parallélépipède déterminent la concentration moyenne en gaz. Ceux-ci ont alors atteint un point d'équilibre (gaz passif) qui permet à PERLE de prendre le relais de PHAST.

Ce travail préparatoire terminé, bien que présentant des limites (lissage artificiel, choix du nombre de « boîtes sources » influant sur le panache initial, passivité des gaz atteinte à des distances variables dépendant des conditions atmosphériques et parfois au-delà du domaine de validité de PHAST...), la méthode a été appliquée sur l'Ammoniac (3 600 tonnes) qui possède des seuils de toxicité notoire à faibles concentrations soit une valeur ERPG1 (Emergency Response Planning Guidelines )de 25 ppm. Deux types de rejets ont été simulés : 70' et 100 ''.

Le tableau 2 est édifiant sur les risques présentés par un déversement d'Ammoniac. Les autres gaz toxiques (y compris le Chlorure de Vinyle) donnent des valeurs inférieures aux concentrations dangereuses (y compris en atmosphère stable) au-delà de 10 kilomètres.

Date	Scénario	Rejet + 2h		Rejet + 4h		Rejet + 6h	
		Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)
04/07/79	B	900	20	577	40	428	75
	C	752	20	614	40	318	75
17/10/85	B	227	20	146	50	88	70
	C	190	30	254	60	169	80
23/04/91	B	366	20	149	60	144	100
	C	189	40	144	75	116	100

Tableau 2 : rejet accidentel de 3 600 t d'Ammoniac. Concentration maximale et distance du centre du panache au point de rejet, à différentes échéances, pour les différentes simulations. Scénario B rejet de 70' (5dm<sup>2</sup>), scénario C rejet instantané (100 s pour une brèche de 2 m<sup>2</sup>).

Pour le cas des liquides **Flottants/Evaporants (Xylènes)** Météo France a procédé au couplage des modèles MOTHY et PERLE. L'influence des vents, prépondérante par rapport à la température lors des phénomènes d'évaporation de substances liquides, est quantifiée dans le modèle. Météo France propose une méthode pour déterminer les surfaces de nappes à partir des sorties du modèle MOTHY.

Les simulations faites pour les Xylènes (formation d'une nappe flottante/Evaporante) du fait de la relative rémanence du produit en surface (pouvant aller jusqu'à quelques heures avant évaporation totale) exigent le calcul de taux d'évaporation, d'un rayon de nappe et *in fine* de la masse de produit rejetée dans l'atmosphère en fonction du temps. Ainsi la

persistance de la nappe issue d'un déversement de 2 500 tonnes de Xylènes varie de 60 minutes (vents 10m/s) à 125minutes (vents de 2m/s).

Quelles que soient les conditions externes (météo-océaniques), compte tenu de l'alternance des marées (simulations faites en Manche, à l'ouest d'Aurigny) et de la persistance du produit (Xylènes), la nappe de polluant flottant ne s'éloigne pas à plus de 10 kilomètres du point de déversement.

Que ce soit en cas de déversement instantané (15 minutes) ou prolongé (24 heures), les concentrations dans l'atmosphère (moyenne dans la couche 0-10 mètres) restent en deçà de 100 ppm. Pour mémoire la valeur AEGL1- 60minutes (Acute Exposure Guidelines Levels) est de 130 ppm), même en cas d'atmosphère stable.

Une simulation effectuée par Météo France près des côtes marseillaises montre que près des côtes, un forçage météorologique à fine échelle (résolution de 2 kilomètres) est recommandé.

## **Les expérimentations : mesure des panaches et des comportements**

Afin de lever des incertitudes sur la formation des panaches gazeux et illustrer le comportement des gaz liquéfiés par le biais de mesures et d'observations, l'Inéris a procédé à des expérimentations qui ont nécessité la mise au point d'une infrastructure importante et de moyens de mesure originaux. Ce bassin de 100m<sup>3</sup> d'eau salée doté d'un générateur de vent et de vagues a fait l'objet de 23 « tirs ». Ceux-ci ont concerné des produits non toxiques. Le GNL, interdit de roulage routier en France a été remplacé par de l'azote liquide à -190°C.

D'autres gaz liquides ont été testés, tels le Butane (T ébullition =-42°C), le Propane (Teb=-1°C) et le Pentane (Teb=+36°C).



Photo 1. Dispositif expérimental

Les jets d'Azote liquide (d'environ 0,5 kg/s à 0,9 kg/s), de Butane et de Propane, permettent d'observer la formation d'un cône de mélange sous marin dont le bouillonnement induit des mouvements de masse d'eau et de surface. Dans le cône, le mélange intime entre les produits et l'eau (formation de bulles) est le siège du processus d'ébullition et d'échanges thermiques importants.

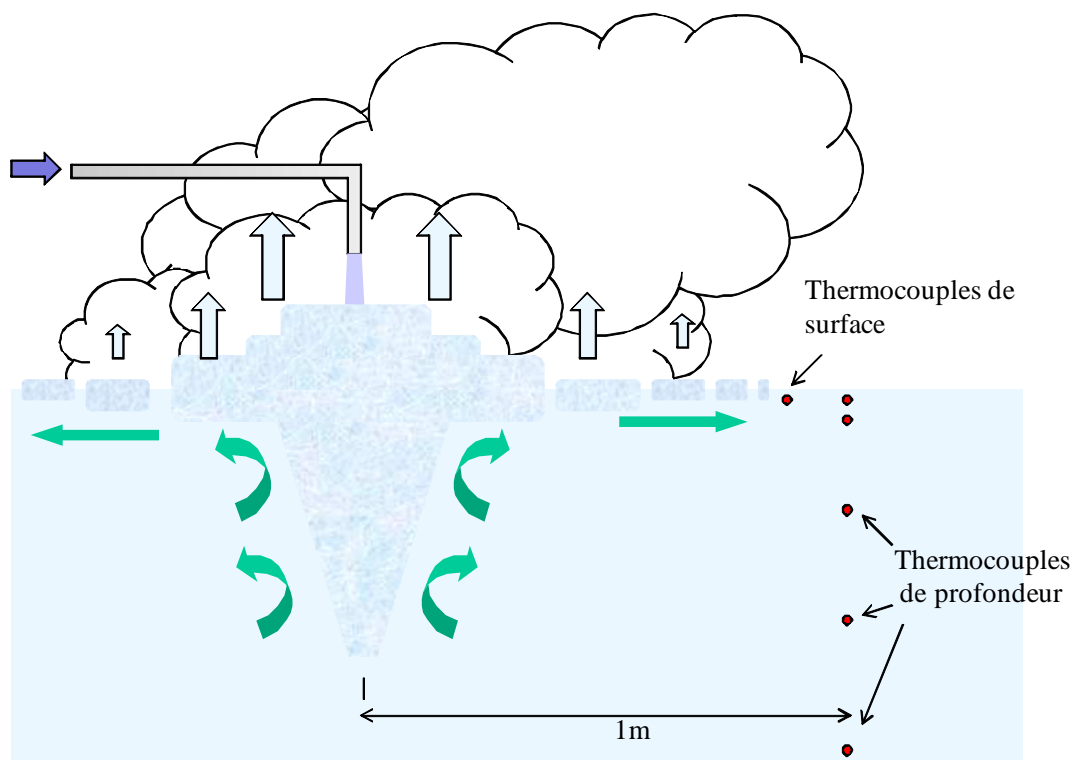


Figure 1 : cône et phénomènes générés par un rejet de liquide cryogénique en surface.

L'influence des vagues sur l'évaporation du Pentane (nappe liquide qui s'étale en surface) conduit à une augmentation du taux d'évaporation de plus d'un facteur 2, malgré une surface de nappe réduite de plus de 50% par rapport à une surface sans vague.

L'interprétation qui est faite de ce phénomène prendrait en compte des phénomènes de variation d'épaisseur de sous-couche laminaire. Mais il ne s'agit là que d'une hypothèse<sup>1</sup> [1].

L'influence des vagues paraît moins prégnante sur le phénomène d'ébullition par cônes sous-marins.

Le point visant à estimer la concentration de gaz dans le nuage évaporé a fait l'objet d'une résolution originale, à savoir l'utilisation de thermocouples.

Il apparaît que le nuage dense s'effondre sous l'effet de la densité, prioritairement par rapport aux turbulences de surface générées par le vent (des ventilateurs dans notre cas). Cet effet de densité fait que les zones explosibles ne dépassent pas 1 mètre d'épaisseur au dessus de l'eau. Par ailleurs, il a été montré que le nuage visible (du fait de la condensation des vapeurs d'eau, des aérosols d'eau entraînés par le bouillonnement...) ne correspond pas à la zone dangereuse du nuage et que les zones inflammables peuvent être mesurées en aval du nuage visible.

<sup>1</sup> Une communication orale de Théo Kremer (TNO, Pays Bas) lors d'Interspill (mai 2009), faisait état de possibles zones de dépressions générées par les vagues. Ces dépressions très localisées seraient d'après lui à l'origine de l'augmentation des taux d'évaporation observés en mer formée.

Ces expérimentations montrent que les phénomènes d'évaporation et de dispersion de gaz en mer sont régis par des lois de comportement différentes de celles appliquées pour un déversement sur un sol.

## La pénétration d'un gaz dans un aéronef

Dans l'impossibilité de reprendre des expérimentations de gaz traceur, nous avons comparé les résultats effectués lors de campagnes Pollutmar des années 1990 à 1992 avec des modélisations réalisées à l'aide de deux modèles : Chemmap, modèle d'urgence disponible au *Cedre* et Phast dont nous avons déjà parlé.

Les aéronefs survolant une nappe (hélicoptères en vol stationnaire) ou en dynamique (avions de surveillance) ont cette particularité soit d'être ouverts sur l'extérieur, soit de n'être pas pressurisés. Nous considérons donc que la pénétration d'un gaz dans un habitacle est quasi instantanée.

Les essais de Pollutmar 5 et 6 ont permis de mesurer les Coefficients de Transfert Atmosphériques, à partir d'un gaz marqueur, le SF6. Cette valeur du CTA connue, à partir des taux d'évaporation, de la surface de la nappe évaporante, il a été possible de calculer la concentration en produit à une altitude donnée.

$$[C_{\text{gaz}}] = \text{CTA altitude} \times Q_{\text{polluant}}$$

Les résultats montrent que le pic de concentration pour une nappe de 1000m<sup>2</sup> se situe à 20mètres d'altitude, altitude à laquelle pour l'Ammoniac les concentrations atteignent des seuils toxiques soit 400ppm (figure 2).

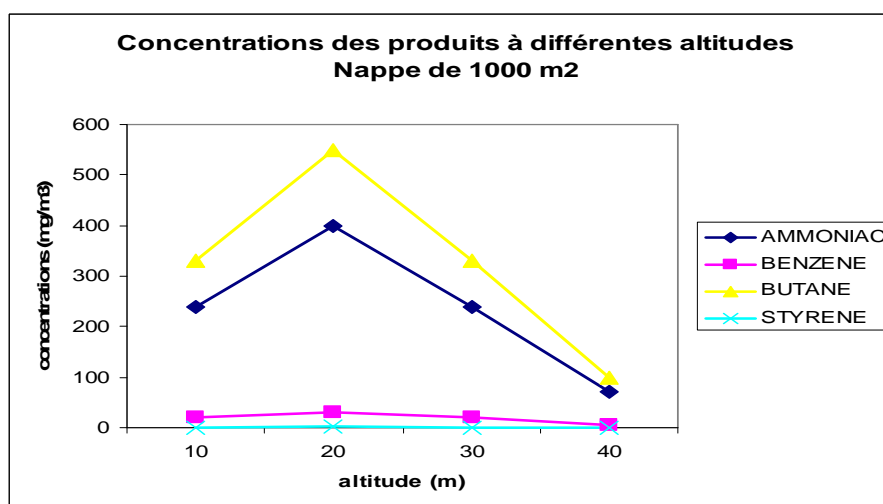


Figure 2. Concentrations maximales en différents gaz, calculées lors de Pollutmar5

Un hélitreuillage étant très délicat à opérer par grands vents au-delà d'une hauteur de 30 mètres nous voyons qu'une intervention sur un navire transportant de l'Ammoniac et présentant des fuites, sera à envisager avec une très grande prudence, si l'équipage n'est plus à bord ou n'est plus en état de renseigner les sauveteurs sur les concentrations en substance à bord.

Pour ce qui concerne les modélisations, le tableau 4 donne des éléments de comparaison sur les différentes concentrations susceptibles d'être rencontrées.



Les résultats sont conformes à ce qu'on pouvait attendre :

- le modèle CHEMMAP maximalise les concentrations ;
- PHAST donne des valeurs tantôt sous celles observées, tantôt au-delà.
- Nous n'expliquons pas le pic de concentrations observé à 20m lors de Pollutmar

Pour information le tableau 3 donne les valeurs toxiques ou d'inflammabilité.

<b>SEUILS RETENUS</b>		
	Toxicité	Inflammabilité (1/10 LIE)
AMMONIAC	100 ppm	15500 ppm
BENZENE	50 ppm	1200 ppm
BUTANE		1400 ppm
STYRENE	50 ppm	900 ppm

Tableau 3. Valeurs seuils retenues.

<b>AMMONIAC</b>												
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)											
	PHAST (BC4)				POLLUTMAR				CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	700	280	140	80	360	570	360	100	2200	1500	1100	800
10t (Qw)	1800	800	450	300	3400	5700	3400	1000	11500	7200	5800	3600

<b>BENZENE</b>												
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)											
	PHAST (BC4)				POLLUTMAR 5				CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	30	10	4	1	7	10	7	2	310	310	160	40
10t (Qw)	100	40	20	14	60	100	60	20	240	620	70	70

<b>BUTANE</b>												
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)											
	PHAST (BC4)				POLLUTMAR 5				CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	500	200	120	70	150	230	150	42	4200	2600	210	210
10t (Qw)	1000	550	320	230	1400	2300	1400	420	37800	16800	3400	2600

<b>STYRENE</b>												
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)											
	PHAST (BC4)				POLLUTMAR 5				CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
10t (Qw)	30	9	4	2.5	3.5	6	3.5	1	18	35	18	3

Tableau 4. Modélisation des différentes concentrations en gaz à l'aide de Chemmap, de Phast et lors de l'expérience Pollutmar 5.

**Enfin pour terminer ce tour d'horizon des résultats de la tâche 2**, les différents points qui ont été étudiés -Modélisations-Expérimentations- permettent de rédiger des fiches Intervention prévues dans la Tâche 3 du projet Galerne.

Beaucoup de points restent à creuser, non pas uniquement par manque de temps mais parce qu'ils constituent des projets de recherche en eux même. Les expérimentations faites à l'Inéris ont été aux frontières des connaissances des phénomènes se produisant dans les couches limites et sur les facteurs conditionnant le devenir des produits évaporants et des liquides cryogénés.

De même, dans un domaine plus appliqué, il y aurait un intérêt à rendre opérationnel le couplage des modèles de champ proche et de champ lointain.

La perturbation d'un nuage gazeux suite à la présence d'un aéronef reste à quantifier avec précision.

Enfin, il existe un besoin criant de validation des modèles, soit en milieu contrôlé soit en mer ouverte, à l'aide soit de gaz marqueurs en mer ouverte ou de substances dangereuses à l'aide d'un pilote correctement adapté et sécurisé.

# **SOMMAIRE**

**CHAPITRE 1** : Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer- Champ proche.

**CHAPITRE 2** : Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer- Champ lointain.

**2-A** : Le couplage PHAST/ PERLE

**2-B.**: Le couplage MOTHY/PERLE

**CHAPITRE 3** : Rejets de liquides cryogéniques et de liquides évaporants en bassin.

**CHAPITRE 4** : Evaluation du risque pour le personnel d'intervention aéroporté lors d'accidents maritimes impliquant des substances dangereuses évaporantes.

**CONCLUSION**

# CHAPITRE 1

RAPPORT D'ÉTUDE  
N°DRA-09-74701-09336B

30/09/2009

**GALERNE – Tâche 2**

**Modélisations des scénarios de fuite de  
substances toxiques en mer- Champ proche**

## **GALERNE – Tâche 2**

### **Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer – Champ proche**

Verneuil-en-Halatte (Oise)

Client : ANR/PRECODD, MEEDDAT

Liste des personnes ayant participé à l'étude : T. Pénélon, F. Antoine, Julien Duhart (GDF SUEZ)

## PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Étant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	T. Pénelon	R. Bouet	B. Piquette
<b>Qualité</b>	Ingénieur Unité Explosion-Dispersion Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Explosion-Dispersion Direction des Risques Accidentels	Responsable du pôle PHDS Direction des Risques Accidentels
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. GLOSSAIRE ET ACRONYMES.....</b>	<b>7</b>
<b>2. INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
2.1 Contexte .....	9
2.2 Objectifs de la tâche 2 .....	9
2.3 Objet du rapport.....	10
<b>3. ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES MODÈLES DE FORMATION DE     NAPPE ET D'ÉVAPORATION/DE VAPORISATION .....</b>	<b>13</b>
3.1 Formation d'une nappe à la surface de l'eau .....	13
3.2 Évaporation et vaporisation .....	14
3.2.1 Phénomène d'évaporation d'une nappe de liquide sur l'eau.....	15
3.2.2 Phénomène d'ébullition d'un gaz liquéfié sur l'eau.....	15
3.3 Effet des vagues et des courants.....	17
3.4 Transitions rapides de phase.....	17
3.5 Dispersion atmosphérique de gaz lourds en milieu maritime.....	18
3.5.1 Généralités.....	18
3.5.2 Rugosité de la surface.....	20
3.5.3 Stabilité de l'atmosphère.....	21
3.5.4 Visibilité du nuage .....	21
<b>4. SCÉNARIOS ET OUTILS DE CALCUL.....</b>	<b>23</b>
4.1 Scénarios retenus.....	23
4.1.1 Scénarios GNL.....	23
4.1.2 Scénarios Gaz Liquéfiés .....	28
4.1.3 Scénarios Liquides Évaporants.....	30
4.2 Situations météorologiques.....	31
4.3 Outils de calcul.....	32
4.3.1 L'outil de calcul générique PHAST .....	32
4.3.1.1 Modèle d'évaporation/vaporisation de nappe liquide sur l'eau .....	33
4.3.1.2 Modèle de dispersion atmosphérique.....	35
4.3.2 EVOLCODE .....	37
4.3.2.1 EVANUM : Étalement et vaporisation de nappe liquide.....	37
4.3.2.2 EOLE : Dispersion de GNL/GPL.....	37



4.3.3 MERCURE .....	39
<b>5. RÉSULTATS DE SIMULATION.....</b>	<b>41</b>
5.1 Situations météorologiques .....	41
5.2 Résultats de simulation selon les produits.....	42
5.2.1 GNL (simulations avec PHAST).....	42
5.2.1.1 Scénario 1/3a - 20 cm <sup>2</sup> .....	43
5.2.1.2 Scénario 1/3b - 5 dm <sup>2</sup> .....	44
5.2.1.3 Scénario 1/3c – 2 m <sup>2</sup> .....	45
5.2.1.4 Scénario 1/3d – 4,5 m <sup>2</sup> .....	47
5.2.2 GNL (simulations avec EVOLCODE et MERCURE).....	48
5.2.3 Ammoniac.....	53
5.2.3.1 Scénario 6a - 20 cm <sup>2</sup> .....	53
5.2.3.2 Scénario 6b - 5 dm <sup>2</sup> .....	54
5.2.3.3 Scénario 6c - 2 m <sup>2</sup> .....	55
5.2.4 Chlorure de vinyle monomère (CVM).....	58
5.2.4.1 Scénario 7a – 20 cm <sup>2</sup> .....	58
5.2.4.2 Scénario 7b - 5 dm <sup>2</sup> .....	59
5.2.4.3 Scénario 7c - 2 m <sup>2</sup> .....	60
5.2.5 Propane .....	61
5.2.5.1 Scénario 8a - 20 cm <sup>2</sup> .....	61
5.2.5.2 Scénario 8b - 5 dm <sup>2</sup> .....	62
5.2.5.3 Scénario 8c - 2 m <sup>2</sup> .....	63
5.2.6 Éthylène .....	65
5.2.6.1 Scénario 9a - 20 cm <sup>2</sup> .....	65
5.2.6.2 Scénario 9b - 5 dm <sup>2</sup> .....	67
5.2.6.3 Scénario 9c - 2 m <sup>2</sup> .....	68
5.2.7 Xylènes .....	70
5.2.7.1 Scénario 10a – 20 cm <sup>2</sup> .....	71
5.2.7.2 Scénario 10b – 5 dm <sup>2</sup> .....	72
5.2.7.3 Scénario 10c – 2 m <sup>2</sup> .....	72
5.2.8 Benzène.....	74
5.2.8.1 Scénario 12a - 20 cm <sup>2</sup> .....	74
5.2.8.2 Scénario 12b - 5 dm <sup>2</sup> .....	76
5.2.8.3 Scénario 12c - 2 m <sup>2</sup> .....	79
<b>6. CONCLUSION .....</b>	<b>81</b>

<b>7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>83</b>
<b>8. LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>89</b>

## **1. GLOSSAIRE ET ACRONYMES**

ANR : Agence Nationale de la Recherche

Feu flash : combustion d'un nuage de gaz/vapeurs sans effets de pression (effets thermiques seulement)

GALERNE : Gaz et Liquides Évaporants et Risques de Nuisances Environnementales et humaines

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

GL : Gaz Liquéfié

LII : Limite Inférieure d'Inflammabilité

EVOLCODE : Logiciel de simulation du comportement du GNL lors de déversements accidentels, de type intégral

MERCURE : Logiciel de simulation de dispersion atmosphérique, de type CFD

PHAST : Process Hazard Analysis Software Tool (logiciel de simulation des effets de rejets accidentels de substances dangereuses, de type intégral)

TRP : Transition Rapide de Phase

UVCE : Unconfined Vapour cloud Explosion (explosion de nuage de gaz/vapeur spécifiquement en milieu libre)

VCE : Vapour Cloud Explosion (explosion de nuage de gaz/vapeur en milieu libre ou non - encombré/confiné)



## **2. INTRODUCTION**

### **2.1 Contexte**

En cas d'accident maritime, les gaz émis à partir du navire ou des nappes flottantes présentent des risques importants pour les intervenants et les populations : explosion, incendie, toxicité... L'augmentation de la capacité et du nombre de navires rend cette menace plus aiguë.

L'approche, la surveillance et l'intervention sur un navire en difficulté ou sur une zone de pollution générée par un événement accidentel sont délicates et souvent mal appréciées par les intervenants. En témoigne la gêne des équipages d'aéronefs lors de l'intervention et des populations d'Aurigny et du Cotentin suite à l'accident du levoli Sun.

Le projet ANR GALERNE a pour but de proposer une évaluation objective du risque présenté et des dispositifs d'intervention et de protection les plus adaptés à la situation. La méthode choisie privilégie l'approche suivante : description des navires et définition des types de produits concernés, choix de scénarios d'accidents de référence et des termes sources, évaluation du comportement des substances déversées (expérimentations et modélisations), et enfin conditions d'intervention de première urgence et modalités de communication au sein d'un comité d'experts mis en place le jour suivant un accident majeur. Le projet est conduit en liaison permanente avec des centres opérationnels.

### **2.2 Objectifs de la tâche 2**

La tâche 2 du programme GALERNE est consacrée à l'étude du comportement de produits inflammables ou toxiques (GPL, GNL, styrène...) lors de rejets accidentels sous la ligne de flottaison ou au-dessus, depuis la source d'émission jusqu'à la dispersion dans l'atmosphère et la formation de nuages toxiques ou inflammables, selon des approches complémentaires par simulation numérique et par essais expérimentaux.

Les objectifs de cette tâche se déclinent comme suit :

- obtenir de nouvelles données sur le comportement des gaz liquéfiés (GPL, GNL) et produits évaporants (styrène...),
- étudier la formation des nappes sur l'eau et évaluer les taux d'évaporation en fonction des produits et de scénarios caractéristiques,
- améliorer les connaissances sur la dispersion atmosphérique d'une substance polluante rejetée par un navire en difficulté.

## 2.3 Objet du rapport

Au cours de la tâche 1, une quinzaine de scénarios accidentels conduisant à des phénomènes dangereux ont été identifiés et décrits, impliquant sept substances toxiques ou inflammables représentatives, sur la base du retour d'expérience et d'analyses des risques. La Figure 1 illustre, pour le GNL, les questionnements relatifs à la caractérisation des sources de rejet selon les circonstances de l'accident.

La liste des substances retenues a été limitée, afin de raisonner par famille de produits plutôt que par produit. Les principales familles retenues sont :

- GNL,
- GPL et GL (Propane, Ammoniac...),
- Flottants évaporants (Xylènes, ...),
- Évaporants (Benzène, ...).

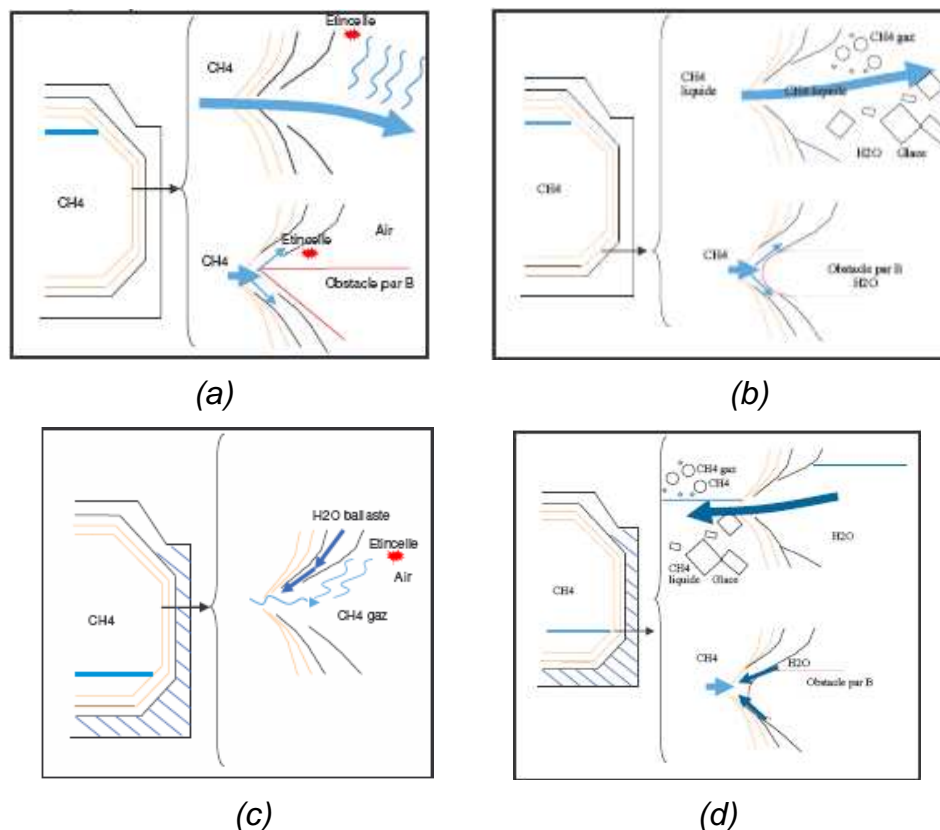


Figure 1. Vue en coupe verticale d'une cuve de GNL. Que se passe-t-il si... (a) fuite au-dessus de la ligne de flottaison, cuve pleine ; (b) fuite en dessous de la ligne de flottaison, cuve pleine ; (c) fuite au-dessus de la ligne de flottaison, cuve presque vide ; (d) fuite en dessous de la ligne de flottaison, cuve presque vide ?

Les travaux de modélisation relatés dans ce rapport visent à :

- Identifier les modèles et outils de calcul existants susceptibles de permettre de simuler les phénomènes dangereux consécutifs aux scénarios issus de la tâche 1, et leur limites,
- Réaliser les simulations avec ces outils et interpréter les résultats,
- Apporter éventuellement des pistes d'amélioration des modèles, à partir des essais expérimentaux menés dans le cadre du projet.

Le rapport se découpe en trois parties. D'abord, au chapitre 3, est exposée une synthèse des connaissances actuelles sur le comportement des gaz liquéfiés et liquides évaporants rejetés sur l'eau (formation et évaporation de nappe, TRP). Ensuite, au chapitre 4, sont présentés les outils de calcul employés et les scénarios traités. Enfin, la dernière partie (chapitre 5) apporte les résultats des simulations réalisées avec les outils présentés précédemment. Ces résultats de simulation serviront à alimenter les fiches d'intervention en mer réalisées dans le cadre de la tâche 3.2 du projet GALERNE.





### **3. ÉLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES SUR LES MODELES DE FORMATION DE NAPPE ET D'EVAPORATION/DE VAPORISATION**

Une synthèse sur la physique des phénomènes liés au déversement de gaz liquéfiés ou de liquides sur l'eau est présentée dans ce chapitre, principalement sur la formation des nappes sur l'eau et leur vaporisation ou leur évaporation.

On parle plutôt d'« **évaporation** » si la pression de vapeur saturante du produit est inférieure à la pression ambiante : le taux d'émission à l'atmosphère est alors piloté essentiellement par transfert de masse

On parle plutôt de « **vaporisation** » si la pression de vapeur saturante du produit est supérieure à la pression ambiante : le taux d'émission à l'atmosphère est alors piloté essentiellement par transfert thermique).

On trouve dans la littérature d'assez nombreux travaux expérimentaux et de modélisation sur le comportement du GNL sur l'eau. En effet, la température de transport du GNL (environ  $-160^{\circ}\text{C}$ ) conduit à des phénomènes particuliers au contact de l'eau, comme les transitions rapides de phase et la formation d'un film gazeux entre la nappe de GNL et la surface de l'eau, qui ne sont pas suffisamment bien connus pour être bien modélisés. Les taux d'évaporation de nappes de GNL estimés expérimentalement montrent une relativement forte variabilité selon les essais. Cela peut s'expliquer par la difficulté à mesurer en pratique ce taux d'évaporation, mais aussi et surtout par la complexité des phénomènes et le nombre de paramètres entrant en jeu dans la détermination du taux d'évaporation (surface d'eau calme ou perturbée, température de l'eau, de l'air, humidité, vent, dynamique du rejet). D'autre part, il ressort de la littérature que des effets de masse sont susceptibles d'exister (notamment des effets très marqués de densité du nuage froid en cas de rejet massif, ainsi que des transitions rapides de phase), qui ne sont pas observables à petite échelle.

Par ailleurs, peu de travaux ont été trouvés sur le comportement évaporant de produits liquides non cryogéniques spécifiquement sur l'eau (flottants évaporants), probablement parce que le comportement de ces produits sur l'eau est peu différent de leur comportement sur le sol, à cela près que l'inertie thermique d'une eau profonde est bien supérieure à celle du sol, de par les phénomènes de convection. En outre, l'influence des vagues et des courants sur la fragmentation des nappes et le taux d'évaporation de celles-ci semblent avoir été relativement peu étudiées.

Précisons toutefois que la synthèse présentée ici est plutôt axée sur le comportement des gaz liquéfiés sur l'eau.

#### **3.1 Formation d'une nappe à la surface de l'eau**

Pour les gaz liquéfiés transportés réfrigérés, comme le GNL ( $T_{\text{eb}} = -162^{\circ}\text{C}$ ) et l'éthylène ( $T_{\text{eb}} = -105^{\circ}\text{C}$ ), et même pour les gaz liquéfiés sous pression comme les GPL (propane :  $T_{\text{eb}} = -42^{\circ}\text{C}$ ) ou l'ammoniac ( $T_{\text{eb}} = -33^{\circ}\text{C}$ ), le percement d'une cuve par collision en mer conduirait à la formation d'une nappe liquide sur l'eau qui se vaporiserait rapidement du fait de l'apport de chaleur par la masse d'eau à la nappe de produit.

De façon similaire, le déversement de liquides évaporants sur l'eau conduit à la formation de nappes liquides, qui s'évaporent cette fois moins par transfert thermique de l'eau vers la nappe<sup>1</sup> que par transfert de masse (vent, agitation de la surface d'eau, turbulence atmosphérique...). Le phénomène d'étalement est un phénomène dynamique, piloté par la gravité, l'inertie du fluide déversé, ses propriétés de viscosité et de tension superficielle et l'état de la mer.

Trois régimes peuvent être identifiés lors de l'étalement d'une nappe (cf. ) :

- Le régime d'étalement caractérisé par l'équilibre entre la force de gravité et les forces d'inertie,
- Le régime d'étalement caractérisé par l'importance de la résistance visqueuse (traînée),
- Le régime d'étalement caractérisé par l'équilibre entre les forces de résistance visqueuse et les forces de tension de surface. Ce troisième régime intervient pour des liquides très peu volatils formant des nappes très fines.

Les deux premiers régimes, qui concernent la plupart des cas considérés dans le cadre du projet GALERNE, interviennent plutôt simultanément que successivement.

Pour des déversements massifs, le taux d'étalement de la nappe est gouverné par le premier régime (Fay, 2003). Les liquides cryogéniques, parce qu'ils se vaporisent très rapidement, sont a priori essentiellement soumis au premier régime. Le troisième régime concerne les déversements d'hydrocarbures lourds sur l'eau (Saraf & Melhem, 2005).

La prise en compte de ces régimes permet de décrire la dynamique de formation de la nappe. Au final, pour un rejet qui dure, la nappe atteint un équilibre lorsque le débit d'évaporation ou de vaporisation est égal au débit d'alimentation. La fin du déversement et la poursuite de l'évaporation ou de la vaporisation induit ensuite la contraction progressive de la surface de nappe. Lors de cette dernière phase, il est probable qu'il se produise une fragmentation de la nappe.

L'épaisseur minimale de la nappe dépend des propriétés du fluide (viscosité, tension superficielle) et du support d'étalement : sur l'eau, l'épaisseur de nappe sera plus faible que sur terre, quel que soit le substrat. Typiquement, on considère qu'elle est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres, selon les produits déversés.

### **3.2 Évaporation et vaporisation**

La particularité d'un déversement de liquide ou de gaz liquéfié sur une surface d'eau de grande profondeur par rapport à un déversement sur un sol ferme est liée à l'inertie thermique importante de l'eau et aux phénomènes de convection qui maintiennent constante la température de la masse d'eau. Par conséquent, l'apport de chaleur de la masse d'eau vers la nappe qui se forme à sa surface est pratiquement constant dans le temps, alors que cet apport de chaleur décroît au fur et à mesure que la surface du sol ferme refroidit au contact de la nappe

---

<sup>1</sup> Le gradient de température entre la masse d'eau et le liquide déversé est en effet bien plus faible que celui observé dans le cas de gaz liquéfiés

s'évaporant ou se vaporisant. Ce phénomène est plus marqué pour les nappes de gaz liquéfiés en raison de la prédominance du transfert thermique sur le transfert de masse dans le phénomène d'évaporation.

### 3.2.1 Phénomène d'évaporation d'une nappe de liquide sur l'eau

L'évaporation d'une nappe liquide ( $P_{\text{sat}} \ll P_{\text{atm}}$ ) sur l'eau est pilotée essentiellement par le transfert de masse à l'interface entre la nappe liquide et l'atmosphère. Le taux d'évaporation est proportionnel à la différence entre la pression de vapeur saturante de la substance évaporante et sa pression partielle dans le milieu ambiant. La pression partielle dans le milieu ambiant dépend du renouvellement d'air, donc du vent à la surface de la nappe.

Plusieurs formulations empiriques (UIC, 1987 ; Van den Bosch, 1997 ; MacKay & Matsugu, 1973...), dont la plupart sont dérivées des travaux théoriques et expérimentaux de Sutton (1934) basés sur la résolution de l'équation d'advection-diffusion, expriment le taux d'évaporation surfacique d'une nappe de liquide ( $P_{\text{sat}} < P_{\text{atm}}$ ) en fonction des principaux paramètres participant au phénomène d'évaporation par transfert de masse : la vitesse du vent au-dessus de la nappe, le rayon et la température moyenne de la nappe, et les propriétés de la substance (masse molaire, pression de vapeur saturante, diffusivité massique et viscosité cinématique). Ces formulations doivent être utilisées avec précaution car les domaines de validité sont limités et parfois mal connus, du fait des calages empiriques qu'elles ont subi (Antoine, 2008). Toutefois, elles font ressortir les principaux paramètres physiques intervenant dans le mécanisme d'évaporation.

Il n'est pas de mécanisme spécifique à l'évaporation sur l'eau par rapport à l'évaporation sur terre, sinon que les épaisseurs de nappes sont moindres sur l'eau (donc les surfaces d'échange plus grandes) et que l'inertie et les mouvements de convection dans la masse d'eau maintiennent la température de l'eau relativement constante.

### 3.2.2 Phénomène d'ébullition d'un gaz liquéfié sur l'eau

Le déversement d'une quantité de gaz liquéfié sur une surface d'eau conduit généralement à la formation d'un film de liquide « cryogénique » en ébullition entre la surface d'eau et le liquide déversé.

Deux régimes principaux d'interaction entre l'eau et le liquide cryogénique pourraient exister (Boe, 1998) :

- le régime de « film boiling » (ébullition en film) qui correspond à la formation d'un film de vapeur entre l'eau et le liquide cryogénique. Ce film est créé par la vaporisation quasi instantanée d'une partie du liquide lorsqu'il est déversé sur l'eau. Le film de vapeur est suffisant pour éviter la mise en contact directe des deux liquides. A titre indicatif, pour le GNL, l'estimation du flux de chaleur varie suivant les auteurs. Ainsi, Waite et al (1983) évoquent un flux de  $25 \text{ kW/m}^2$ , tandis que Sciance et al. (1967) proposent la valeur de  $44 \text{ kW/m}^2$  (cités par Boe, 1998). Enfin, une étude menée pour le compte de la *Federal Energy Regulatory Commission* (ABSG, 2004 ; FERC, 2004) a conduit à préconiser de retenir un flux de chaleur moyen de  $85 \text{ kW/m}^2$  pour une nappe de GNL sur l'eau (valeur apparemment basée sur les essais Burro).

- le régime « transitional boiling » (ébullition de transition) qui, suite à l'absence intermittente ou à la disparition progressive du « film boiling », aboutit à la mise en contact directe du liquide cryogénique et de l'eau. Cette mise en contact serait susceptible de générer un transfert de chaleur beaucoup plus important entre les deux liquides (ébullition nucléée). Ce phénomène peut, dans certains cas, aboutir à une Transition Rapide de Phase (TRP) qui sera évoquée au chapitre 3.4. L'ordre de grandeur du flux de chaleur échangé n'est pas le même que celui du régime de « film boiling ». A titre indicatif, pour le GNL, Boe (1998) rapporte un flux théorique estimé à 244 kW/m<sup>2</sup>.

Le premier de ces deux régimes est considéré comme le plus courant : c'est celui sur lequel repose la plupart des modèles de vaporisation de substances cryogéniques sur l'eau. Le taux de vaporisation du fluide peut être considéré approximativement constant dans ces conditions, l'apport de chaleur par la masse d'eau brassée par convection, par le vent et l'agitation induite par le déversement étant à peu près constant également.

En revanche, le déversement d'une quantité de gaz liquéfié sur une surface d'eau calme peut conduire, dans certaines circonstances, à la formation de glace à la surface de l'eau. Les seules conditions permettant d'observer la formation d'une couche de glace sont que la surface d'eau soit suffisamment calme et que le rejet n'induisse pas trop d'agitation à la surface de l'eau. Cela correspond plutôt à des conditions observées pour des surfaces d'eau limitées et de taille réduite, typiquement des configurations à l'échelle d'essais de laboratoire (Vesovic, 2007 ; Luketa-Hanlin, 2006). Il est peu probable qu'une couche de glace significative se forme et persiste en pleine mer, ni même en zone portuaire, en cas de déversement de GL – le plus froid d'entre eux, le GNL, y compris (Luketa-Hanlin, 2006). Néanmoins, Vesovic (2007) montre que si une couche de glace se forme et s'épaissit à la surface de l'eau, la dynamique de vaporisation peut être sensiblement modifiée. En effet, le flux de chaleur transféré de la masse d'eau vers la nappe liquide peut être significativement diminué, et décroît au cours du temps : le taux de vaporisation de la nappe décroît également. L'auteur ajoute que le film en ébullition peut être amené à disparaître du fait de la diminution de la température entre la surface et la nappe, donc le régime de contact direct évoqué précédemment peut apparaître, avec un accroissement induit du taux de vaporisation, puis une diminution de ce taux au fur et à mesure que la couche de glace s'épaissit...

### **Spécificité de l'ammoniac**

Kaiser (1989) décrit le comportement particulier d'un rejet d'ammoniac réfrigéré sur l'eau : la solubilisation de l'ammoniac dans l'eau (typiquement jusqu'à 60% selon l'auteur) est une réaction exothermique, qui serait susceptible de réchauffer la couche de mélange de plusieurs dizaines de degrés. Ainsi, le débit de vaporisation serait accru significativement par ce phénomène. L'ammoniac se distingue ainsi du propane, dont la température d'ébullition est proche mais qui n'est pratiquement pas soluble ni réactif dans l'eau.

### 3.3 Effet des vagues et des courants

L'effet attendu des vagues est d'augmenter la surface de contact entre la nappe et l'eau, donc d'accroître le taux d'évaporation (Cormier et al., 2007 ; étude *Quest* citée par ABSG, 2004 et Hightower et al. 2004). A contrario, la présence de vagues peut limiter l'expansion de la nappe dès lors que l'épaisseur de la nappe devient significativement plus faible que la hauteur moyenne des vagues (ABSG, 2004).

Il est, par ailleurs, probable que les vagues et les courants conduisent à une fragmentation des nappes en multiples nappes de plus petites tailles et à une modification de la forme et de l'épaisseur des nappes, par effet d'étirement (Luketa-Hanlin, 2006).

Pour les liquides flottants et/ou évaporants, l'agitation induite par les vagues conduit à un mélange accru du liquide avec l'eau, favorisant les phénomènes de dissolution ou d'émulsion dans la couche de mélange. Il est désormais reconnu que les vagues participent au transport horizontal des gouttes d'hydrocarbures liquides sur l'eau (phénomène de « dérive de Stokes » – Boufadel et al., 2006)

Pour les liquides cryogéniques, l'accroissement du mélange est susceptible de favoriser les transitions rapides de phase.

L'effet des vagues sur les zones de danger n'est donc pas facile à appréhender. Luketa-Hanlin (2006), dans sa synthèse sur les déversements massifs de GNL, n'a relevé aucun essai expérimental étudiant l'effet des vagues sur le comportement d'une nappe de liquide cryogénique à la surface de l'eau.

La plupart des modèles de formation et d'évaporation de nappes suite à un déversement accidentel sur l'eau ne prennent pas en compte les effets liés aux vagues et aux courants marins. Les perturbations dues aux vagues sont parfois considérées au travers d'un accroissement de la rugosité de surface, dépendant du vent ([Brighton, 1985], cité par [Webber, 2005] et [Brambilla & Manca, 2009] ; [Dodge et al, 1983] repris par [Witlox, 2006]).

Toutefois, compte tenu de la complexité des mécanismes, il semble qu'aucun modèle qui permette de prendre en compte finement l'effet des vagues n'a été proposé à ce jour pour les produits cryogéniques.

### 3.4 Transitions rapides de phase

La transition rapide de phase (TRP) est une vaporisation explosive (explosion physique, sans flamme). Boe (1998) rapporte que les TRP énergétiques ont été observées dans des zones où le liquide cryogénique et l'eau étaient brassés, soit par l'action des vagues, soit par effet de jet pénétrant dans l'eau. Il a été observé lors d'essais de jets de GNL sur l'eau que le phénomène de TRP était corrélé à la composition du GNL, la température de l'eau, la profondeur de pénétration du jet dans l'eau et le débit de rejet (Luketa-Hanlin, 2006).

Ces explosions physiques sont assimilables à des détonations locales, formant une onde de choc se propageant dans l'environnement. L'énergie déployée reste toutefois limitée par rapport à des explosions chimiques typiques. Des essais ont montré que des effets de pression équivalant à la détonation de quelques kilogrammes de TNT pouvaient être produits (Koopman & Ermak, 2007). Melhem et al. (2006) estime que l'énergie développée par une TRP produite par

déversement de GNL (ou de méthane pur) sur l'eau serait de l'ordre de 38 kJ/kg de GNL (ou 28 kJ/kg de méthane pur). Il apparaît que le phénomène est d'autant plus probable que la quantité rejetée est grande, et que le rejet dure longtemps (Melhem et al., 2006).

Outre les effets de pression, les TRP conduisent à projeter et disperser des bouffées de liquide et de gaz cryogénique (probablement mêlés à de l'eau fragmentée), distinctement de la dispersion normale du nuage vaporisant par transfert régulier de chaleur. Le taux d'évaporation moyen est accru par ce phénomène. Les rejets de GNL sur l'eau effectués lors des essais Coyote ont montré que la distance à la LII pouvait être accrue significativement par les TRP successives (Luketa-Hanlin, 2006).

Notons que ce phénomène peut également se produire lors d'une entrée d'eau dans un réservoir de liquide cryogénique. Selon Melhem et al. (2006), des niveaux de pression relativement importants pourraient être observés dans un tel cas impliquant du GNL, avec pour conséquence de potentiels dommages aux cuves de stockage.

Néanmoins, aucun essai de grande envergure, plus proche d'un déversement suite à une collision de navires en mer, n'a pu être conduit à ce jour pour observer des TRP à grande échelle. Les plus grands débits testés se sont limités à 19 m<sup>3</sup>/min (essais Coyote).

### **3.5 Dispersion atmosphérique de gaz lourds en milieu maritime**

#### **3.5.1 Généralités**

On peut distinguer en particulier deux types de dispersion dans l'air :

- le comportement de gaz passif,
- le comportement de gaz dense (ou gaz lourd),

Le gaz se disperse de manière passive lorsqu'il n'apporte aucune perturbation mécanique à l'écoulement atmosphérique et va se disperser du fait de la seule action du fluide porteur, l'air. Le transport et la diffusion du gaz dépendent alors du vent et de la turbulence atmosphérique d'origine mécanique ou thermique.

Lorsque la densité du gaz rejeté est plus grande que celle de l'atmosphère, on parle de comportement de gaz dense. Les forces de gravité influencent de façon importante la dispersion du nuage et modifient localement l'écoulement atmosphérique. A proximité du rejet, la force de gravité est à l'origine d'un mouvement d'ensemble vers le sol et l'expansion verticale du nuage est réduite. Au contact du sol, le nuage se répand en s'effondrant, ce qui favorise son développement transversal. La dilution du gaz avec l'air s'opère sur la face supérieure du nuage et sur les faces latérales. Sur la face supérieure, les échanges sont assurés par les mouvements de turbulence de l'atmosphère et grâce à la turbulence induite par le cisaillement dû à la différence de vitesses entre l'atmosphère et le nuage. Toutefois, l'entraînement d'air sur la face supérieure du nuage peut être significativement limité par le fort gradient stable de densité dans cette zone. Enfin, il s'établit sur les faces latérales du nuage une recirculation interne favorisée par l'étalement du nuage au sol à mesure de son effondrement.

Pour des rejets de gaz cryogéniques, le comportement de gaz dense est particulièrement marqué, de par la température très faible du nuage.

Pour les rejets de gaz liquéfiés sous pression, la densité est augmentée du fait que se combinent à la fois la faible température liée à la détente du gaz de sa pression de stockage à la pression ambiante et la présence de gouttelettes d'aérosol en mélange avec la phase gazeuse dans le nuage.

Les effets de densité sont d'autant plus marqués que le nuage est large, le vent faible et la stabilité atmosphérique forte.

Koopman & Ermak (2007) résument les effets observés d'une dispersion de gaz plus dense que l'air à proximité d'un sol ou d'une surface d'eau, déjà évoqués précédemment :

- la réduction du mélange turbulent vertical avec l'atmosphère ambiante, du fait de la stratification stable de densité du nuage (cf. Figure 2),
- la génération d'un étalement gravitaire horizontal du fait des gradients de densité horizontaux.

La conséquence de ces deux effets est de conduire à des nuages significativement plus larges que les nuages se dispersant de manière passive.

Un nuage très dense peut même agir sur l'atmosphère ambiante pratiquement comme un obstacle, forçant au déplacement vertical de l'écoulement atmosphérique (cf. Figure 3).

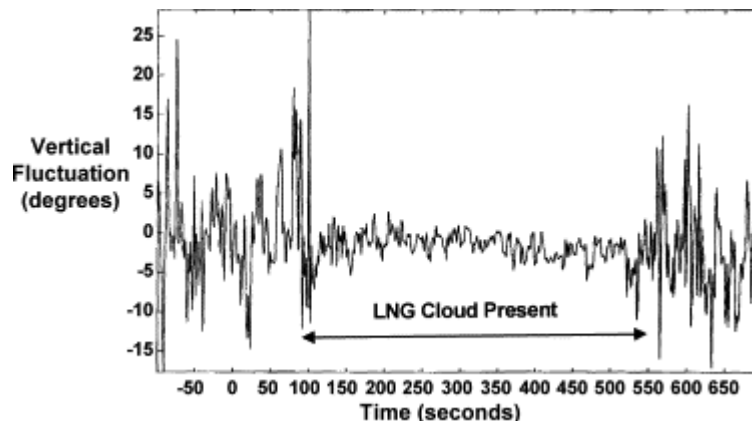


Figure 2. Essai Falcon 1 – rejet de GNL. Données mesurées par un anémomètre, montrant l'effet du nuage de vapeurs de GNL sur les fluctuations verticales de l'écoulement. D'après Koopman & Ermak (2007)

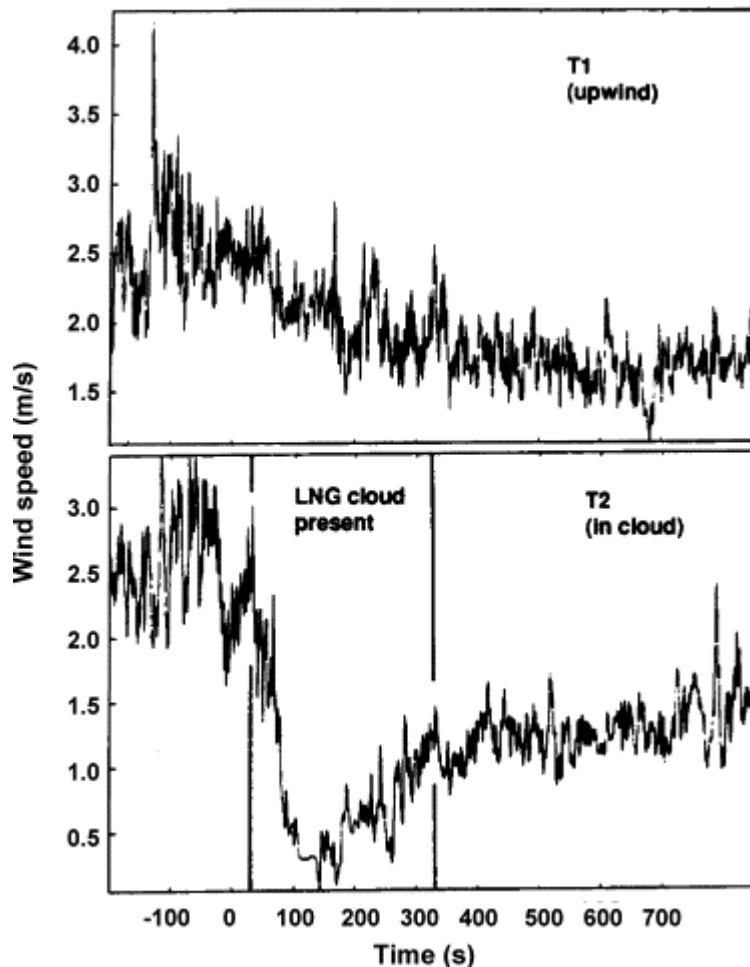


Figure 3. Essai Burro 8 – Rejet de GNL. Données de mesures anémométriques en amont et en aval du point de rejet, montrant la modification marquée de la vitesse du vent par la présence du nuage de vapeurs de GNL. D'après Koopman & Ermak (2007)

### 3.5.2 Rugosité de la surface

La rugosité de la surface joue un rôle significatif sur la dispersion atmosphérique, par accroissement des frottements, d'une part entre l'écoulement atmosphérique et la surface et d'autre part entre le nuage de gaz dense et la surface.

Du point de la dispersion atmosphérique de gaz lourds, une plus faible longueur de rugosité tend à diminuer les frottements de surface, donc globalement à limiter la diffusion du nuage par la turbulence d'origine mécanique. Cela conduit à des concentrations dans l'axe du panache plus élevées que celles observées pour une longueur de rugosité plus grande, et à une expansion moindre du nuage.

Or l'ordre de grandeur de la longueur de rugosité d'une surface d'eau est typiquement nettement plus faible que l'ordre de grandeur de la longueur de rugosité sur la terre ferme. Charnock (1955) a proposé une relation entre la vitesse de frottement du vent à la surface de l'eau et la longueur de rugosité de cette surface. Brutsaert (1982) évalue que la longueur de rugosité varie typiquement de 0,1 mm à 0,6 mm sur une surface d'eau (contre plusieurs centimètres à plusieurs dizaines de centimètres sur la terre). Pour une mer



extrêmement agitée, la longueur de rugosité caractéristique pourrait atteindre de l'ordre du centimètre (ADMLC, 2003).

### **3.5.3 Stabilité de l'atmosphère**

Du fait du moindre flux thermique de la surface d'eau vers l'air ambiant par rapport au flux observé sur terre en journée, la couche limite atmosphérique tend à être plus souvent neutre à stable que fortement instable (ADMLC, 2003). La turbulence d'origine thermique est ainsi plus faible que sur terre en journée, conduisant aux mêmes conséquences sur la dispersion atmosphérique d'un nuage polluant qu'une turbulence d'origine mécanique réduite du fait d'une rugosité de surface plus faible (nuage typiquement plus concentré et moins large que sur terre).

Par ailleurs, la couche d'inversion thermique en mer peut descendre très bas, jusqu'à à peine quelques dizaines de mètres en atmosphère marine, tandis qu'elle ne descend guère en-dessous de 100 m sur terre. Ceci peut conduire à limiter l'extension verticale d'un nuage en dispersion, par un effet de « plafond » thermiquement très stable.

Ces effets sont plus sensibles lorsque l'on s'éloigne de la source. En effet, près de la source de rejet, le nuage est moins influencé par les conditions météorologiques que par la dynamique de rejet.

### **3.5.4 Visibilité du nuage**

Le rejet d'un nuage plus froid que l'air dans une atmosphère humide conduit à la condensation de l'humidité de l'air. Ainsi, un nuage consécutif à un rejet de gaz cryogénique ou liquéfié sous pression est partiellement visible à l'œil nu, par le brouillard d'eau en suspension qu'il produit.

Pour le GNL, il a été montré que le nuage concentré à la LII est visible dès lors que l'humidité de l'air est comprise entre 50 et 100% (essais Maplin Sands – cité par Luketa-Hanlin, 2006). En outre, lors de rejets de GNL sur l'eau l'entraînement d'eau dans le nuage pourrait conduire à accroître la part visible du nuage (essais Burro 8 – cité par Luketa-Hanlin, 2006). Ainsi, pour un déversement de GNL en milieu maritime, il est très probable que la portion inflammable du nuage se dispersant dans l'air soit intégralement visible.

Pour l'ammoniac, les essais de rejets sur la terre ferme menés en 1997-1998 par l'INERIS ont montré la forte variabilité de la concentration à laquelle le nuage est visible selon l'humidité de l'air. Pour une humidité relative de 82%, le nuage était visible pour une concentration de l'ordre d'un millier de ppm sur l'axe du panache, tandis que pour 24% d'humidité relative, il ne l'était plus à 15000 ppm sur l'axe du panache (Bouet, 1999).



## **4. SCENARIOS ET OUTILS DE CALCUL**

### **4.1 Scénarios retenus**

A l'issue de la tâche 1, une série de 15 scénarios a été proposée pour représenter les différentes familles de produits évoquées précédemment.

Concernant les substances retenues dans le cadre du projet GALERNE, il faut distinguer :

- les substances à considérer comme représentatif d'une famille dans les fiches d'intervention (GNL, Propane, Benzène, Xylènes)
- les substances à considérer lors de l'approche modélisation, selon les scénarios issus de la tâche 1.5 (**GNL, Propane, Benzène, Xylènes, Ammoniac, Éthylène réfrigéré**)
- les substances à considérer lors des essais (xylènes, azote, butane, propane, pentane).

Les scénarios définis ci-dessous reprennent les scénarios envisagés dans la tâche 1.5 du projet, en précisant les hypothèses nécessaires pour la simulation des effets des phénomènes dangereux associés. Les numérotations correspondent à celles retenues dans le rapport de la tâche 1.5.

#### **4.1.1 Scénarios GNL**

Trois ordres de grandeur de tailles de brèches ont été identifiés lors de la tâche 1.5 du projet :

- de l'ordre de quelques  $\text{cm}^2$ ,
- de l'ordre de quelques  $\text{dm}^2$ ,
- enfin, de l'ordre de quelques  $\text{m}^2$ .

Dans son analyse, Pitblado et al. (2006) propose une taille maximale probable de brèche en cas de collision de 1500 mm de diamètre en cas d'actes intentionnels (soit presque  $2 \text{ m}^2$ ), la taille maximale accidentelle probable étant considérée égale à 750 mm (soit environ  $0,5 \text{ m}^2$ ). Un diamètre de brèche de 250 mm ( $0,05 \text{ m}^2$ ) est par ailleurs considéré. Dans le rapport du Sandia National Laboratory (Hightower et al., 2004), des brèches de 0.5, 1, 2,  $5 \text{ m}^2$  voire  $10 \text{ m}^2$  sont retenues. Toutefois, ils considèrent que dans la plupart des cas de brèches de  $5 \text{ m}^2$  et  $10 \text{ m}^2$ , la brèche sera obstruée à plus de 90% par l'objet pénétrant, ce qui les conduit à retenir plutôt des sections de 0.5 et  $1 \text{ m}^2$ .

Ainsi, les diamètres de brèche suivants ont été considérés dans l'étude présente :

- 5 cm, soit  $20 \text{ cm}^2$  de section,
- 25 cm, soit  $5 \text{ dm}^2$  de section,
- 1,6 m, soit  $2 \text{ m}^2$  de section environ.

Pour un rejet au-dessus de la ligne de flottaison, on considère que la hauteur de liquide au-dessus de la brèche est de 16 m au début du rejet, le réservoir étant immergé de 7 m de hauteur environ. Le point de rejet est supposé à 1 m au-

dessus du niveau de l'eau. Ainsi, seulement 70 % de la masse contenue dans le réservoir serait susceptible d'être évacuée en cas de fuite.

Scénarios 1/3	Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison (Figure 4)			
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »	d. « m <sup>2</sup> »
Quantité	40000 m <sup>3</sup> / 18000 t			
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>	4,5 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	16 m	16 m	16 m	16 m
Débit initial estimé <sup>2</sup>	8.8 kg/s	221 kg/s	9060 kg/s	20400 kg/s
Durée minimale de rejet <sup>3</sup>	> 23 jours	> 22 h	33 min	15 min
Conséquences et risques	Nappe bouillonnante Feu de nappe Feu flash/VCE Brûlures froides	Idem 1. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures	Idem 3.	Idem 3.
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet sûrement majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau			

<sup>2</sup> Le débit diminue au fur et à mesure que le niveau de GNL au-dessus de la brèche baisse. Le débit indiqué ici est le débit initial calculé par PHAST 6.53.1.

<sup>3</sup> Calculée sur la base de la quantité disponible et du débit initial estimé, sans considération de la diminution du débit par baisse du niveau de produit dans la cuve.

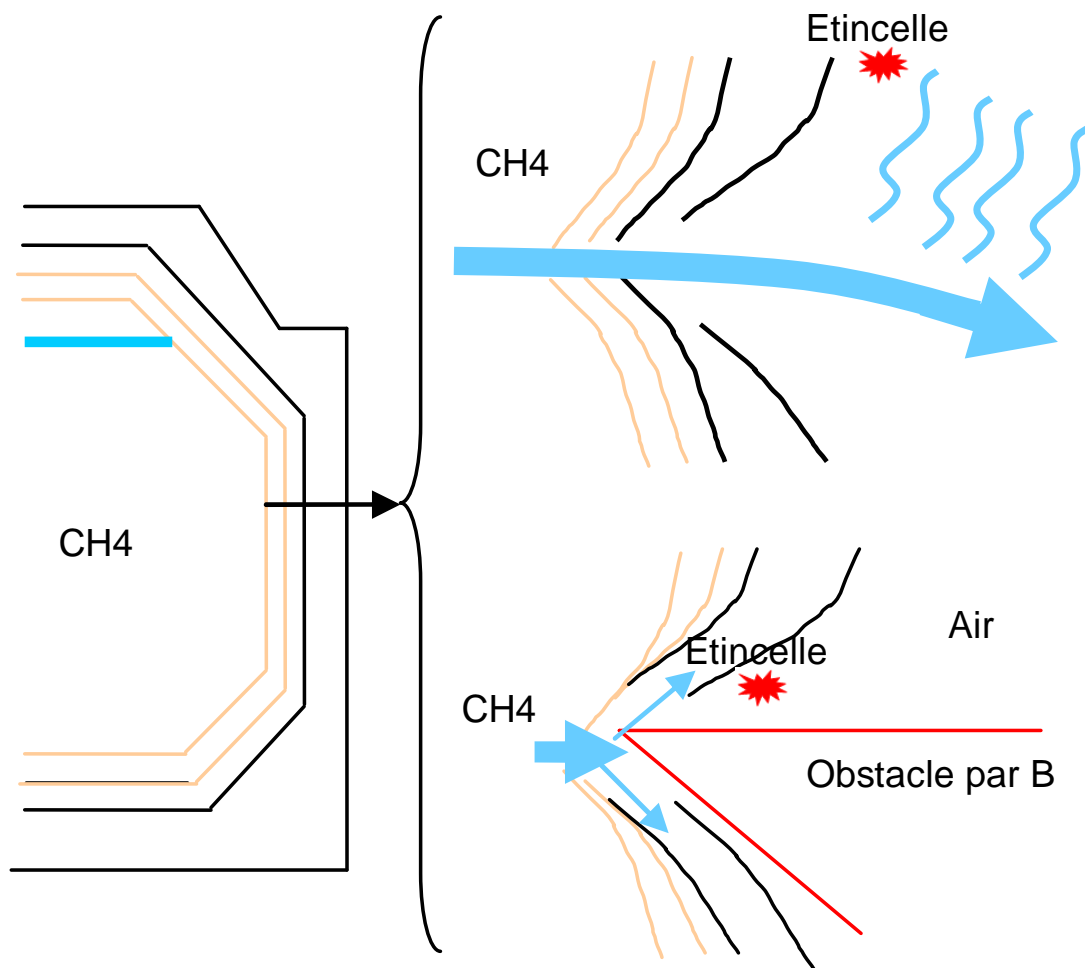


Figure 4. Cas d'un impact au dessus de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle

Scénarios 2/4	Brèche au-dessous de la ligne de flottaison (Figure 5 et Figure 6)	
	2/4 « Cuve quasi-vide »	2/4 « Cuve pleine »
Quantité	Sans objet	40000 m <sup>3</sup> / 18000 t
Section brèche	2 m <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>4</sup>	2 m	16 m
Débit estimé		(de GNL liquide dans l'eau)
Durée de rejet		
Conséquences et risques	TRP ⇒ surpression ⇒ tenue du réservoir ? Dégazage au mât	TRP Émission de GNL gazeux à la surface de l'eau Feu flash/VCE
Commentaires	Entrée d'eau dans la cuve contenant un fond de GNL	Bouchons de glace possibles

<sup>4</sup>La hauteur de liquide est exprimée en mètres de GNL. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer (rejet sous 1 m d'eau, soit un équivalent d'à peu près 2 m de GNL)

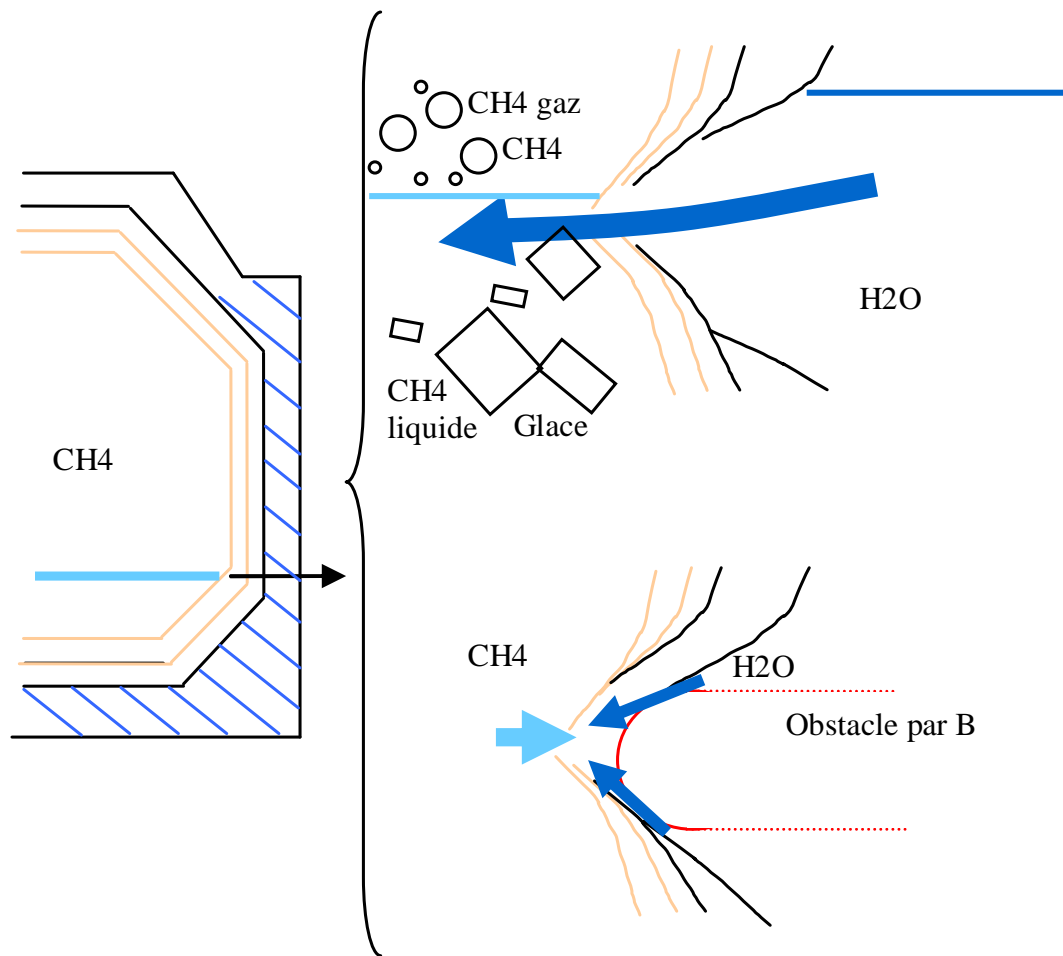


Figure 5 Cas d'un impact au dessous de la ligne de flottaison, cuve vide, avec ou sans obstacle

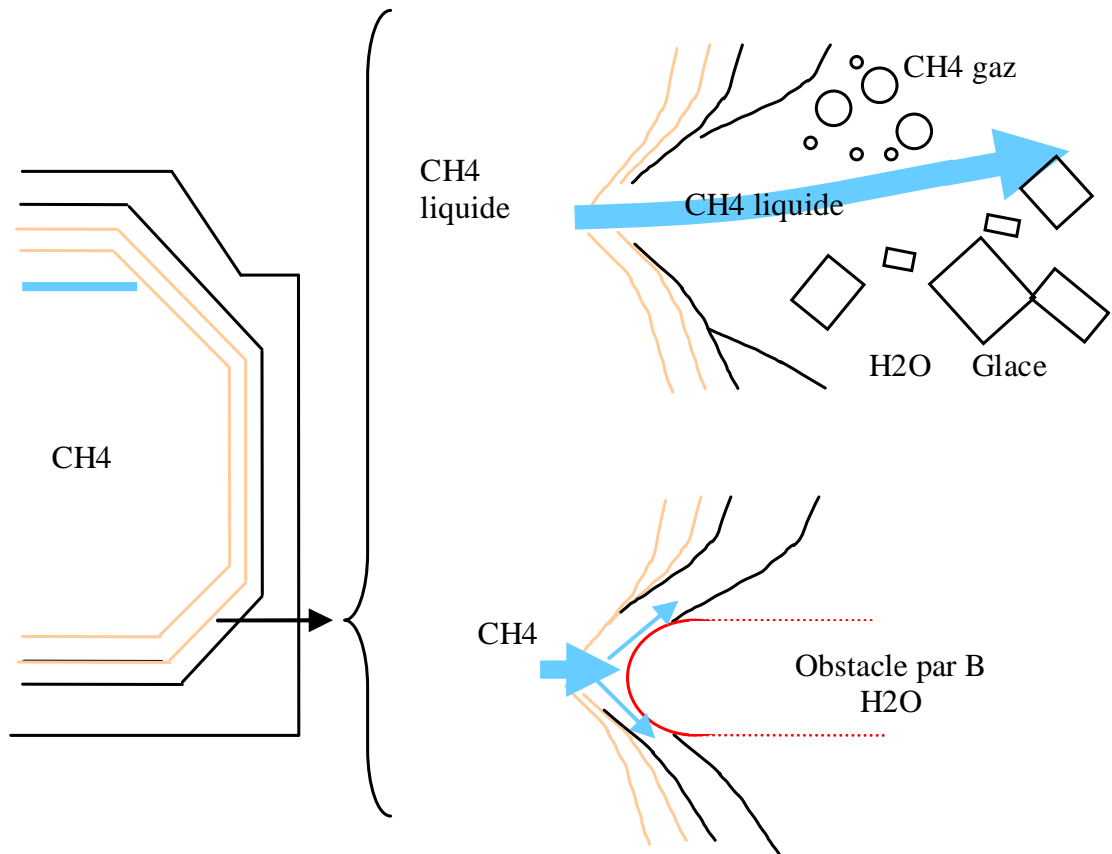


Figure 6. Cas d'un impact au dessous de la ligne de flottaison, cuve pleine, avec ou sans obstacle

#### 4.1.2 Scénarios Gaz Liquéfiés

Les mêmes tailles de brèches que pour le GNL ont été retenues pour les scénarios impliquant d'autres substances.

<b>Scénario 6</b>	<b>Ammoniac - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3600 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	40 kg/s	970 kg/s	40000 kg/s
Durée de rejet	~ 25 h	~1 h	1 min 30
Conséquences et risques	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Très soluble dans l'eau Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau	Très soluble dans l'eau	Très soluble dans l'eau

<b>Scénario 7</b>	<b>Chlorure de Vinyle - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 5800 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	26,7 kg/s	670 kg/s	27400 kg/s
Durée de rejet	60 h	2 h 30 min	3 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires	Polymérisation avec oxygène Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène



<b>Scénario 8</b>	<b>PROPANE - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3000 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	32 kg/s	800 kg/s	33000
Durée de rejet	26 h	1 h	90 s
Conséquences et risques	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

<b>Scénario 9</b>	<b>ETHYLENE réfrigéré - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	5000 m <sup>3</sup> / 2850 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	16 m	16 m	16 m
Débit estimé	12 kg/s	300 kg/s	12400 kg/s
Durée de rejet	65 h	2h30	230 s
Conséquences et risques	Nappe bouillonnante Feu de nappe Feu flash/VCE Brûlures froides	Idem a. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures	Idem a. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

### 4.1.3 Scénarios Liquides Évaporants

Scénario 10	XYLENES - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	15.5 kg/s	386 kg/s	15830 kg/s
Durée de rejet	> 39 h	> 1 h 35	> 140 s
Conséquences et risques	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

Scénario 11	XYLÈNES - Brèche cuve pleine <u>au-dessous</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>5</sup>	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	15.5 kg/s	386 kg/s	15830 kg/s
Durée de rejet	> 39 h	> 1 h 35	> 140 s
Conséquences et risques	Nappe flottante évaporante	Nappe flottante évaporante	Nappe flottante évaporante
Commentaires	Jet liquide sous l'eau, remontant à la surface		

5 La hauteur de liquide est exprimée en mètres de Xylènes. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer.

<b>Scénario 12</b>	<b>BENZENE - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	14,6 kg/s	364 kg/s	14900 kg/s
Durée de rejet	> 40 h	> 1 h 40 min	> 2 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires			

<b>Scénario 13</b>	<b>BENZENE - Brèche cuve pleine <u>au-dessous</u> de la ligne de flottaison</b>		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>6</sup>	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	14,6 kg/s	364 kg/s	14900 kg/s
Durée de rejet	42 h	1 h 40 min	2 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires	Jet liquide sous l'eau, remontant à la surface		

## 4.2 Situations météorologiques

Les calculs ont été menés pour des situations météorologiques réelles simulées par l'outil MesoNH de Météo-France. Ces situations sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Date et heure	04/07/1979	18/10/1980	17/10/1985	24/04/1979	16/04/1984	23/04/1991
	15 UTC	09 UTC	21 UTC	21 UTC	21 UTC	03 UTC
Force du vent (m/s)	2	9.8	4.5	10.2	6.6	5.6
$\Delta\theta$ (T° potentielle virtuelle – T° mer)	1.5	-5.3	-3.2	0.7	-1.8	-2.3
Classe de Pasquill	F	C	B	D	C	D
T° ambiant 2m (K)	288.95	282.79	286.2	283.1	282.3	281.90

<sup>6</sup> La hauteur de liquide est exprimée en mètres de Benzène. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer

T° de surface de la mer (K)	<b>288.1</b>	287.5	<b>288.4</b>	<b>282.9</b>	282.6	<b>282.63</b>
Rayonnement en surface (kW/m <sup>2</sup> )	<b>0.57</b>	0.17	<b>-0.02</b>	<b>-0.1</b>	-0.13	<b>-0.12</b>
Rugosité z <sub>0</sub> (m)	<b>2.00E-06</b>	2.10E-04	<b>3.30E-05</b>	<b>2.20E-04</b>	8.00E-05	<b>5.40E-05</b>
Humidité relative 2m (%)	<b>100</b>	91	<b>100</b>	<b>83</b>	80	<b>91</b>
Pression atmosphérique surface (hPa)	<b>1029</b>	1010	<b>1027</b>	<b>1006</b>	1028	<b>1024</b>

Les calculs ont en général été effectués pour quatre de ces six situations (en gras dans le tableau), jugées représentatives de conditions stables (classe de Pasquill F) à instables (classe de Pasquill B) avec un vent faible (2 ms) à fort (> 10 m/s) : le 04/07/1979, 17/10/1985, 24/04/1979, 23/04/1991.

### 4.3 Outils de calcul

Plusieurs outils existent pour simuler la dispersion atmosphérique de produits rejetés sur l'eau, à différents niveaux de complexité. Dans cette étude, la plupart des simulations ont été réalisées avec un outil d'évaluation des effets des phénomènes dangereux couramment utilisé dans les études de risques industriels accidentels (PHAST, développé par DNV – Witlox, 2005). En outre, les simulations de rejets de GNL ont été traitées au moyen d'autres outils plus spécifiques, mis en œuvre par GDF SUEZ, pour comparaison :

- un outil de type intégral dédié à la dispersion du GNL (EVOLCODE),
- un code de calcul de type CFD (Mercure), afin de simuler plus finement la dispersion du nuage de GNL formé au-dessus de la surface de la mer, ainsi que la présence du navire.

#### 4.3.1 L'outil de calcul générique PHAST

L'INERIS a employé un outil de calcul "classique" de type intégral, PHAST version 6.53.1 (Witlox, 2005). Ce logiciel permet de simuler la dispersion de gaz, liquides et gaz liquéfiés dans le champ proche (inférieur à 10 km), en l'absence d'obstacles et de relief, avec des conditions météorologiques constantes dans le temps et l'espace au cours de la dispersion et une source de rejet fixe. Les effets éventuels de dérive de nappe sur l'eau ne peuvent pas être simulés avec cet outil.

L'outil permet en revanche de prendre en compte les différents régimes de dispersion. Les calculs sont effectués avec des modèles correspondant à autant de problématiques différentes, à savoir :

- un modèle qui est employé lorsque l'énergie cinétique propre au rejet préside à la dispersion (cas des jets de gaz sous pression, par exemple) ;
- un modèle qui est employé lorsque la dispersion dépend à la fois de l'énergie cinétique du rejet et des effets de densité ;
- un modèle pour les calculs de dispersion des gaz lourds ;

- un modèle classique de dispersion gaussienne lorsque le polluant émis est « dynamiquement passif » et que la dispersion atmosphérique ne dépend plus que des conditions orographiques et météorologiques,
- enfin, un modèle de formation et d'évaporation de nappes liquides, lorsqu'une fuite conduit au dépôt de liquide au sol ou sur l'eau.

Pour les gaz liquéfiés transportés réfrigérés par navire, comme le GNL et l'éthylène, le percement d'une cuve par collision en mer conduirait à la formation d'une nappe liquide sur l'eau qui se vaporiserait rapidement du fait de l'apport de chaleur par la masse d'eau à la nappe de produit. Le module d'évaporation/vaporisation proposé dans l'outil de dispersion joue donc un rôle important dans la simulation des effets d'un tel scénario.

#### 4.3.1.1 Modèle d'évaporation/vaporisation de nappe liquide sur l'eau

Les travaux critiques et de validation relatifs aux modèles d'évaporation et de vaporisation de nappes liquides sur terre ou sur mer employés dans l'outil PHAST – « module PVAP » – sont relativement peu nombreux (Pitblado et al., 2004 ; Witlox, 2006 ; Webber, 2005 ; Brambilla & Manca, 2009). Toutefois ils fournissent des éléments intéressants quant au domaine de validité de ces modèles.

Les principales hypothèses sont succinctement discutées ci-dessous.

1. Le module PVAP distingue les deux régimes, d'évaporation de liquides d'une part et de vaporisation de gaz liquéfiés d'autre part, en employant deux formulations distinctes. Cela conduit à une discontinuité de traitement, qui ne semble toutefois pas poser de problème majeur. Notons
2. La nappe est supposée circulaire. En présence d'un obstacle (typiquement le navire en avarie), la forme de la nappe ne sera pas circulaire. Toutefois, c'est l'aire de la nappe qui prévaut sur la forme quant au taux d'évaporation/de vaporisation effectif.
3. La composition des vapeurs juste au-dessus de la nappe est de la vapeur de la substance dangereuse à saturation dans l'air humide ambiant. Il n'est pas considéré d'entraînement d'air supplémentaire.
4. Il n'est pas considéré de gradient horizontal de concentration juste au-dessus de la nappe : le taux d'évaporation est donc strictement uniforme. Cela est certainement incorrect pour des nappes de très grande envergure. Cependant, il n'existe pas de modèle simple permettant de prendre en compte des hétérogénéités à ce niveau. L'approche retenue semble plutôt majorante (dans le sens d'un taux d'évaporation surestimé).
5. L'épaisseur minimale de la nappe  $h_{\min}$  est estimée uniquement sur le critère du substrat sur lequel celle-ci se répand. Sur l'eau – c'est sur ce substrat que les nappes seront les plus fines –, l'épaisseur minimale proposée est de 1 mm. Cette épaisseur détermine la surface maximale de la nappe, donc participe fortement à l'estimation du débit d'évaporation. La détermination de  $h_{\min}$  est un point faible du module PVAP, discuté par Webber (2006). En effet,  $h_{\min}$  dépend en réalité également des propriétés du fluide déversé : sa densité liquide, sa viscosité, sa tension de surface (Witlox, 2006). Selon Webber, il serait préférable de disposer d'une formulation permettant une prédiction plus fine de l'épaisseur minimale en fonction du fluide et du

substrat, pour rendre le modèle plus prédictif ; sans quoi  $h_{\min}$  doit être « calé » par confrontation avec des résultats expérimentaux.

6. La dynamique d'étalement de la nappe, dans la première phase où s'équilibrent la gravité et les forces d'inertie, est traduite par une évolution du type  $r(t) \sim t^{1/2}$  dans le module PVAP. Cette évolution est contestée par Webber (2006), qui préconise pour ce régime une évolution plus rapide, du type  $r(t) \sim t$ , tandis qu'une évolution du type  $r(t) \sim t^{1/2}$  correspond plutôt à un régime d'étalement piloté par l'équilibre entre la gravité et les forces de résistance (Brambilla & Manca, 2009)...

### **Éléments de validation**

D'une manière générale, le modèle de formation et d'évaporation/vaporisation de nappes mériterait d'être validé plus largement. Quelques éléments d'évaluation du modèle PVAP sont présentés ici.

Le modèle proposé par Webber dans l'outil GASP (Webber, 1990) est cité en référence dans plusieurs articles (Brambilla & Manca, 2009 ; Verfondern & Dienhart, 2007). Webber (2006) a effectué des comparaisons entre ce modèle et le module PVAP, dont quelques conclusions sont reprises ici :

- les modèles de conduction sont très similaires,
- les lois de formation de nappe sont différentes (cf. point 6. précédent), par leur formulation et par l'estimation de l'épaisseur des nappes. Les nappes simulées avec le module GASP se répandent plus vite que les nappes simulées avec PVAP,
- la dissolution est bien prise en compte dans le module PVAP, tandis qu'elle n'est pas simulée dans GASP,
- la corrélation employée pour estimer le taux d'évaporation (MacKay & Matsugu, 1973) n'est pas cohérente d'un point de vue dimensionnel, bien qu'elle ne donne pas de mauvais résultats dans de nombreux cas : Webber suggère de la comparer plus avant avec la formulation de Brighton (1985),
- le modèle de vaporisation sur l'eau semble pertinent,

Webber (2006) propose d'améliorer le modèle PVAP en s'inspirant des modèles qui sont implémentés dans l'outil GASP (Webber, 1990), issus des travaux de D. M. Webber et de P.W.M Brighton dans les années 80 et 90.

Brambilla & Manca (2009) proposent, quant à eux, des améliorations au modèle de Webber précédemment cité.

Selon une étude de Pitblado et al. (2004) comparant les résultats du module PVAP avec des essais de déversement de GNL sur l'eau (Feldbauer et al., 1972 ; Koopman et al., 1979), les tailles de nappe calculées avec PHAST sont un peu conservatives, pour nappes de quelques mètres de rayon.

Enfin, le taux d'évaporation surfacique calculé peut s'avérer trop faible si la surface d'eau est agitée (Cormier et al, 2007). Cela dit, des conditions de mer agitée ne sont pas les conditions les plus pénalisantes en termes de dispersion atmosphérique.

#### 4.3.1.2 Modèle de dispersion atmosphérique

Le modèle de dispersion atmosphérique employé dans le logiciel PHAST (Witlox, 2005), appelé *Unified Dispersion Model* (UDM) est adapté pour simuler la dispersion de gaz passifs (modèle de type gaussien), de gaz lourds et de gaz légers.

La dispersion de gaz lourds nécessite un modèle spécifique. En effet, il s'agit de traduire les interactions dynamiques entre la couche limite atmosphérique et le nuage de gaz. Lorsque la densité du gaz rejeté est plus grande que celle de l'air ambiant, les forces de gravité influencent de façon importante la dispersion du nuage et modifie localement l'écoulement atmosphérique. A proximité du rejet, la force de gravité est à l'origine d'un mouvement d'ensemble vers le sol et l'expansion verticale du nuage est réduite. En contact avec le sol, le nuage se répand, poursuit son effondrement, ce qui favorise son développement transversal.

La plupart des substances étudiées dans le projet GALERNE conduit à la formation d'un gaz lourd en champ proche, soit par la masse volumique intrinsèquement élevée du gaz, soit par la faible température de stockage du fluide (cryogéniques), soit par la présence de gouttelettes d'aérosol dans le nuage et le refroidissement par détente des gaz liquéfiés sous pression.

#### **Éléments de validation**

Le modèle de dispersion de gaz dense de PHAST a été confronté à plusieurs séries de résultats d'essais de dispersion en champ libre (Hanna et al., 1993 ; Witlox, 2005 ; Carissimo et al., 2001). L'analyse méthodique du modèle UDM par Britter (2002) conduit à la conclusion que les résultats statistiques de confrontation à des séries d'essais sont « raisonnables à bons, typiques des meilleurs modèles de dispersion ».

Il apparaît de ces confrontations que la transition entre le modèle de gaz lourd et le modèle gaussien traduisant la phase de dispersion passive conduit parfois à sous-estimer les niveaux de concentrations. C'est aussi la conclusion d'une étude inter-comparative de modèles de dispersion de gaz lourd menée par Ferrario et al. (2007) sur des rejets de GNL correspondant à des séries des essais Burro, Coyote et Maplin Sand : une assez bonne prédiction des distances à la LII mais une sous-estimation aux plus faibles concentrations, probablement en raison d'une transition prématurée vers la phase passive. Ferrario et al. ont également observé une sensibilité relativement forte de PHAST à des faibles variations de vitesse de vent en conditions stables. La Figure 7 présente, à titre indicatif, les statistiques<sup>7</sup> de validation des trois outils SLAB, DEGADIS et PHAST en confrontation avec des essais de dispersion de GNL spécifiquement et en confrontation avec des essais de rejets de gaz lourds en général.

Concernant le GNL, le modèle de dispersion a été confronté par d'autres auteurs aux résultats des essais Burro, Coyote et Maplin Sands (Pitblado et al, 2004 et 2006). Il en est ressorti que les distances à la LII calculées pour du méthane pur sont systématiquement sous-estimées par rapport aux mesures. Ainsi, les auteurs ont proposé un ajustement, discutable, de la valeur de la LII du méthane pour

---

<sup>7</sup> Pour un modèle « parfait »,  
 $VG = \exp[(\langle \ln c_o \rangle - \langle \ln c_p \rangle)^2] = 1$   
 $MG = \exp(\langle \ln c_o \rangle - \langle \ln c_p \rangle) = 1$

corriger ce biais, en retenant une valeur  $LII_{fic} = 0,85 LII$  au lieu de la LII habituelle (4,4%). C'est pourquoi la distance à  $0,85 \times LII$  est fournie dans les tableaux de résultats de simulation avec PHAST pour le GNL.

Par ailleurs, d'une manière générale, la communauté scientifique manque de données expérimentales sur des dispersions de gaz lourds en conditions de forte stabilité atmosphérique et de vent faible. Les modèles sont souvent insuffisamment validés dans ce domaine (Lines et al., 2001 ; Koopman & Ermak, 2007). Le modèle UDM implémenté dans PHAST ne permet pas de simuler la dispersion dans des conditions de vent nul, et aucun traitement spécifique n'est prévu pour les cas de vent faible (< 2 m/s, typiquement). Ainsi, les résultats pourrait être moins précis dans ces conditions (Britten, 2002).

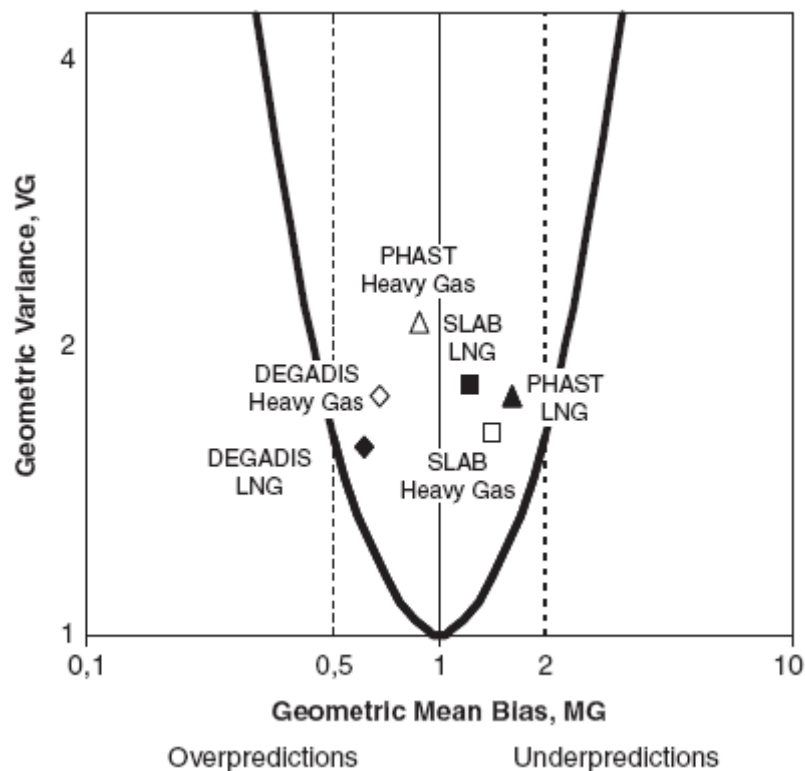


Figure 7. Comparaison entre les mesures de performance des modèles dans deux exercices d'évaluation. Les symboles pleins représentent les performances évaluées dans l'étude de Ferrario et al. (2007) (spécifique pour 12 rejets de GNL sur l'eau choisis parmi les séries d'essais Burro, Coyote et Maplin Sands). Les symboles vides représentent les performances obtenues par Hanna et al. (1993) pour des jeux de données de rejets continus de gaz denses impliquant 32 essais choisis parmi Burro, Coyote, Maplin Sands (GNL sur l'eau), Desert Tortoise et Goldfish (rejets d'Ammoniac pressurisé et de Fluorure d'Hydrogène dans le désert). D'après Ferrario et al. (2007)



## 4.3.2 EVOLCODE

### 4.3.2.1 EVANUM : Étalement et vaporisation de nappe liquide

EVANUM est un modèle d'étalement et de vaporisation de nappe liquide, développé par la Direction de la Recherche de GDF SUEZ et qui a été intégré à EVOLCODE.

C'est un modèle semi-empirique, dans lequel la nappe est assimilée à un cylindre (épandage en milieu libre ou au centre d'une cuvette) ou à un parallélépipède (écoulement dans un canal) d'épaisseur constante.

Plusieurs phases sont prises en compte :

- extension sur le sol,
- mouillage des bords de la cuvette,
- débordement dans des cuvettes compartimentées,
- régression de la nappe.

#### **Validation du logiciel**

La précision des résultats d'Evanum est à apprécier au cas par cas, car les données expérimentales sont insuffisantes. Elle dépend essentiellement des deux paramètres suivants :

- hauteur minimale d'extension de la nappe,
- coefficient d'évaporation.

Leur valeur pour des épandages sur des surfaces bétonnées est assez bien connue. Par contre pour des surfaces poreuses (sable, gravier...), des écarts importants peuvent apparaître.

Pour combler cette lacune, la Direction de la Recherche de Gaz de France a réalisé un programme expérimental à grande échelle, comprenant des mesures du taux d'évaporation et de la vitesse d'étalement de nappes de GNL, sur différents types de sol.

### 4.3.2.2 EOLE : Dispersion de GNL/GPL

Le code EOLE a été développé par la Direction de la Recherche de GDF SUEZ. Il modélise la dispersion de GNL/GPL.

Historiquement, GDF SUEZ a développé des outils de dispersion de vapeurs de GNL issue de l'évaporation d'une nappe. Récemment, la dispersion de rejet pressurisé de GNL a été ajouté.

#### **Le phénomène physique**

Il convient de distinguer 2 grandes familles de rejet :

- Les rejets pressurisés,
- Les rejets à pression atmosphérique.

En cas de fuite de GNL issue d'une canalisation à pression atmosphérique, le GNL se répand sur le sol puis se vaporise suite à l'apport de chaleur fourni par le

sol et l'air ambiant. Les vapeurs de GNL se mélangent alors à l'air, ce qui peut présenter un danger lié au caractère inflammable du produit considéré. L'étude de la dispersion atmosphérique a pour but de déterminer la zone de l'espace où ce danger existe.

Un nuage de gaz naturel issu d'une nappe de GNL présente trois caractéristiques:

- un nuage de grande densité massique (densité de 1,3 par rapport à l'air)
- une faible vitesse initiale,
- un nuage initialement froid qui se réchauffe,
- On parle alors d'un nuage de « gaz lourds ».

De par sa densité, ce nuage aura dans un premier temps tendance à s'effondrer sur lui-même tout en se mélangeant à l'air et en se réchauffant au contact du sol (dans le cas d'un nuage froid). Ce faisant, la masse volumique de l'ensemble du nuage (air entraîné + gaz lourd) va se rapprocher de celle de l'air ambiant. Le nuage devient alors dans un second temps de type « passif » : dans cette phase, la dispersion est activée par la turbulence de l'atmosphère (diffusion) et le vent moyen (transport).

### **Validation du logiciel**

La validation du code d'EOLE s'appuie essentiellement sur plusieurs campagnes d'essais :

- Maplin Sands (Shell, 1980) : 7 rejets continus GNL sur l'eau (débit 7 à 40 kg/s) ;
- Thorney Islands (HSE, 1982-84) : 14 rejets instantanés de fréon+azote (masse de 4 à 9 tonnes) ;
- Burro (NWC, 1980) : 1 rejet continu de GNL (120 kg/s durant 110 s) ;
- Spadedeam (BG, 1996-1998) : 18 rejets continus de quelques bars à 70 bars, et des débits variant de 1,5 à 9 kg/s ;
- Essais issus de la base SMEDIS :
  - 3 essais en propane (débit allant de 0.1 à 3kg/s),
  - 5 essais en ammoniac (3 essais petits débit 0.4 à 0.5 kg/s, 2 essais gros débit 110kg/s).

Les Figure 8 et Figure 9 suivantes montrent une comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

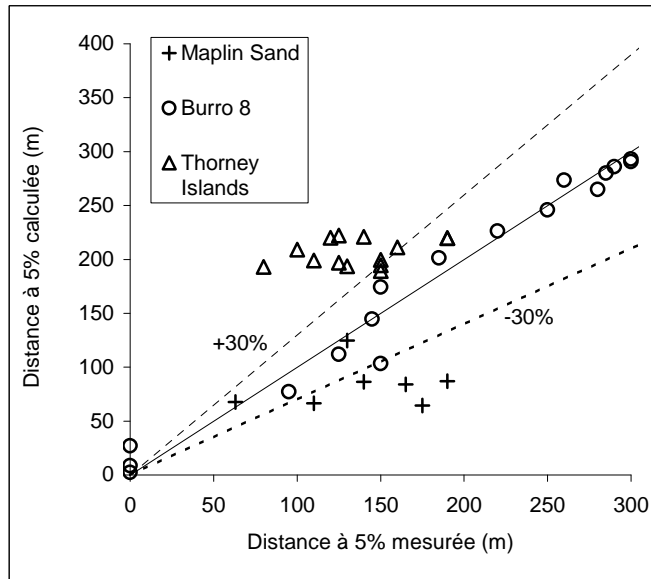


Figure 8 : distances à la LII pour trois campagnes d'essais Maplin Sands, Burro 8 et Thorney Islands

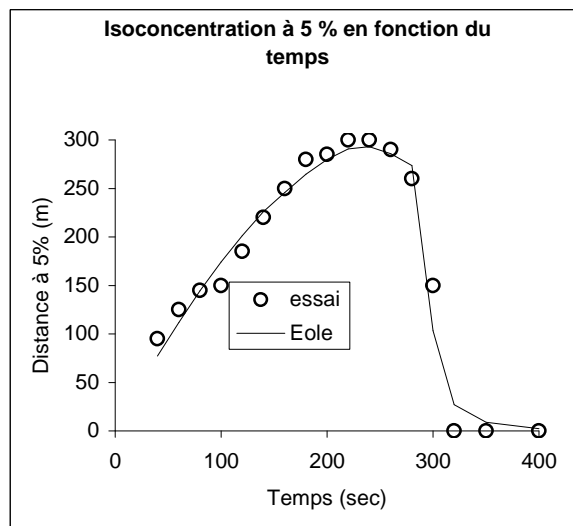


Figure 9 : distances à la LII pour l'essai Burro 8 (rejet à débit variable)

### 4.3.3 MERCURE

MERCURE est un modèle de type CFD, non-hydrostatique tridimensionnel, résolvant les équations complètes de la mécanique des fluides décomposées en moyenne de Reynolds, avec un modèle de turbulence de type  $k-\epsilon$ . Ce modèle a été développé par EDF (Direction de la Recherche) en collaboration avec GDF depuis les années 1980.

Il est notamment apte à traiter de la dispersion des gaz lourds (Riou, 1987).



## **5. RESULTATS DE SIMULATION**

### **5.1 Situations météorologiques**

Les profils verticaux de vent et de température de PHAST ont été comparés aux profils fournis par Météo-France, simulés par le code MesoNH pour les situations météorologiques sélectionnées (cf. tableau ci-dessus). L'annexe 1 présente les graphes de comparaison des profils verticaux de vent et de température pour les quatre situations météorologiques retenues. Les profils simulés par PHAST sont pour la plupart assez proches des profils simulés par MesoNH (dont le premier point est situé à 10 m au-dessus de la surface), sauf pour la situation de forte stabilité atmosphérique du 04/07/1979 (classe de Pasquill : F), pour lequel les profils simulés par PHAST s'écartent fortement des profils MesoNH dès que l'on monte en altitude, au-delà de quelques dizaines de mètres. Cela est dû aux paramétrisations employées dans PHAST pour les cas stables, qui sont peu pertinentes au-dessus de quelques dizaines de mètres du sol. Cet écueil n'est pas spécifique à ce logiciel car la formulation employée donne des résultats très proches de la formulation logarithmique classique préconisée en conditions stables dans le rapport du programme COST Action 710 de la Commission Européenne (EUR18195, 1998). La formulation ne présente pas d'inconvénient majeur tant que l'ampleur verticale du nuage qui se disperse et la hauteur de rejet ne sont pas trop importantes. Notons néanmoins l'existence d'autres formulations plus complexes mais plus réalistes des profils verticaux de température et de vent sur toute la hauteur de la couche limite (ex. : Zilitinkevich et al., 1998).

Les conditions météorologiques retenues pour les simulations de rejets de GNL avec les outils utilisés par GDF SUEZ sont les deux situations météorologiques F/2 et D/5.6.

## 5.2 Résultats de simulation selon les produits

### 5.2.1 GNL (simulations avec PHAST)

Le GNL est transporté réfrigéré à -162°C environ. Pour une brèche au-dessus de la ligne de flottaison, 70% du contenu de la cuve serait susceptible de se déverser à l'extérieur (Hightower et al., 2004). En revanche, pour une brèche sous l'eau, la quasi-totalité du GNL est susceptible d'être vidangé, jusqu'à ce que s'équilibrent les pressions de part et d'autre de la brèche.

Scénarios 1/3	Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison (Figure 4)			
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »	d. « m <sup>2</sup> »
Quantité	40000 m <sup>3</sup> / 18000 t			
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>	4,5 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	16 m	16 m	16 m	16 m
Débit initial estimé <sup>8</sup>	8.8 kg/s	221 kg/s	9060 kg/s	20400 kg/s
Durée minimale de rejet <sup>9</sup>	> 16 jours	> 15 h	> 23 min	> 10 min
Conséquences et risques	Nappe bouillonnante Feu de nappe Feu flash/VCE Brûlures froides	Idem 1. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures	Idem 3.	Idem 3.
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet probablement majoritaire dans le ballast, mélange avec l'eau qui s'y trouve			

Scénarios 2/4	Brèche au-dessous de la ligne de flottaison (Figure 5 et Figure 6)	
	2/4 « Cuve quasi-vide »	2/4 « Cuve pleine »
Quantité	Sans objet	40000 m <sup>3</sup> / 18000 t
Section brèche	2 m <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>10</sup>	2 m	16 m

<sup>8</sup> Le débit diminue au fur et à mesure que le niveau de GNL au-dessus de la brèche baisse. Le débit indiqué ici est le débit initial calculé par PHAST 6.53.1.

<sup>9</sup> Calculée sur la base de la quantité disponible et du débit initial estimé, sans considération de la diminution du débit par baisse du niveau de produit dans la cuve. La durée de fuite correspond au déversement de 70 % de la quantité disponible.

<sup>10</sup> La hauteur de liquide est exprimée en mètres de GNL. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer (rejet sous 1 m d'eau, soit un équivalent d'à peu près 2 m de GNL)

<b>Scénarios 2/4</b>	Brèche au-dessous de la ligne de flottaison (Figure 5 et Figure 6)	
	2/4 « Cuve quasi-vide »	2/4 « Cuve pleine »
Débit estimé	~ 6000 kg/s d'eau dans le GNL...	Mêmes débits que pour les rejets au-dessus de l'eau, compte tenu de la contre-pression

Durée de rejet	Jusqu'à l'équilibre des pressions	Jusqu'à équilibre des pressions hydrostatiques GNL/eau : durée de fuite estimée de l'ordre d'une heure
Conséquences et risques	TRP ⇒ surpression ⇒ tenue du réservoir ? Dégazage au mât	TRP Émission de GNL gazeux à la surface de l'eau Feu flash/VCE
Commentaires	Entrée d'eau dans la cuve contenant un fond de GNL	Bouchons de glace possibles

Un rejet de GNL sous l'eau conduit à un mélange intense du GNL avec l'eau environnante. On s'attend à ce que ce mélange induise une vaporisation totale du GNL, et à un réchauffement relatif des vapeurs de GNL avant leur émission à la surface. Ces vapeurs, moins froides que lors d'un rejet à la surface de l'eau, formeront alors un nuage moins dense. Il paraît très raisonnable d'en conclure que les distances d'effet associées à un scénario de rejet sous l'eau seront plus courtes que les distances associées à un rejet situé juste au-dessus de la ligne de flottaison. Pitblado et al. (2004) présentent des calculs de rejets sous l'eau réalisés avec le logiciel PHAST qui montrent une réduction des distances d'effet de 5% à près de 50% selon les conditions météorologiques et les tailles de brèches – mais les hypothèses de calcul retenues pour cette situation n'y sont pas précisées. Les essais de rejet d'azote liquide menés par l'INERIS dans le cadre du projet GALERNE, sur l'eau et sous l'eau, confirment cette analyse.

#### 5.2.1.1 Scénario 1/3a - 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	71 %	70 %	63 %	69 %
Rayon maximal de nappe	3.4 m	3.4 m	3.2 m	3.4 m
Débit d'évaporation	5.6 kg/s	6.3 kg/s	6.2 kg/s	6.1 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s) (0.168)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s) (0.169)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s) (0.174)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s) (0.168)
Temps d'équilibre de la nappe liquide	~ 30 s	~ 30 s	~ 30 s	~ 30 s
Distance à la LII	105 m	120 m	120 m	140 m
Distance à 0.85 LII	115 m	130 m	125 m	145 m
Distance à la ½ LII	220 m	150 m	150 m	180 m

Demi-largeur à la LII	25 m	15 m	10 m	15 m
Hauteur maximale à la LII	4 m	2 m	2 m	2 m

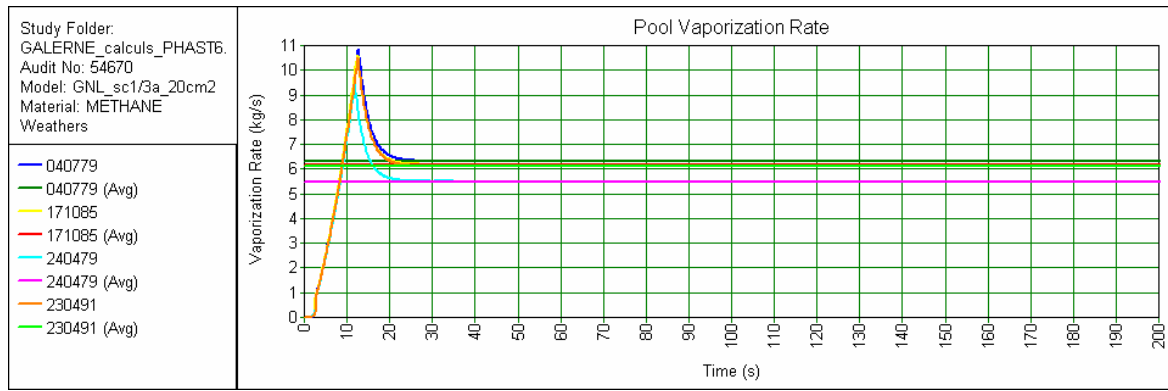


Figure 10. Évolution du débit d'évaporation en fonction du temps, pour une fuite au travers d'une brèche de 20 cm<sup>2</sup>. Le pic correspond à la dimension maximale atteinte par la nappe. Ce pic n'est pas pris en compte dans le calcul de la formation du nuage dans l'atmosphère

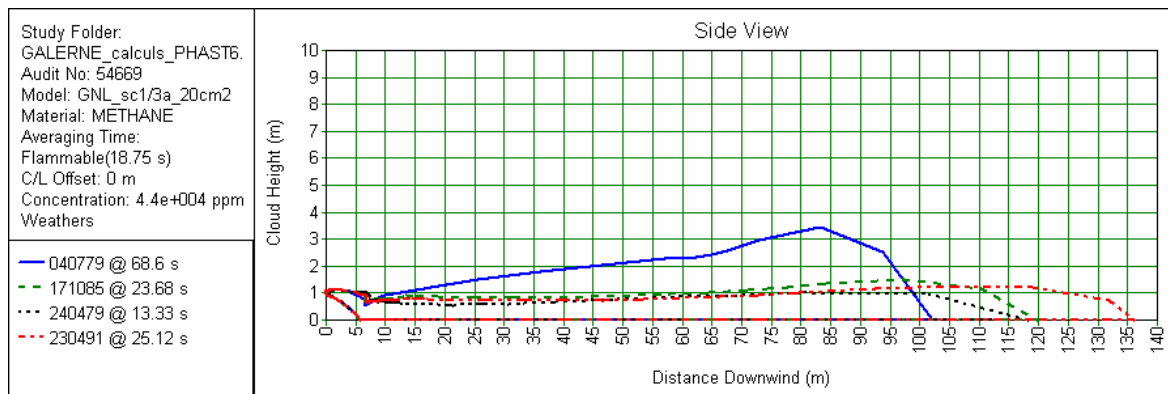


Figure 11. Vue latérale du nuage inflammable de GNL pour une fuite au travers d'une brèche de 20 cm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.1.2 Scénario 1/3b - 5 dm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	92 %	91 %	91 %	91 %
Rayon maximal de nappe	20 m	20 m	20 m	20 m
Débit d'évaporation	203 kg/s	201 kg/s	201 kg/s	202 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)
Temps d'équilibre de la nappe liquide	~ 70 s	~ 70 s	~ 70 s	~ 70 s



Distance à la LII	180 m	260 m	330 m	380 m
Distance à 0.85 LII	210 m	280 m	360 m	420 m
Distance à la ½ LII	950 m	380 m	490 m	600 m
Demi-largeur à la LII	140 m	80 m	50 m	80 m
Hauteur maximale à la LII	12 m	8 m	8 m	8 m

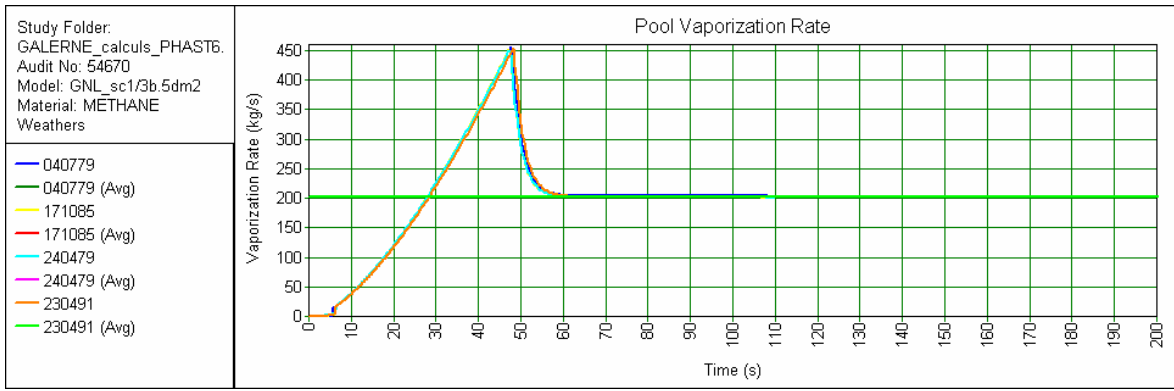


Figure 12. Évolution du débit d'évaporation en fonction du temps, pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup>. Le pic correspond à la dimension maximale atteinte par la nappe. Ce pic n'est pas pris en compte dans le calcul de la formation du nuage dans l'atmosphère

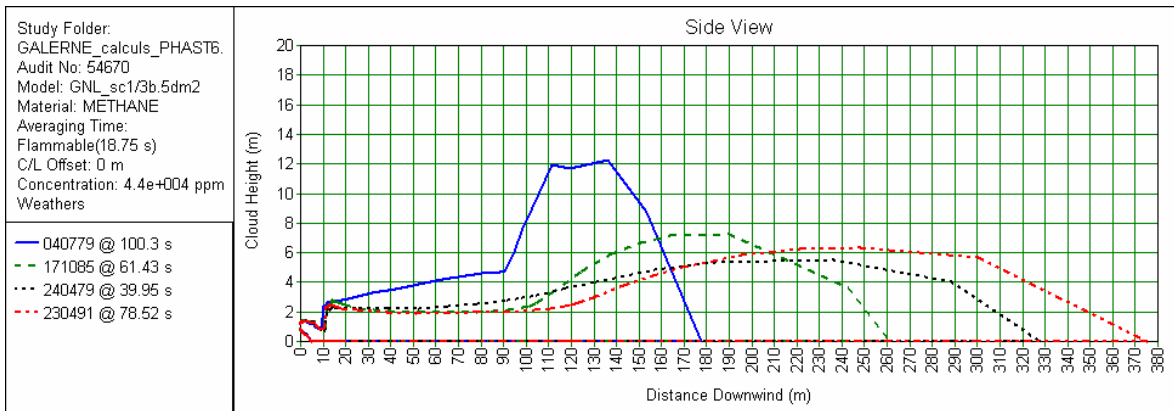


Figure 13. Vue latérale du nuage inflammable de GNL pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.1.3 Scénario 1/3c – 2 m<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	97 %	97 %	97 %	97 %
Rayon maximal de nappe	125 m	126 m	127 m	127 m
Débit d'évaporation	8800 kg/s	8800 kg/s	8800 kg/s	8800 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)

Temps d'équilibre de la nappe liquide	~ 200 s	~ 200 s	~ 200 s	~ 200 s
Distance à la LII	900 m	700 m	1400 m	1200 m
Distance à 0.85 LII	1900 m	780 m	1650 m	1480 m
Distance à la ½ LII	7500 m	1300 m	2700 m	2700 m
Demi-largeur à la LII	1200 m	800 m	500 m	800 m
Hauteur maximale à la LII	40 m	30 m	30 m	30 m

Le rejet dure un peu plus d'une demi-heure. L'équilibre entre alimentation de la nappe et débit d'évaporation s'établit en 200 s environ. A la fin du rejet, la nappe se vaporise très rapidement. Après 2000 s, le nuage inflammable se dissipe très rapidement également.

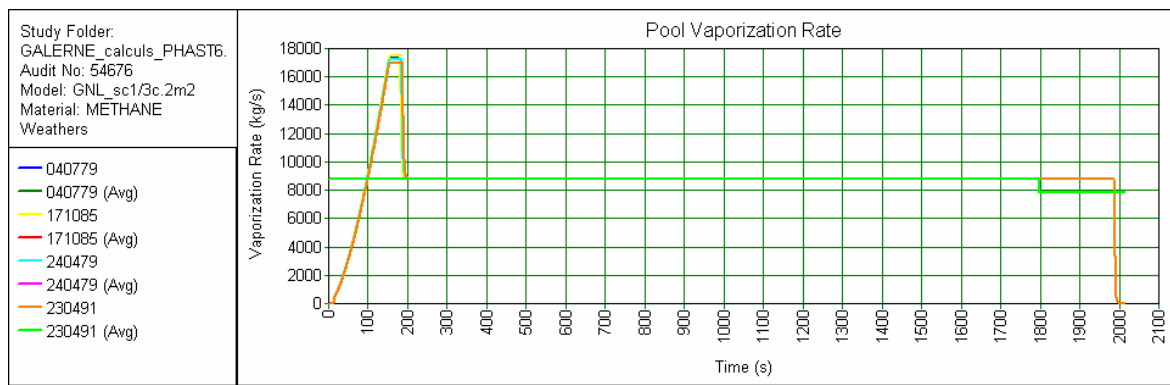


Figure 14. Évolution du débit d'évaporation en fonction du temps, pour une fuite au travers d'une brèche de 2 m<sup>2</sup>. Le pic correspond à la dimension maximale atteinte par la nappe. Ce pic n'est pas pris en compte dans le calcul de la formation du nuage dans l'atmosphère

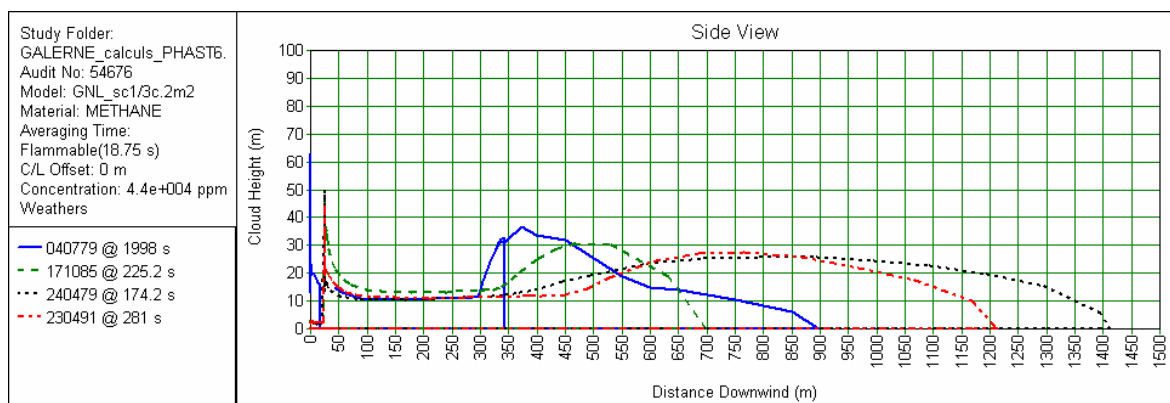


Figure 15. Vue latérale du nuage inflammable de GNL pour une fuite au travers d'une brèche de 2 m<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.1.4 Scénario 1/3d – 4,5 m<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	98 %	98 %	98 %	98 %
Rayon maximal de nappe	300 m (équilibre : 190m)	300 m (équilibre : 190m)	300 m (équilibre : 190m)	300 m (équilibre : 190m)
Débit d'évaporation	20000 kg/s	20000 kg/s	20000 kg/s	20000 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)	0.17 kg/(m <sup>2</sup> s)
Temps d'équilibre de la nappe liquide	~ 250 s	~ 250 s	~ 250 s	~ 250 s
Distance à la LII	2100 m	1350 m	2500 m	2500 m
Distance à 0.85 LII	3500 m	1600 m	3000 m	2900 m
Distance à la ½ LII	12 km	2500 m	5200 m	5000 m
Demi-largeur à la LII	1800 m	1700 m	700 m	1400 m

Le rejet dure environ 15 minutes. L'équilibre entre alimentation de la nappe et débit d'évaporation s'établit en 250 s environ. A la fin du rejet, la nappe se vaporise très rapidement. Après 900 s, le nuage inflammable se dissipe assez rapidement : 30 min après le début de la fuite, la nuage inflammable s'est dissipé, 1h après le début de la fuite, le nuage à la ½ LII s'est dissipé également.

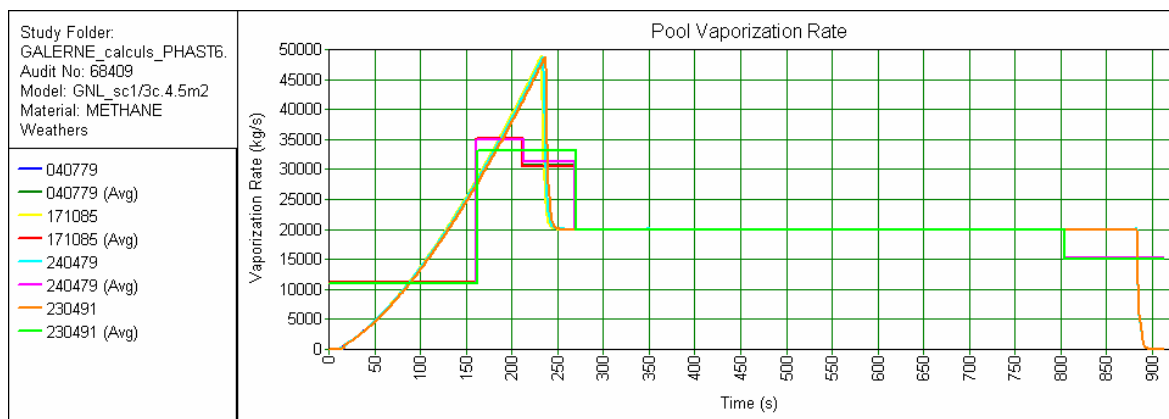


Figure 16. Évolution du débit d'évaporation en fonction du temps, pour une fuite au travers d'une brèche de 4,5 m<sup>2</sup>. Le pic correspond à la dimension maximale atteinte par la nappe. Ce pic est pris en compte par une succession de segments à débit constant dans le calcul de la formation du nuage dans l'atmosphère

## 5.2.2 GNL (simulations avec EVOLCODE et MERCURE)

Les résultats présentés dans ce chapitre sont issus d'une modélisation d'épandage de GNL avec les outils EVOLCODE et MERCURE.

Le scénario maximaliste (brèche de 4,5 m<sup>2</sup>) a été modélisé avec le code CFD MERCURE, en prenant en compte la présence du navire.

Les mêmes hypothèses que celles utilisées pour les modélisations sous PHAST ont été retenues. Le Tableau 1 présente, pour les deux situations météorologiques F/2 et D/5.6, le rayon de nappe et la distance à la LII estimés par les modèles.

	Outils de calcul		04/07/1979	23/04/1991
			F/2	D/5.6
Brèche 20 cm <sup>2</sup>	Evolcode	Rayon de la nappe	6 m	6 m
		Distance à la LII	140 m	95 m
Brèche 5 dm <sup>2</sup>	Evolcode	Rayon de la nappe	70 m	70 m
		Distance à la LII	500 m	250 m
Brèche 2 m <sup>2</sup>	Evolcode	Rayon de la nappe	300 m	300 m
		Distance à la LII	1300 m	900 m
Brèche 4,5 m <sup>2</sup>	Code CFD Mercure	Rayon de la nappe	400 m	400 m
		Distance à la LII	5100 m	5400 m

*Tableau 1. Résultats de calcul de rayon de nappe et de distance à la LII pour les scénarios d'épandage de GNL, avec les outils EVOLCODE et MERCURE.*

On observe qu'EVOLCODE donne des résultats – taille de nappe et distance à la LII – globalement légèrement plus grands que ceux obtenus avec le logiciel PHAST, présentés précédemment. Néanmoins, si l'on compare les distances à la LII obtenues avec EVOLCODE et les distances à 0,85xLII obtenues avec PHAST, les écarts sont moindres, voire s'inversent (cf. Figure 17 et § 4.3.1.2).

Les écarts entre les résultats des outils EVOLCODE et PHAST s'expliquent essentiellement par des différences au niveau du modèle d'étalement. Bien que les théories des deux modèles soient similaires, certains paramètres physiques (rugosité, flux d'échange thermique...) divergent entre ces deux outils. Il en résulte que les dimensions des nappes calculées par EVOLCODE sont plus importantes. Le débit de vaporisation total est donc plus grand, conduisant à des distances à la LII globalement un peu plus grandes. Néanmoins, les résultats affichés par les deux outils demeurent dans les mêmes ordres de grandeurs.

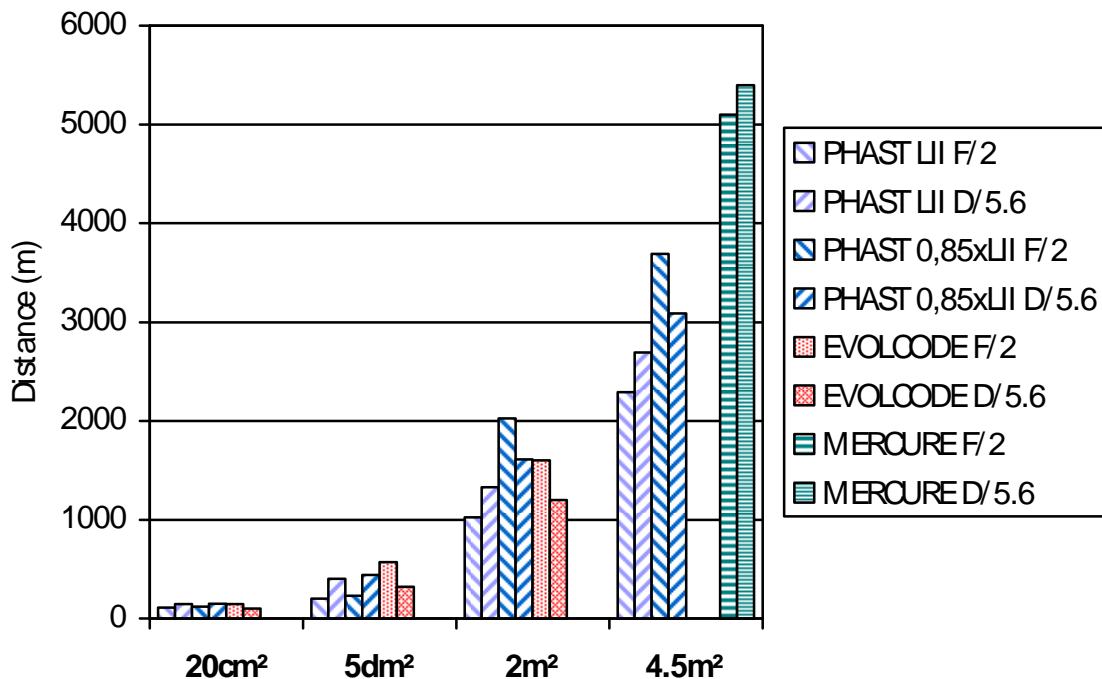


Figure 17. Comparaison des distances à la LII calculées par les outils EVOLCODE et MERCURE avec les distances à la LII et à 0,85xLII calculées avec PHAST, pour les scénarios d'épandage de GNL sur l'eau 1/3a à 1/3d. (Les rayons de nappe ont été ajoutés aux distances affichées dans les tableaux pour les calculs avec PHAST et EVOLCODE).

Les distances assez nettement différentes obtenues sur le dernier cas (4,5 m<sup>2</sup>) s'expliquent par l'utilisation d'un code de type CFD, Mercure, qui est fondé sur des principes de modélisation très différents. Cet outil permet de simuler notamment les particularités de l'écoulement atmosphérique liées à la présence du navire.

Outre les différences liées à la prise en compte de la présence du navire, les écarts entre codes CFD et codes simples (Phast ou Evolcode) sur ces rejets massifs sont connus. Faute de validation à ces échelles, il n'est pas possible de se prononcer sur le modèle reproduisant les phénomènes de la façon la plus réaliste. On peut toutefois noter qu'il a été observé une tendance globale des codes de calcul de type CFD employant un modèle de turbulence de type k-ε (standard) à sur-estimer les concentrations sur l'axe du panache en champ lointain lors d'une dispersion en champ libre. Ceci serait dû à une sous-estimation de l'activité turbulente atmosphérique par ce modèle de turbulence en l'absence d'obstacles perturbateurs « artificiels » de l'écoulement (Gorlé, 2009).

Nous présentons dans la suite quelques illustrations du panache de vapeurs de GNL se dispersant dans l'atmosphère en présence du navire méthanier, pour le scénario de rejet au travers d'une brèche de 4,5 m<sup>2</sup>.

### Scénario 4,5m<sup>2</sup> F/2

- Les Figure 18 et Figure 19 montrent l'évolution au cours du temps des distances à la limite inférieure et supérieure d'inflammabilité (LII et LSI). La distance maximale à la LII  $D_{LII} = 5100$  m est atteinte au bout de 31 min de dispersion.
- Le temps nécessaire à la dispersion totale du nuage est  $t = 60$  min.
- L'effet de sillage en aval du navire est nettement visible, notamment après 46 min de rejet.

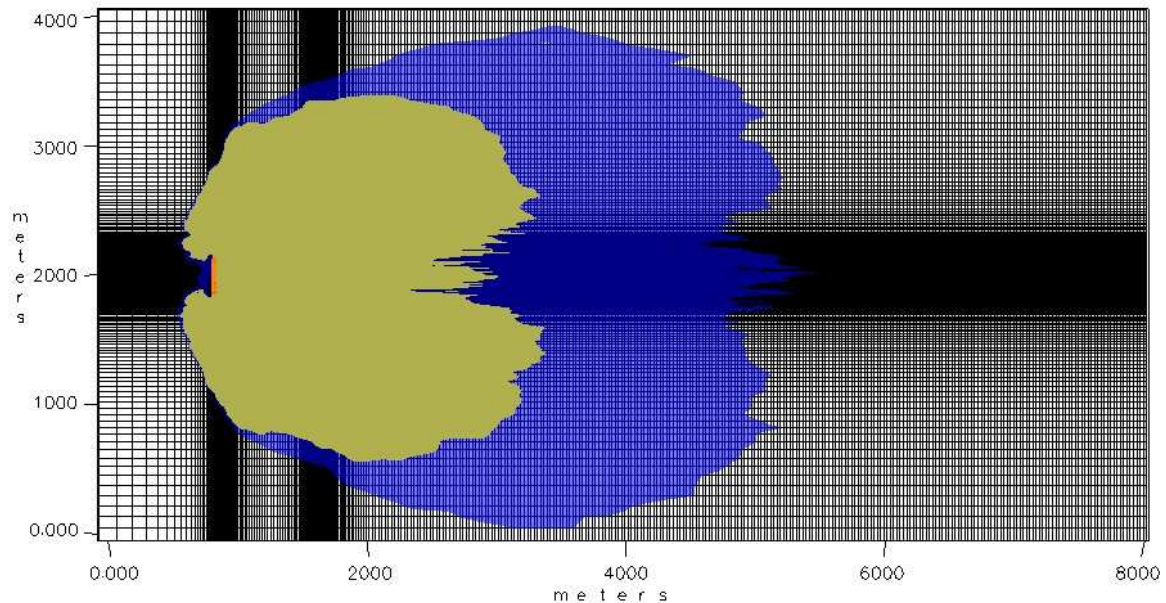


Figure 18. Scénario F/2 ; Avancée du nuage de gaz à 5% (en bleu) et à 15% (en jaune) à  $t = 30$  min



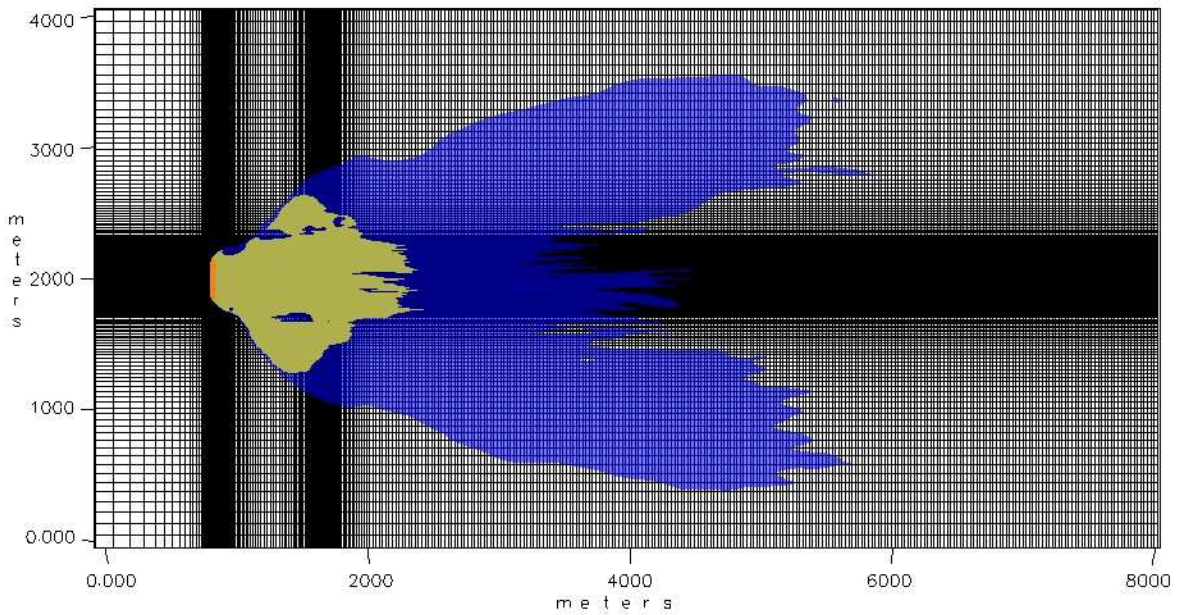


Figure 19. Scénario F/2 ; Avancée du nuage de gaz à 5% (en bleu) et à 15% (en jaune) à  $t = 46$  min

#### Scénario 4,5m<sup>2</sup> D/5.6

- Les figures suivantes montrent l'évolution au cours du temps de la distance à la limite inférieure et supérieure d'explosibilité (LIE et LSE). La distance maximale à la LIE  $D_{LIE} = 5400$  m est atteinte au bout de 31min de dispersion.
- Le temps nécessaire à la dispersion totale du nuage est  $t = 44$ min.
- L'effet de sillage lié au navire est également bien visible.
- On peut noter que le nuage est plus large en conditions F/2 qu'en conditions D/5.6. Ceci peut s'expliquer par un effet de canalisation du panache dans l'axe du vent accru lorsque le vent souffle plus fort (5.6 m/s contre 2 m/s).

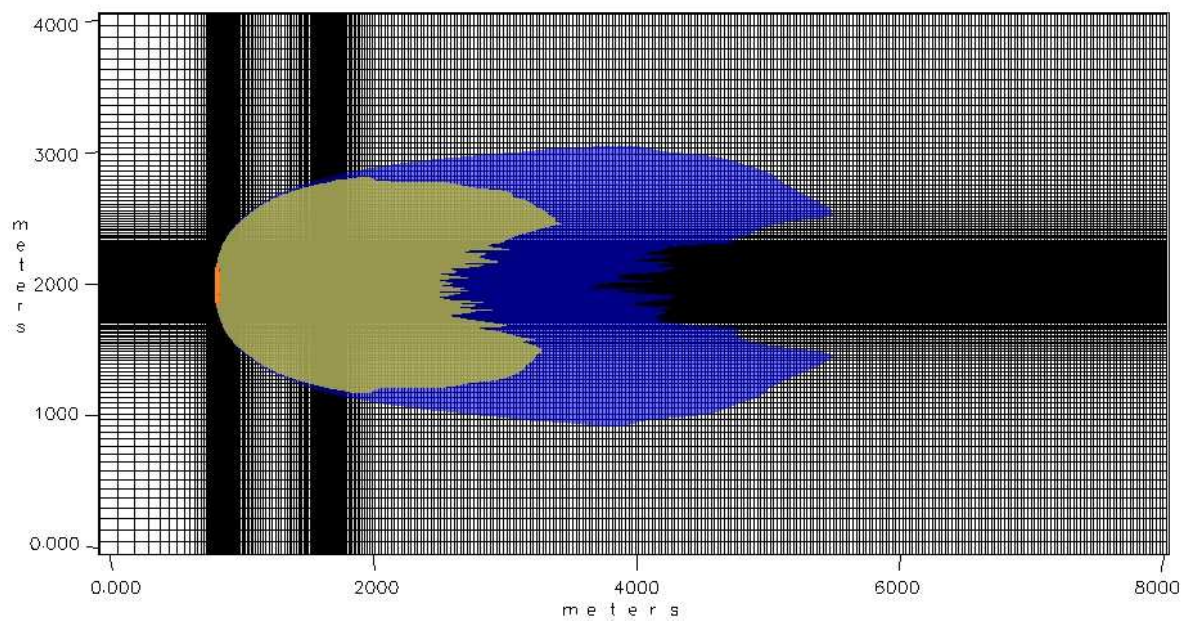


Figure 20. Scénario D/5.6 ; Avancée du nuage de gaz à 5% (en bleu) et à 15% (en jaune) à  $t = 20\text{min}$

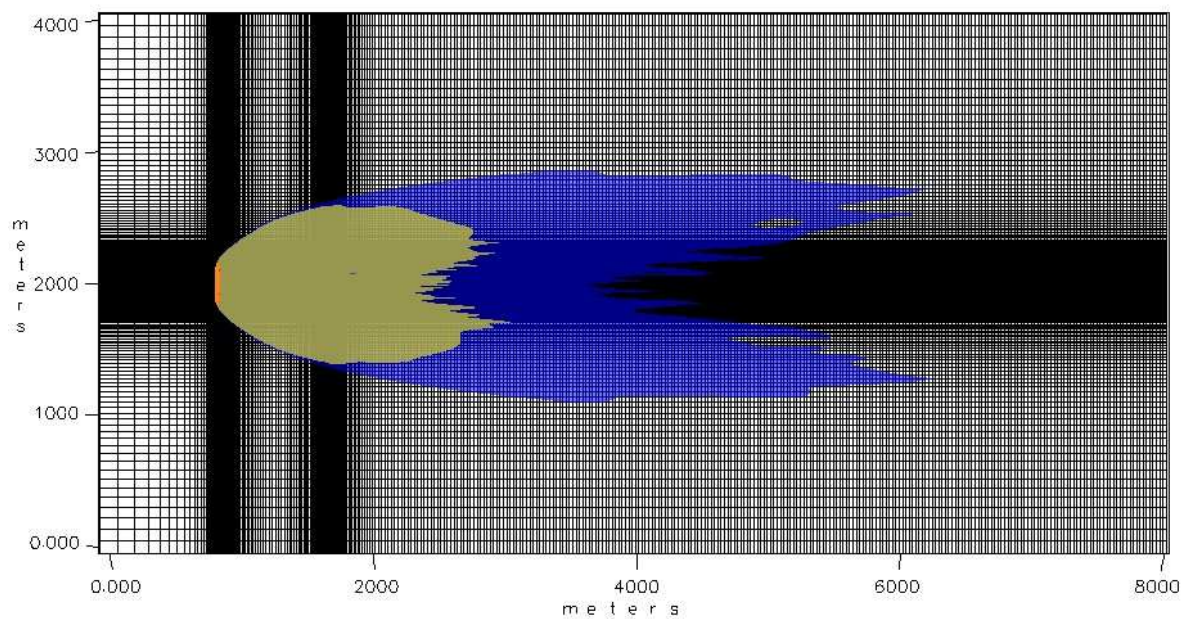


Figure 21. Scénario D/5.6 ; Avancée du nuage de gaz à 5% (en bleu) et à 15% (en jaune) à  $t = 30\text{min}$



## 5.2.3 Ammoniac

L'ammoniac est transporté semi-réfrigéré ou sous pression de vapeur saturante à température ambiante. L'hypothèse d'un stockage pressurisé est ici faite.

### Seuils d'inflammabilité et de toxicité aiguë

Durée [min]	LII [%vol]	Seuils effets létaux (SEL 1%) [ppm]				Seuils effets irréversibles (SEI) [ppm]				Seuils effets réversibles (SER) [ppm]				Seuil olfactif
		1	10	30	60	1	10	30	60	1	10	30	60	
Ammoniac (seuils français) <sup>a</sup>	16,0%	25300	8200	4767	3400	1500	866	500	354	280	150	110	80	5-50
Ammoniac (urgence) <sup>b</sup>	16,0%				750				150		25	25	25	

<sup>a</sup> INERIS, 2003

<sup>b</sup> ERPG-3 et ERPG-2 pour SEL et SEI. AEGL-1 pour SER (+ protecteurs vis-à-vis de la population). Mais les secours sont équipés, donc les seuils officiels français ont été retenus.

Scénario 6	Ammoniac - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3600 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	40 kg/s	970 kg/s	40000 kg/s
Durée de rejet	~ 25 h	~1 h	1 min 30
Conséquences et risques	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Très soluble dans l'eau Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau	Très soluble dans l'eau	Très soluble dans l'eau

### 5.2.3.1 Scénario 6a - 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	0%	0%	0%	0%
Rayon maximal de nappe	-	-	-	-
Débit d'évaporation	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	-	-	-	-
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-

Distance à la LII (16%)	30 m	30 m	30 m	30 m
Distance à la ½ LII	60 m	60 m	60 m	60 m
Demi-largeur à la LII	1 m	1 m	1 m	1 m
Hauteur maximale à la LII	2 m	2 m	2 m	2 m
Distance Olfactif (5ppm)	> 10 km (50+)	> 10 km (21)	> 10 km (35)	> 10 km (50+)
Distance Olfactif (50ppm)	> 10 km (44 !)	5.2 km	7.5 km	10 km
Distance SER 30 min	> 10 km (19)	3.1 km	3.5 km	4.8 km
Distance SEI 30 min	7.2 km	1.9 km	1.7 km	2.3 km
Distance SEL 1% 30 min	850 m	1.1 km	800 m	1.1 km
Demi-largeur au SER 30 min	2100 m	400 m	200 m	400 m
Demi-largeur au SEI 30 min	1100 m	260 m	130 m	260 m
Demi-largeur au SEL 1% 30 min	140 m	90 m	60 m	90 m
Hauteur SER 30 min	30 m	60 m	60 m	60 m

L'*averaging time* a été ajusté sur la durée d'exposition estimée (1 min ou 30 min) pour les distances d'effets toxiques.

Aucune nappe ne se forme sur l'eau, d'après la modélisation. Ce résultat est cohérent avec les observations réelles de rejets horizontaux d'ammoniac pressurisé à température ambiante.

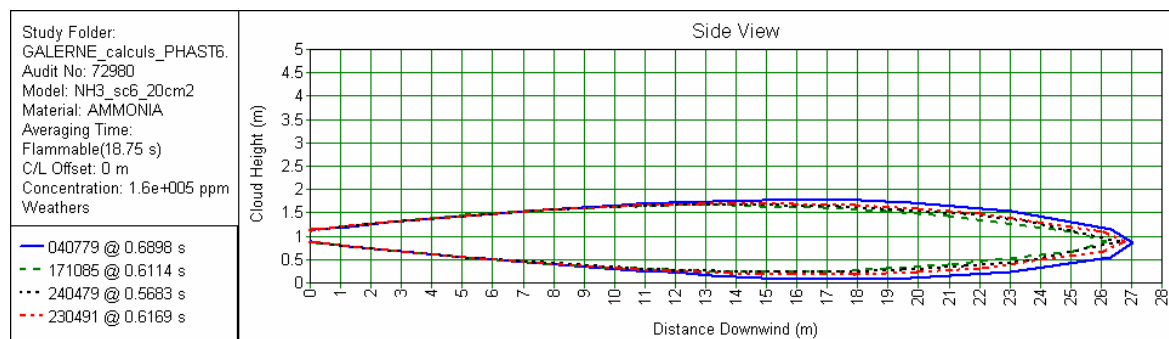


Figure 22. Vue latérale du nuage inflammable d'ammoniac pour une fuite au travers d'une brèche de 20 cm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.3.2 Scénario 6b - 5 dm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	< 1 %	< 2 %	< 2 %	< 2 %
Rayon maximal de nappe	2-3 m	2-3 m	2-3 m	2-3 m
Débit d'évaporation	<i>négligé</i>	<i>négligé</i>	<i>négligé</i>	<i>négligé</i>
Taux d'évaporation surfacique	-	-	-	-

Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance à la LII (16%)	160 m	160 m	170 m	170 m
Distance à la ½ LII	310 m	330 m	360 m	330 m
Demi-largeur à la LII	10 m	10 m	10 m	10 m
Hauteur maximale à la LII	5 m	5 m	5 m	5 m
Distance Olfactif (5ppm)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)
Distance Olfactif (50ppm)	> 10 km (50+)	> 10 km (40)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)
Distance SER 30 min	> 10 km (50+)	> 10 km (21)	> 10 km (25)	> 10 km (40)
Distance SEI 30 min	> 10 km (50)	> 10 km (12)	> 10 km (10)	> 10 km (17)
Distance SEL 1% 30 min	3600 m	5200 m	3600 m	5400 m
Distance SER 30 mn	> 10 km	4 km	2 km	4 km

L'*averaging time* a été ajusté sur la durée d'exposition estimée (1 min ou 30 min) pour les distances d'effets toxiques.

La nappe liquide formée sur l'eau lors du rejet contribue de manière négligeable à l'émission d'ammoniac dans l'air. Cette contribution est donc négligée devant l'émission directe d'ammoniac dans l'air.



Figure 23. Vue latérale du nuage inflammable d'ammoniac pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.3.3 Scénario 6c - 2 m<sup>2</sup>

La nappe d'ammoniac qui se forme à la surface de l'eau se vaporise en deux à trois minutes.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	7 %	9 %	12 %	11 %
Rayon maximal de nappe	85 m	85 m	85 m	85 m
Débit d'évaporation (max.)	800 kg/s	1300 kg/s	1600 kg/s	1600 kg/s
Taux d'évaporation surfacique (max.)	35 g/m <sup>2</sup> /s	35 g/m <sup>2</sup> /s	35 g/m <sup>2</sup> /s	35 g/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la	-	-	-	-

nappe liquide				
Distance à la LII (16%)	950 m	1000 m	1050 m	1000 m
Distance à la ½ LII	1600 m	1600 m	1700 m	1600 m
Demi-largeur à la LII	150 m	100 m	100 m	100 m
Hauteur maximale à la LII	20 m	20 m	20 m	20 m
Distance Olfactif (5ppm)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)
Distance Olfactif (50ppm)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)
Distance SER 30 min	> 10 km (50+)	> 10 km (34)	> 10 km (50+)	> 10 km (50+)
Distance SEI 30 min	> 10 km (41)	> 10 km (22)	> 10 km (31)	> 10 km (28)
Distance SEL 1% 30 min	7800 m	10 km	> 10 km (13)	> 10 km (12)
Hauteur SER 30 min	250 m	250 m	250 m	250 m

L'*averaging time* a été ajusté sur la durée d'exposition estimée (1 min ou 30 min) pour les distances d'effets toxiques.

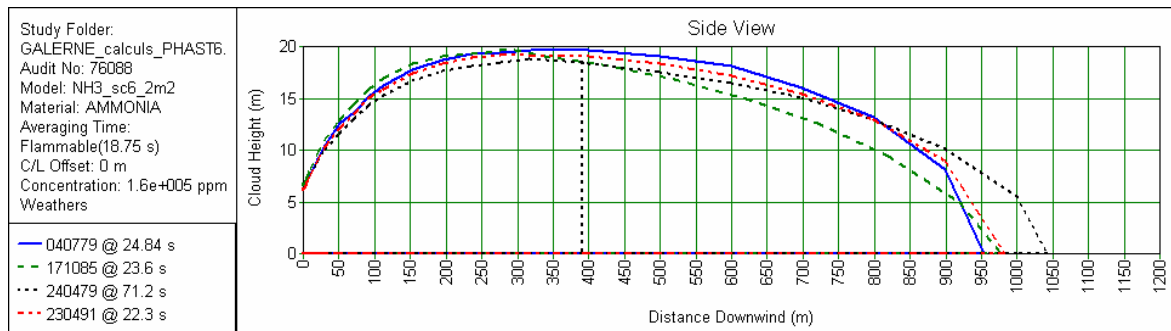


Figure 24. Vue latérale du nuage inflammable d'ammoniac pour une fuite au travers d'une brèche de 2 m<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

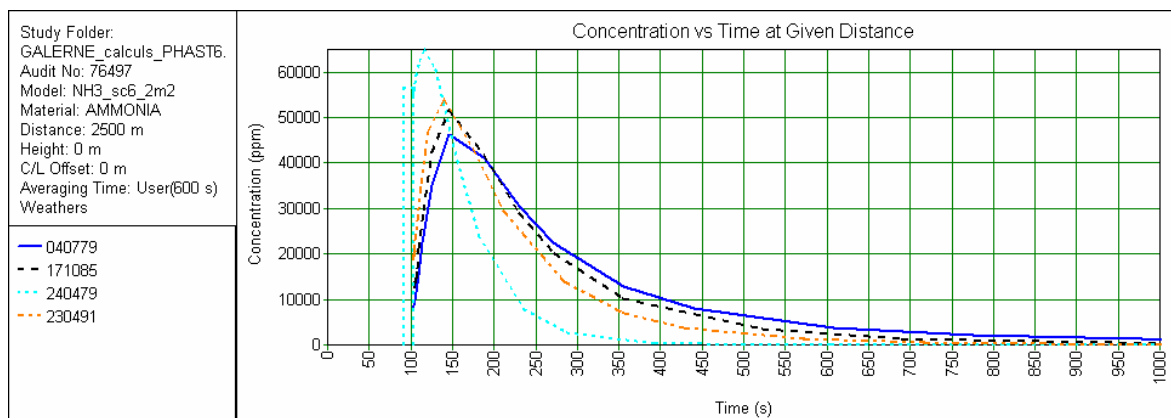


Figure 25. Évolution du niveau de concentration en fonction du temps, à 2,5 km de la source : le nuage se présente comme une « bouffée ».

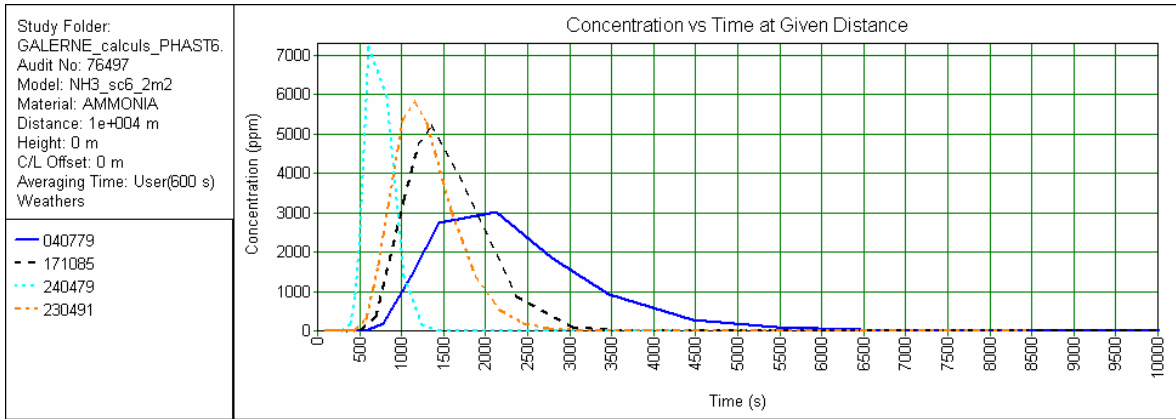


Figure 26. Évolution du niveau de concentration en fonction du temps, à 10 km de la source : le nuage se présente comme une « bouffée ».

## 5.2.4 Chlorure de vinyle monomère (CVM)

Le Chlorure de vinyle est généralement transporté sous pression de vapeur saturante à température ambiante. Par conséquent, l'hypothèse d'un stockage pressurisé à température ambiante est ici retenue. La pression de vapeur saturante à 15°C est proche de 3 bar (abs).

### Seuils d'inflammabilité et de toxicité aiguë

Durée [min]	LII [%vol]	AEGL-3 [ppm]			AEGL-2 [ppm]			AEGL-1 [ppm]			Seuil olfactif <sup>a</sup>
		10	30	60	10	30	60	10	30	60	
<b>CVM<sup>a</sup></b>	3,6%	12000	6800	4800	2800	1600	1200	450	<b>310</b>	250	250-5000 <sup>b</sup>

<sup>a</sup>Source : <http://www.epa.gov/oppt/aegl/>

<sup>b</sup>Source : [http://chimie.ineris.fr/fr/lespdf/metodexpacc/rapports/chlorure\\_vinyle\\_seuils.pdf](http://chimie.ineris.fr/fr/lespdf/metodexpacc/rapports/chlorure_vinyle_seuils.pdf)

Il existe des valeurs françaises pour le seuil des premiers effets létaux et létaux significatifs, mais pas pour les effets irréversibles ni réversibles, compte tenu d'un manque de données disponibles pour les établir. Par conséquent, les valeurs retenues sont les AEGL-1.

Les distances au seuil AEGL-1 pour 30 minutes d'exposition (310 ppm) sont données dans les tableaux ci-dessous.

Scénario 7	Chlorure de Vinyle – Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 5800 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	27 kg/s	670 kg/s	27400 kg/s
Durée de rejet	60 h	2 h 30 min	3 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène

### 5.2.4.1 Scénario 7a – 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	~1%	~1%	~1%	~1%
Rayon maximal de nappe	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée
Rayon d'équilibre de la	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée

nappe				
Débit d'évaporation	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée
Taux d'évaporation surfacique	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée
Temps d'équilibre de la nappe liquide	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée	nappe négligée
Distance à la LII (3,6%)	60 m	60 m	60 m	60 m
Distance à la ½ LII	100 m	120 m	140 m	120 m
Demi-largeur à la LII	4 m	3 m	2 m	3 m
Demi-largeur à la ½ LII	12 m	10 m	7 m	8 m
Hauteur à la LII	2 m	2 m	2 m	2 m
Hauteur à la ½ LII	3 m	2 m	2 m	2 m
Distance AEGL-1 30 min	3900 m	1050 m	1050 m	1300 m
Demi-largeur AEGL-1 30 min	1000 m	160 m	80 m	150 m
Hauteur AEGL-1 30 min	10 m	15 m	12 m	12 m

#### 5.2.4.2 Scénario 7b - 5 dm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	21 %	28 %	20 %	23 %
Rayon maximal de nappe	50 m	60 m	50 m	60 m
Rayon d'équilibre de la nappe	35 m	40 m	35 m	40 m
Débit d'évaporation maximal	310 kg/s	420 kg/s	300 kg/s	340 kg/s
Débit d'évaporation à l'équilibre	143 kg/s	190 kg/s	135 kg/s	160 kg/s
Taux d'évaporation surfacique (à l'équilibre)	37 g/m <sup>2</sup> /s	38 g/m <sup>2</sup> /s	37 g/m <sup>2</sup> /s	34 g/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	600 s	600 s	600 s	600 s
Distance à la LII (3,6%)	280 m	300 m	350 m	300 m
Distance à la ½ LII	460 m	570 m	700 m	550 m
Demi-largeur à la LII	30 m	30 m	25 m	25 m
Demi-largeur à la ½ LII	75 m	70 m	50 m	60 m
Hauteur à la LII	6 m	5 m	4 m	5 m
Hauteur à la ½ LII	10 m	7 m	6 m	6 m
Distance AEGL-1 30 min	> 10 km (30)	7,5 km	5,3 km	8,4 km
Demi-largeur AEGL-1 30 min	6 km	1,5 km	600 m	1400 m

Hauteur AEGL-1 30 min	30 m	30 m	40 m	30 m
-----------------------	------	------	------	------

### 5.2.4.3 Scénario 7c - 2 m<sup>2</sup>

Le nuage inflammable et toxique est engendré essentiellement par la vaporisation de la nappe qui se forme à la surface de l'eau.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	71 %	72 %	72 %	72 %
Rayon maximal de nappe	250 m	260 m	250 m	260 m
Débit maximal d'évaporation	8100 kg/s	8400 kg/s	8100 kg/s	8200 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	41 g/m <sup>2</sup> /s	42 g/m <sup>2</sup> /s	41 g/m <sup>2</sup> /s	39 g/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Distance à la LII (3,6%)	8,3 km	2,3 km	1,5 km	2,2 km
Distance à la ½ LII	> 10 km (12)	4,5 km	2,4 km	4 km
Demi-largeur à la LII	> 10 km (11)	800 m	400 m	700 m
Demi-largeur à la ½ LII	> 10 km (18)	1,6 km	600 m	1,2 km
Hauteur à la LII	< 10 m	< 10 m	< 10 m	< 10 m
Hauteur à la ½ LII	< 10 m	< 10 m	< 10 m	< 10 m
Distance AEGL-1 30 min	> 10 km (50+)	> 10 km (32)	> 10 km (17)	> 10 km (30)
Demi-largeur AEGL-1 30 min	> 10 km (50+)	7,6 km	1,9 km	5,5 km
Hauteur AEGL-1 30 min	25 m	60 m	110 m	60 m



## 5.2.5 Propane

Le propane est transporté semi-réfrigéré ou sous pression de vapeur saturante à température ambiante. L'hypothèse d'un stockage pressurisé est ici faite.

Scénario 8	PROPANE - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3000 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	32 kg/s	800 kg/s	33000
Durée de rejet	26 h	1 h	90 s
Conséquences et risques	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

### 5.2.5.1 Scénario 8a - 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	0%	0%	0%	0%
Rayon maximal de nappe	-	-	-	-
Débit d'évaporation	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	-	-	-	-
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance à la LII (2%)	100 m	100 m	110 m	100 m
Distance à la ½ LII	190 m	220 m	260 m	220 m
Demi-largeur à la LII	6 m	5 m	4 m	5 m
Demi-largeur à la ½ LII	16 m	12 m	10 m	12 m
Hauteur maximale à la LII	4 m	3 m	3 m	3 m
Hauteur maximale à la ½ LII	5 m	4 m	4 m	4 m

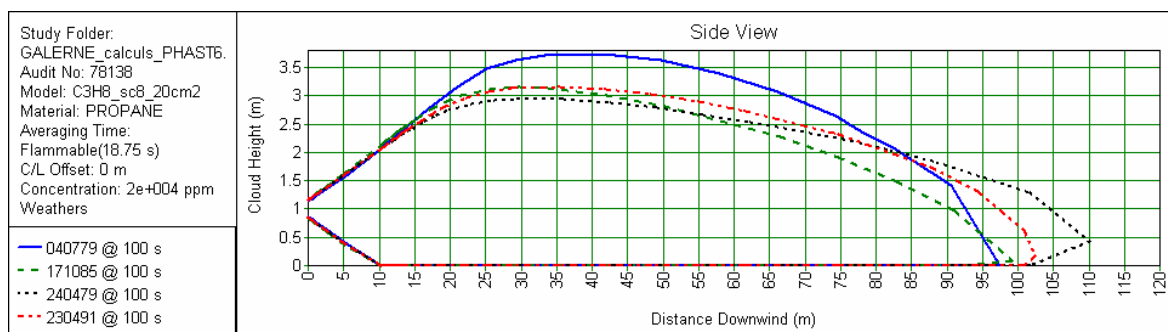


Figure 27. Vue latérale du nuage inflammable de propane pour une fuite au travers d'une brèche de 20 cm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.5.2 Scénario 8b - 5 dm<sup>2</sup>

Le nuage inflammable persiste tant que la fuite dure, puis se dissipe très rapidement – quelques dizaines de secondes.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	0%	0%	0%	0%
Rayon maximal de nappe	-	-	-	-
Débit d'évaporation	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	-	-	-	-
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance à la LII (2%)	470 m	510 m	590 m	520 m
Distance à la ½ LII	800 m	950 m	1200 m	950 m
Demi-largeur à la LII	50 m	40 m	35 m	40 m
Demi-largeur à la ½ LII	110 m	90 m	80 m	90 m
Hauteur maximale à la LII	10 m	10 m	10 m	10 m
Hauteur maximale à la ½ LII	15 m	15 m	15 m	15 m

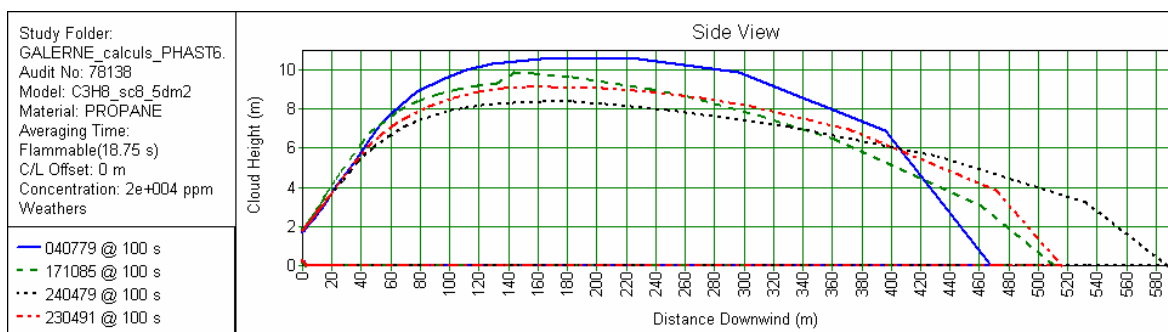


Figure 28. Vue latérale du nuage inflammable de propane pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

### 5.2.5.3 Scénario 8c - 2 m<sup>2</sup>

Le nuage inflammable se dissipe en quelque trois minutes dans tous les cas.

Situation	<b>04/07/1979</b>	<b>17/10/1985</b>	<b>24/04/1979</b>	<b>23/04/1991</b>
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	0%	0%	0%	0%
Rayon maximal de nappe	-	-	-	-
Débit d'évaporation	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	-	-	-	-
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance à la LII (2%)	2400 m	2600 m	3100 m	2700 m
Distance à la ½ LII	3400 m	3800 m	5100 m	4000 m
Demi-largeur à la LII	500 m	500 m	500 m	500 m
Demi-largeur à la ½ LII	800 m	800 m	800 m	800 m
Hauteur maximale à la LII	40 m	40 m	35 m	40 m
Hauteur maximale à la ½ LII	60 m	60 m	45 m	50 m

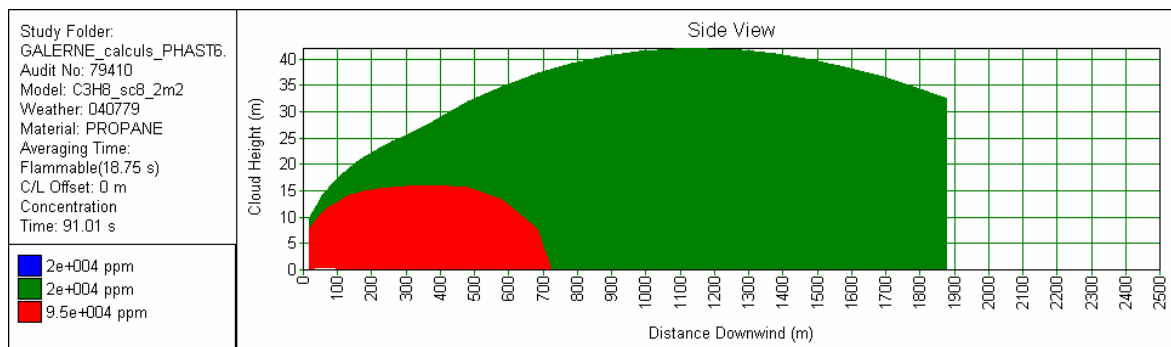


Figure 29. Vue latérale du nuage inflammable de propane pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans la situation de forte stabilité et vent faible (F, 2 m/s – 04/07/1979).

## 5.2.6 Éthylène

L'éthylène est transporté réfrigéré à -104°C environ.

Scénario 9	ETHYLENE réfrigéré - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	5000 m <sup>3</sup> / 2850 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	16 m	16 m	16 m
Débit estimé	12 kg/s	300 kg/s	12400 kg/s
Durée de rejet	65 h	2h30	230 s
Conséquences et risques	Nappe bouillonnante Feu de nappe Feu flash/VCE Brûlures froides	Idem a. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures	Idem a. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

### 5.2.6.1 Scénario 9a - 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	77 %	77 %	73 %	76 %
Rayon maximal de nappe	6.5 m	6.5 m	6.5 m	6.5 m
Rayon à l'équilibre	5 m	5 m	5 m	5 m
Débit d'évaporation max	16 kg/s	16 kg/s	16 kg/s	16 kg/s
Débit à l'équilibre	9 kg/s	9 kg/s	9 kg/s	9 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.11 kg/m <sup>2</sup> /s	0.11 kg/m <sup>2</sup> /s	0.11 kg/m <sup>2</sup> /s	0.11 kg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	50 s	50 s	50 s	50 s
Distance à la LII (2,3%)	330 m	210 m	160 m	220 m
Distance à la ½ LII	480 m	250 m	230 m	290 m
Demi-largeur à la LII	100 m	20 m	10 m	20 m
Demi-largeur à la ½ LII	200 m	30 m	20 m	30 m
Hauteur maximale à la LII	2 m	2 m	2 m	2 m
Hauteur maximale à la ½ LII	3 m	2 m	2 m	2 m

Le nuage est une nappe dense (gaz+aérosols) de faible épaisseur au-dessus de l'eau.

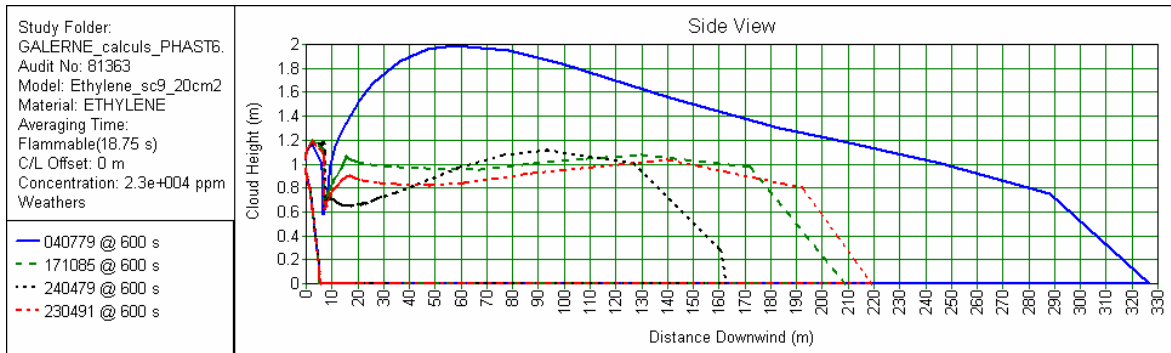


Figure 30. Vue latérale du nuage inflammable d'éthylène pour une fuite au travers d'une brèche de 20 cm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

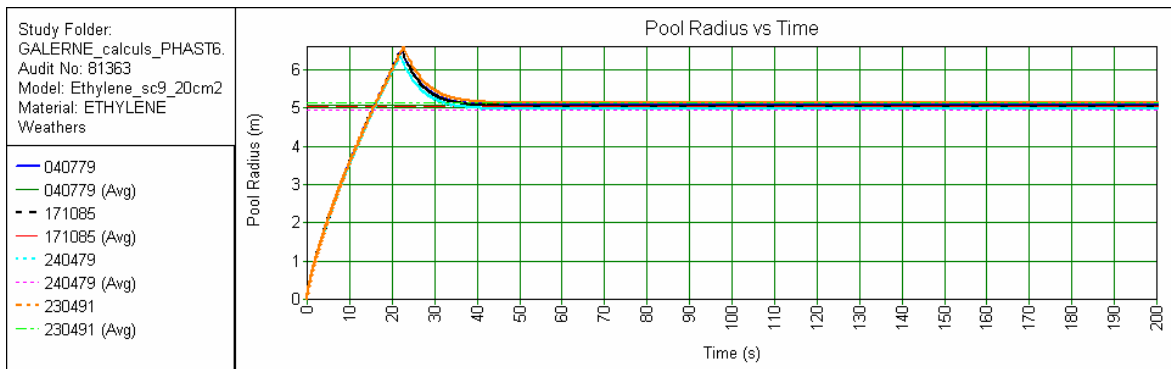


Figure 31. Évolution du rayon de la nappe en fonction du temps

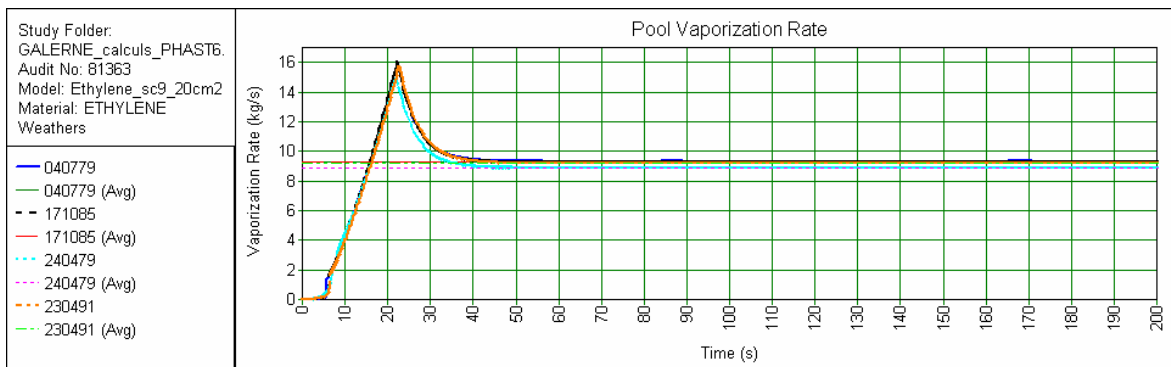


Figure 32. Évolution du taux d'évaporation en fonction du temps

### 5.2.6.2 Scénario 9b - 5 dm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	92 %	92 %	92 %	92 %
Rayon maximal de nappe	40 m	40 m	40 m	40 m
Rayon à l'équilibre	28 m	28 m	28 m	28 m
Débit d'évaporation max	630 kg/s	630 kg/s	630 kg/s	630 kg/s
Débit à l'équilibre	280 kg/s	280 kg/s	280 kg/s	280 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	100 s	100 s	100 s	100 s
Distance à la LII (2,3%)	1900 m	660 m	560 m	730 m
Distance à la ½ LII	2600 m	780 m	740 m	920 m
Demi-largeur à la LII	1100 m	160 m	80 m	160 m
Demi-largeur à la ½ LII	1500 m	200 m	100 m	200 m
Hauteur maximale à la LII	5 m	5 m	5 m	5 m
Hauteur maximale à la ½ LII	10 m	10 m	10 m <td 10 m	

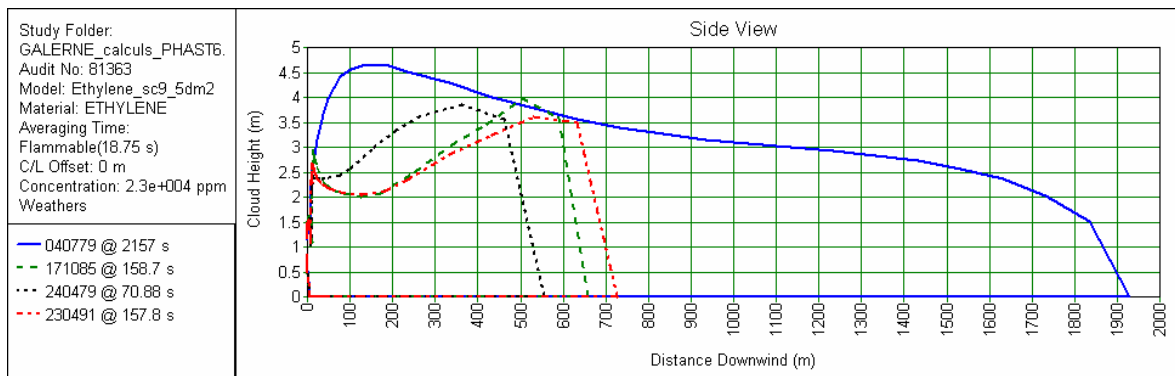


Figure 33. Vue latérale du nuage inflammable d'éthylène pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

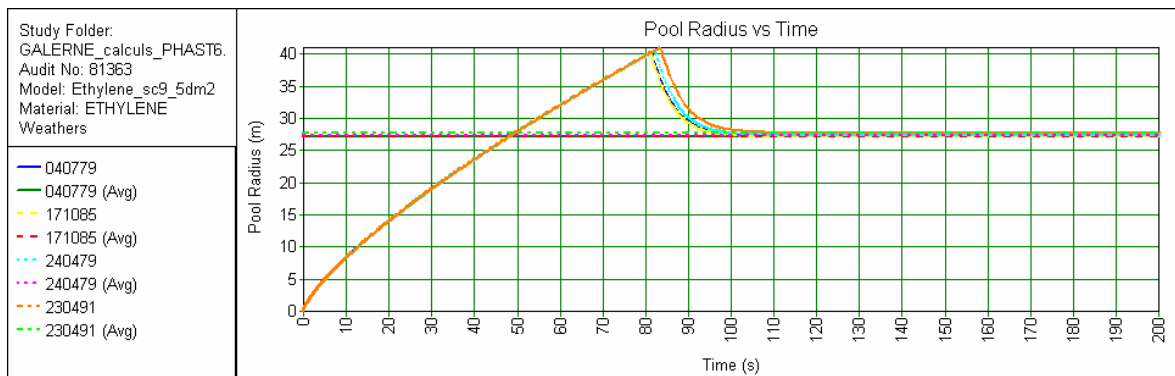


Figure 34. Évolution du rayon de la nappe en fonction du temps

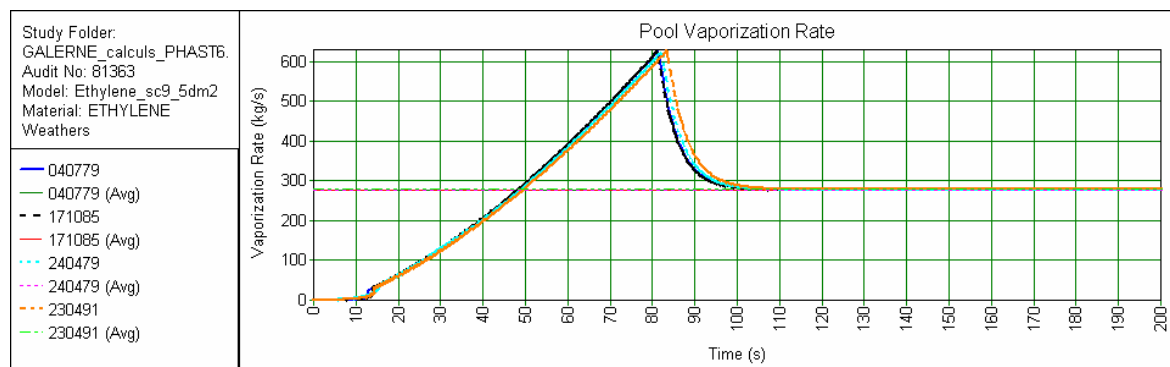


Figure 35. Évolution du taux d'évaporation en fonction du temps

### 5.2.6.3 Scénario 9c - 2 m<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	97 %	97 %	97 %	97 %
Rayon maximal de nappe	250 m	250 m	250 m	250 m
Rayon moyen retenu	180 m	180 m	180 m	180 m
Débit d'évaporation max	24000 kg/s	24000 kg/s	24000 kg/s	24000 kg/s
Débit moyen retenu	12000 kg/s	12000 kg/s	12000 kg/s	12000 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s	0,11 kg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance à la LII (2,3%)	3300 m	4000 m	3400 m	4500 m
Distance à la ½ LII	4300 m	4800 m	4500 m	6000 m
Demi-largeur à la LII	2100 m	1300 m	750 m	1300 m
Demi-largeur à la ½ LII	2600 m	1600 m	1000 m	1600 m
Hauteur maximale à la LII	10 m	15 m	15 m	15 m
Hauteur maximale à la ½ LII	15 m	20 m	25 m	15 m



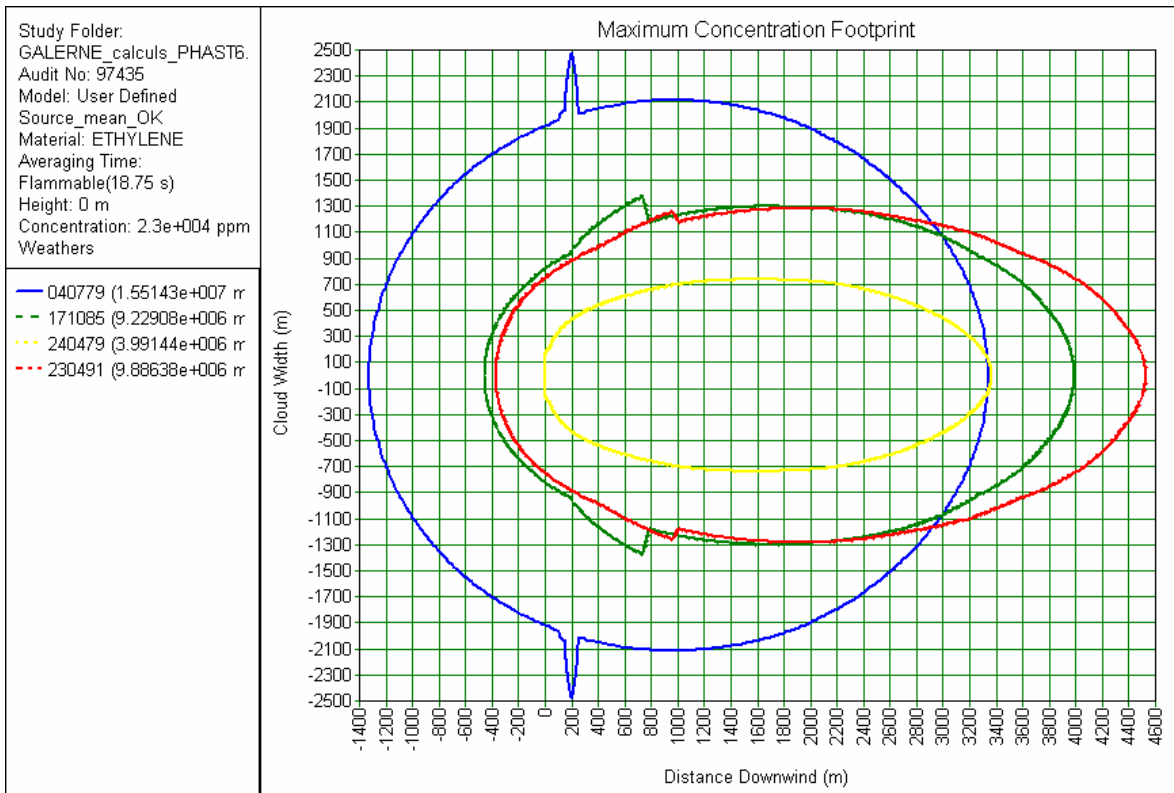


Figure 36. Empreintes des nuages d'éthylène au niveau de l'eau. Les discontinuités ne sont pas physiques (liées à une transition de modèles)

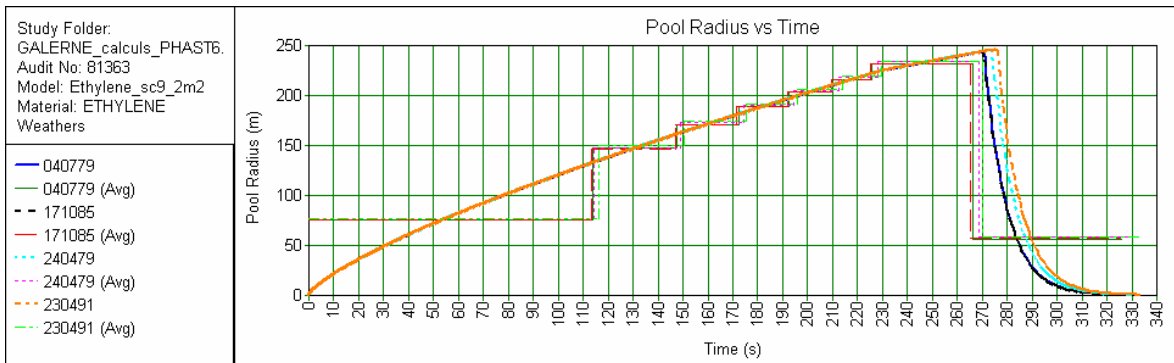


Figure 37. Évolution du rayon de la nappe en fonction du temps

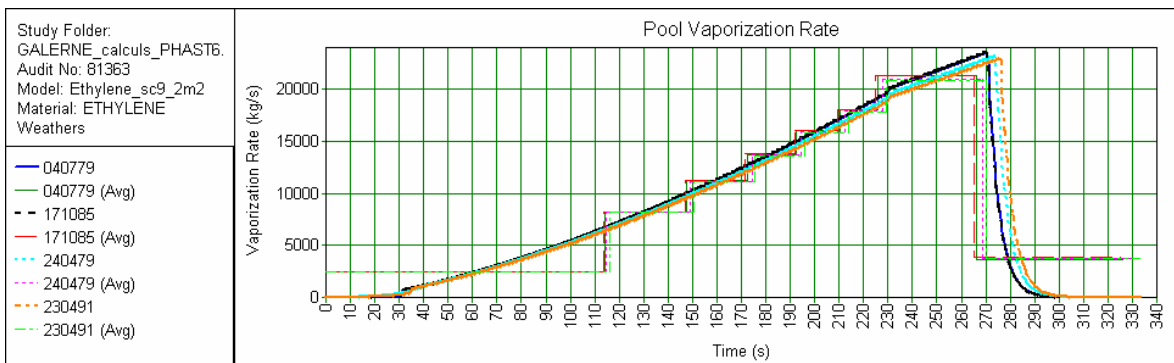


Figure 38. Évolution du taux d'évaporation en fonction du temps

## 5.2.7 Xylènes

Les Xylènes sont transportés à température et pression ambiante.

Le scénario 10 envisage une collision induisant une brèche au-dessus de la ligne de flottaison. Le xylène se déverse alors quasi intégralement à la surface d'eau. Une très faible part s'évapore avant de toucher l'eau. Sur l'eau, le xylène forme une nappe évaporante.

Le scénario 11 correspond en revanche à une collision induisant une brèche sous la ligne de flottaison : le xylène s'échappe alors sous l'eau. Les outils de simulation à notre disposition ne nous permettent pas de donner une estimation des zones d'effets induites pour le scénario 11. Notons toutefois que :

- Les débits de fuite seront peu différents de ceux estimés pour un rejet au-dessus de l'eau, compte tenu du fait que les densités du xylène et de l'eau sont assez proches ;
- une partie plus importante de xylène que dans le scénario 10 sera dissoute lors de la phase de remontée du xylène à la surface – le xylène est en effet un peu moins dense que l'eau. Cette part dissoute sera déduite des émissions à l'atmosphère. Ainsi, on s'attend à ce que les nappes de xylène formées à la surface soient un peu moins étendues : les distances seront donc un peu réduites par rapport aux distances affichées pour le scénario 10. Néanmoins, la solubilité du xylène est faible.

Une solubilité de 0,2 g/L a été retenue pour les calculs. Notons que selon que ce paramètre soit négligé ou pris égal à 1,2 g/L (valeur mesurée par le *Cedre* – Cedre, 2006), les distances d'effet ne sont pas notablement modifiées. D'autre part, le phénomène d'émulsion n'est pas pris en compte dans ces estimations. L'émulsion induit une dispersion naturelle des xylènes dans la colonne d'eau, réduisant par conséquent le taux d'évaporation de la nappe.

Scénario 10	XYLENES - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	15.5 kg/s	386 kg/s	15830 kg/s
Durée de rejet	> 39 h	> 1 h 35	> 140 s
Conséquences et risques	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

### Seuils d'inflammabilité et de toxicité aiguë

Durée [min]	LII [%vol]	AEGL-3 [ppm]			AEGL-2 [ppm]			AEGL-1 [ppm]			Seuil olfactif <sup>a</sup>
		10	30	60	10	30	60	10	30	60	-
<b>Xylènes<sup>a</sup></b>	1,0%	7200	3600	2500	2500	1300	920	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>0.7-5.4</b>

<sup>a</sup>Source : Guide d'intervention chimique – Xylènes – CEDRE, 2007

Les distances au seuil AEGL-1 de 130 ppm sont données dans les tableaux ci-dessous.

#### 5.2.7.1 Scénario 10a – 20 cm<sup>2</sup>

Le taux d'évaporation surfacique est relativement faible, donc l'équilibre de la nappe entre son débit d'évaporation et son alimentation côté brèche n'est atteint qu'après plusieurs heures. La LII n'est jamais atteinte dans ces conditions d'évaporation de nappe, sinon dans la toute proximité du déversement : la concentration au-dessus de la nappe est en effet limitée par la pression de vapeur saturante du xylène ( $P_{\text{sat}}(15^{\circ}\text{C}) \approx 6.2 \text{ mbar}$ , soit  $C_{\text{sat}}(15^{\circ}\text{C}) \approx 6200 \text{ ppm}$ ). La présence d'une source d'inflammation déclencherait alors un feu de nappe et non un feu ou une explosion de nuage.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	100 %	100 %	100 %	100 %
Rayon maximal de nappe	330 m	240 m	220 m	260 m
Rayon à l'équilibre	330 m	240 m	220 m	260 m
Débit d'évaporation max	15.5 kg/s	15.5 kg/s	15.5 kg/s	15.5 kg/s
Débit à l'équilibre	15.5 kg/s	15.5 kg/s	15.5 kg/s	15.5 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	45 mg/m <sup>2</sup> /s	91 mg/m <sup>2</sup> /s	103 mg/m <sup>2</sup> /s	73 mg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	~ qq h	~ qq h	~ qq h	~ qq h
Distance SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	1800 m	500 m	440 m	600 m
Demi-largeur SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	940 m	90 m	60 m	60 m
Hauteur du nuage SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	5 m	15 m	10 m	15 m
Distance à la LII (1%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Distance à la ½ LII	300 m	10 m	15 m	20 m
Demi-largeur à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Demi-largeur à la ½ LII	60 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m
Hauteur max. à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Hauteur max. à la ½ LII	~2 m	~2 m	~2.5 m	~2 m

### 5.2.7.2 Scénario 10b – 5 dm<sup>2</sup>

Le taux d'évaporation surfacique est relativement faible, donc l'équilibre de la nappe entre son débit d'évaporation et son alimentation côté brèche n'est pas atteint avant la fin du rejet à la brèche.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	100 %	100 %	100 %	100 %
Rayon maximal de nappe	~ 600 m	600 m	550 m	600 m
Rayon à l'équilibre ( <b>non atteint</b> )	<i>1650 m</i>	<i>1150 m</i>	<i>1100 m</i>	<i>1300 m</i>
Débit d'évaporation max	~ 50 kg/s	95 kg/s	105 kg/s	80 kg/s
Débit à l'équilibre	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Taux d'évaporation surfacique	45 mg/m <sup>2</sup> /s	91 mg/m <sup>2</sup> /s	103 mg/m <sup>2</sup> /s	73 mg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Distance SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	3200 m	700 m	850 m	850 m
Demi-largeur SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	2000 m	150 m	250 m	100 m
Hauteur du nuage SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	6 m	20 m	20 m	20 m
Distance à la LII (1%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Distance à la ½ LII	350 m	25 m	35 m	40 m
Demi-largeur à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Demi-largeur à la ½ LII	60 m	10 m	7 m	8 m
Hauteur max. à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Hauteur max. à la ½ LII	~ 3 m	~ 4 m	4 m	4 m

### 5.2.7.3 Scénario 10c – 2 m<sup>2</sup>

Le taux d'évaporation surfacique est relativement faible, donc l'équilibre de la nappe entre son débit d'évaporation et son alimentation côté brèche n'est pas atteint avant la fin du rejet à la brèche.

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	100 %	100 %	100 %	100 %
Rayon maximal de nappe	~ 600 m	600 m	550 m	600 m
Rayon à l'équilibre ( <b>non atteint</b> )	<i>1650 m</i>	<i>1150 m</i>	<i>1100 m</i>	<i>1300 m</i>
Débit d'évaporation max	~50 kg/s	95 kg/s	105 kg/s	80 kg/s
Débit à l'équilibre	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Taux d'évaporation surfacique	45 mg/m <sup>2</sup> /s	91 mg/m <sup>2</sup> /s	103 mg/m <sup>2</sup> /s	73 mg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	n.a	n.a	n.a	n.a
Distance SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	3300 m	550 m	650 m	850 m
Demi-largeur SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	800 m	180 m	180 m	150 m
Hauteur du nuage SER 10 min et + (130 ppm / AEGL-1)	10 m	20 m	15 m	20 m
Distance à la LII (1%)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Distance à la ½ LII	75 m	90 m	50 m	90 m
Demi-largeur à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Demi-largeur à la ½ LII	50 m	80 m	90 m	70 m
Hauteur max. à la LII	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Hauteur max. à la ½ LII	2 m	1 m	1 m	1 m

## 5.2.8 Benzène

Le benzène est transporté à température et pression ambiante.

Le scénario 12 envisage une collision induisant une brèche au-dessus de la ligne de flottaison. Le benzène se déverse alors quasi intégralement à la surface d'eau. Une très faible part s'évapore avant de toucher l'eau. Sur l'eau, le benzène forme une nappe évaporante. Une partie du benzène se dissout néanmoins.

Le scénario 13 correspond en revanche à une collision induisant une brèche sous la ligne de flottaison : le benzène s'échappe alors de la cuve sous l'eau. Les outils de simulation à notre disposition ne nous permettent pas de donner une estimation des zones d'effets induites pour le scénario 13. Notons toutefois que :

- Les débits de fuite seront peu différents de ceux estimés pour un rejet au-dessus de l'eau, compte tenu du fait que les densités du benzène et de l'eau sont assez proches ;
- une partie un peu plus importante de benzène que dans le scénario 12 sera dissoute lors de la phase de remontée du benzène à la surface – le benzène est en effet un peu moins dense que l'eau. Cette part dissoute sera déduite des émissions à l'atmosphère. Ainsi, les nappes de benzène formées à la surface seront un peu moins étendues : les distances seront donc un peu réduites par rapport aux distances affichées pour le scénario 12. Néanmoins, la solubilité du benzène dans l'eau de mer est faible – nettement plus faible que dans l'eau douce.

Scénario 12	BENZENE - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	14,6 kg/s	364 kg/s	14900 kg/s
Durée de rejet	> 42 h	> 1 h 40 min	~ 2 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires			

### 5.2.8.1 Scénario 12a - 20 cm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	F/2	B/4.5	D/10.2	D/5.6
Taux de rain-out	96%	96%	96%	96%
Rayon maximal de nappe	100 m	70 m	60 m	70 m
Rayon à l'équilibre	100 m	70 m	60 m	70 m

Débit d'évaporation max	14.4 kg/s	14.9 kg/s	14 kg/s	13 kg/s
Débit à l'équilibre	14.4 kg/s	14.4 kg/s	12.5 kg/s	12 kg/s
Taux d'évaporation surfacique	0.5 mg/m <sup>2</sup> /s	0.9 kg/m <sup>2</sup> /s	0.9 kg/m <sup>2</sup> /s	0.9 kg/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	1 à 2 h	~1 h	~1 h	1800 s
Distance SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	5000 m	1000 m	1200 m	1700 m
Demi-largeur SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	1500 m	150 m	80 m	130 m
Hauteur du nuage SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	15 m	35 m	25 m	30 m
Distance à la LII (1.2%)	340 m	180 m	120 m	160 m
Distance à la ½ LII	500 m	250 m	180 m	240 m
Demi-largeur à la LII	280 m	30 m	10 m	20 m
Demi-largeur à la ½ LII	400 m	40 m	15 m	30 m
Hauteur maximale à la LII	2 m	2 m	2 m	2 m
Hauteur maximale à la ½ LII	2 m	2 m	2 m	2 m

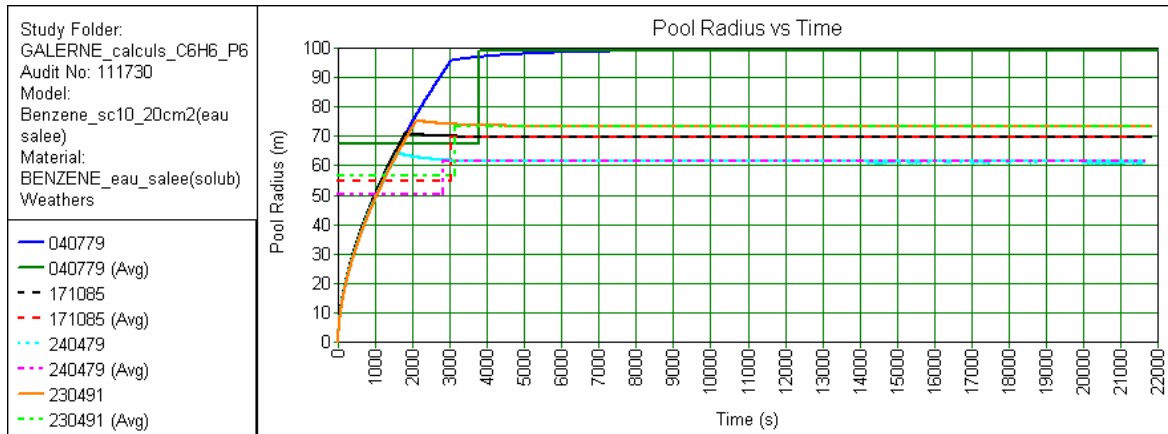


Figure 39. Évolution du rayon de la nappe en fonction du temps

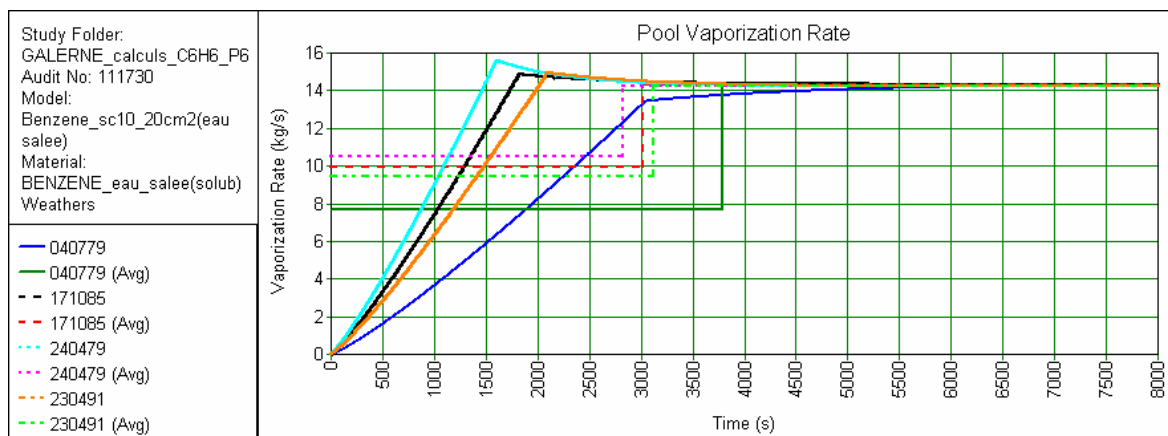


Figure 40. Évolution du taux d'évaporation en fonction du temps

### 5.2.8.2 Scénario 12b - 5 dm<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	> 99%	> 99%	> 99%	> 99%
Rayon maximal de nappe	450 m	420 m	390 m	420 m
Rayon à l'équilibre	-	-	-	-
Débit d'évaporation max	300 kg/s	500 kg/s	560 kg/s	450 kg/s
Débit à l'équilibre	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	0.5 g/m <sup>2</sup> /s	0.9 g/m <sup>2</sup> /s	1.2 g/m <sup>2</sup> /s	0.8 g/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	> 10 km (20)	7700 m	7800 m	9800 m
Demi-largeur SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	10 km	1500 m	1000 m	1100 m
Hauteur max. du nuage SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	25 m	120 m	100 m	100 m
Distance à la LII (1.2%)	1900 m	1200 m	150 m	370 m
Distance à la ½ LII	2600 m	1700 m	300 m	650 m
Demi-largeur à la LII	2300 m	300 m	600 m	600 m
Demi-largeur à la ½ LII	3200 m	400 m	630 m	660 m
Hauteur max. à la LII	2 m	2 m	2 m	2 m
Hauteur max. à la ½ LII	2 m	2 m	2 m	2 m



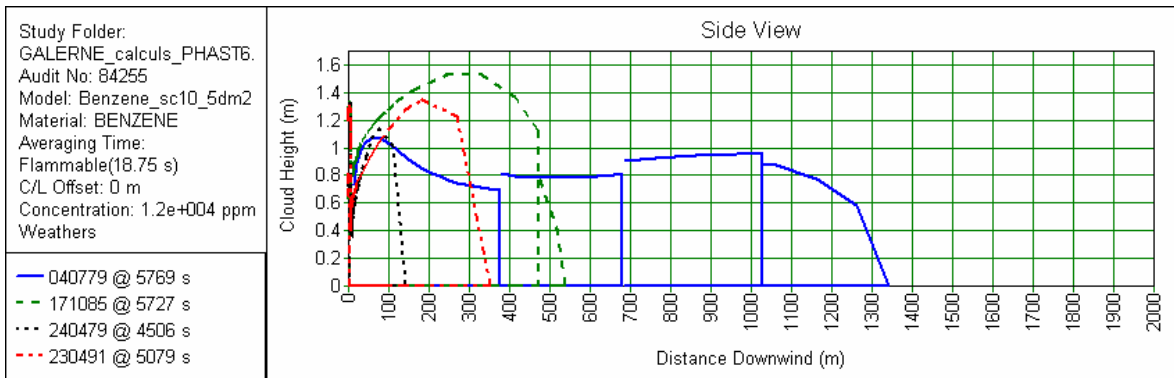


Figure 41. Vue latérale du nuage inflammable de benzène (pas encore maximal) pour une fuite au travers d'une brèche de 5 dm<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

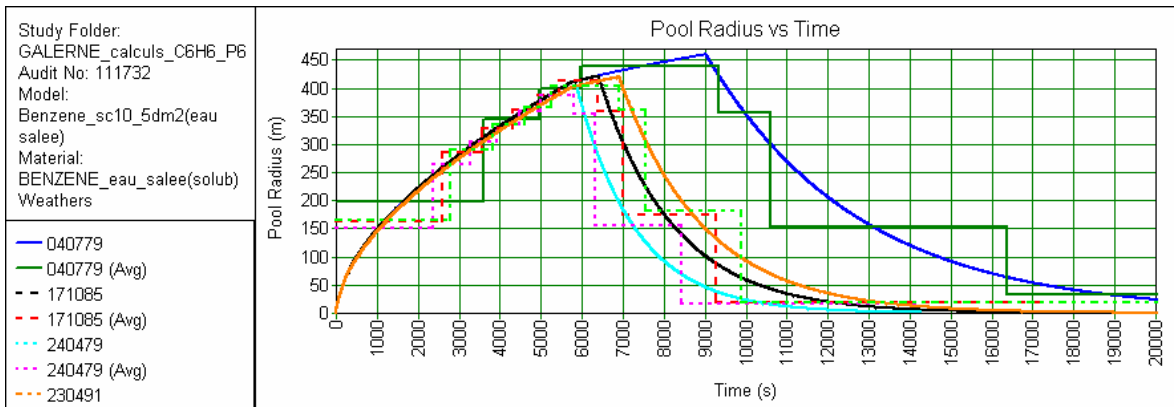


Figure 42. Évolution du rayon de la nappe en fonction du temps

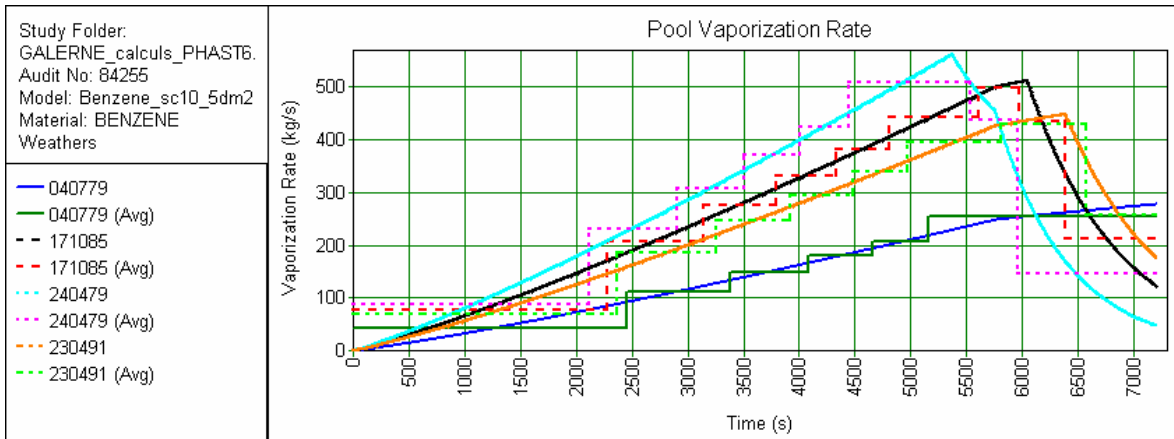


Figure 43. Évolution du taux d'évaporation en fonction du temps

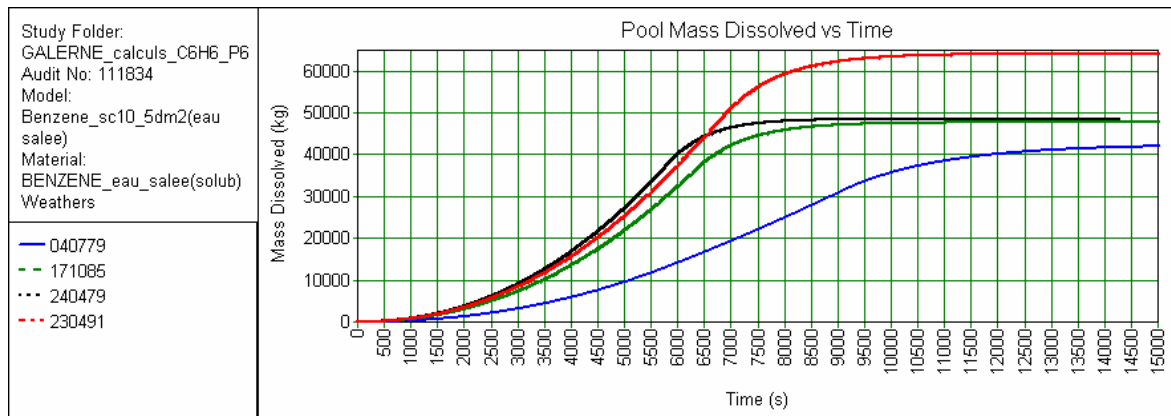


Figure 44. Évolution de la masse de benzène dissoute dans l'eau salée (brèche de 5 dm<sup>2</sup>)

### 5.2.8.3 Scénario 12c - 2 m<sup>2</sup>

Situation	04/07/1979	17/10/1985	24/04/1979	23/04/1991
	<b>F/2</b>	<b>B/4.5</b>	<b>D/10.2</b>	<b>D/5.6</b>
Taux de rain-out	100 %	100 %	100 %	100 %
Rayon maximal de nappe	450 m	400 m	380 m	400 m
Rayon à l'équilibre	-	-	-	-
Débit d'évaporation max	300 kg/s	470 kg/s	540 kg/s	410 kg/s
Débit à l'équilibre	-	-	-	-
Taux d'évaporation surfacique	0.46 g/m <sup>2</sup> /s	0.94 g/m <sup>2</sup> /s	1.2 g/m <sup>2</sup> /s	0.84 g/m <sup>2</sup> /s
Temps d'équilibre de la nappe liquide	-	-	-	-
Distance SER 60 min (50 ppm / ERPG)	> 10 km (21)	7000 m	9500 m	8500 m
Demi-largeur SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	10 km	1400 m	600 m	500 m
Hauteur du nuage SER 60 min (50 ppm / ERPG-1)	30 m	140 m	100 m	100 m
Distance à la LII (1.2%)	280 m	440 m	120 m	300 m
Distance à la ½ LII	1100 m	650 m	210 m	480 m
Demi-largeur à la LII	180 m	200 m	200 m	200 m
Hauteur max. à la LII	3 m	2 m	2 m	2 m
Hauteur max. à la ½ LII	4 m	2 m	2 m	2 m

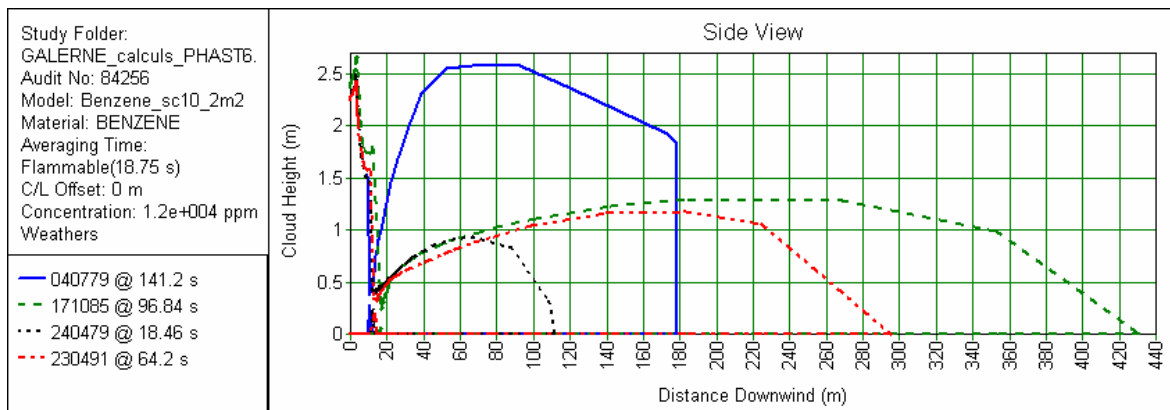


Figure 45. Vue latérale du nuage inflammable de benzène pour une fuite au travers d'une brèche de 2 m<sup>2</sup> dans les quatre situations atmosphériques retenues.

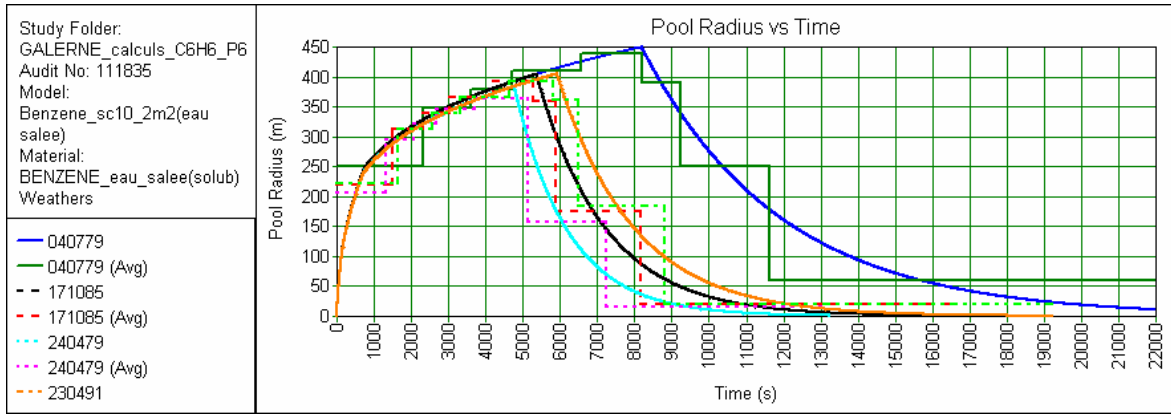


Figure 46. Évolution du rayon de la nappe de benzène en fonction du temps

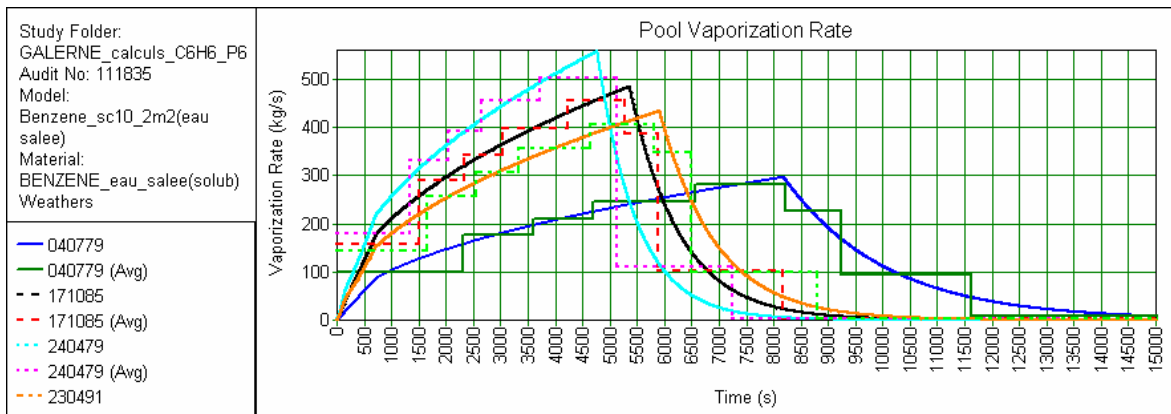


Figure 47. Évolution du taux d'évaporation de benzène en fonction du temps

## **6. CONCLUSION**

Ce rapport relate les travaux effectués dans le cadre de la tâche 2 du projet GALERNE pour ce qui concerne la simulation des phénomènes de formation et d'évaporation/vaporisation de nappes sur l'eau, et de dispersion atmosphérique au-dessus de l'eau de gaz liquéfiés ou liquides évaporants.

Des calculs ont été menés au moyen d'un outil de simulation générique<sup>11</sup> largement répandu (PHAST) et dont le niveau de validation est jugé suffisamment élevé pour être employé dans les études standard de sécurité (études de dangers, en particulier) dans le but d'estimer les effets de rejets accidentels de substances dangereuses dans l'atmosphère.

Les modèles mis en œuvre dans cet outil restent néanmoins relativement simples et se veulent génériques, permettant ainsi de traiter un grand nombre de situations accidentelles. Ainsi, les résultats de simulation obtenus sont évidemment entachés d'une incertitude, qui est difficile à quantifier (physique simplifiée, données d'entrées forfaitaires, paramètres empiriques, validation nécessairement partielle...). Les choix de modélisation (modèles et paramètres empiriques, etc.) dans un outil dédié à la sécurité sont toutefois effectués par les concepteurs dans un esprit de prudence, visant ainsi à donner le plus souvent des résultats « conservatoires », sans devenir irréalistes.

Des simulations d'épandage de Gaz Naturel Liquéfié menées avec un outil spécialisé développé par Gaz de France (EVOLCODE) a permis de confronter deux outils différents – mais dans le même niveau de complexité de modélisation – sur ces scénarios. Malgré des écarts significatifs sur les tailles de nappes et sur les distances d'effet calculées, il en ressort tout de même une assez bonne cohérence des résultats entre les outils, qui fournissent des distances d'effets dans des ordres de grandeurs finalement similaires.

Pour le scénario d'épandage de GNL le plus massif, des calculs complémentaires ont été menés avec un code de calcul plus élaboré (MERCURE), basé sur la résolution numérique des équations de mécanique des fluides et permettant de simuler la dispersion atmosphérique de gaz lourds ou passifs dans des environnements complexes. Les distances atteintes par le nuage inflammable simulé par l'outil MERCURE s'avèrent plus élevées que celles simulées par l'outil PHAST. Seule une analyse plus approfondie, qui n'a pas été possible dans le cadre de ce projet<sup>12</sup>, permettrait d'avancer des explications vérifiées à ces écarts.

Les résultats de simulation avancés dans ce rapport ont été exploités dans l'élaboration de fiches d'intervention pour les équipes de secours en mer, objets de la tâche 3 du projet GALERNE.

---

<sup>11</sup> « générique » est utilisé ici dans le sens où l'outil n'est pas dédié à une substance en particulier

<sup>12</sup> en raison notamment des temps de calcul importants requis par l'outil MERCURE



## **7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

ABSG Consulting Inc. (2004)

Consequence assessment methods for incidents involving releases from Liquid Natural Gas carriers

*Rapport FERC04C40196 établi pour la Federal Energy Regulatory Commission (FERC)*

ADMLC (Atmospheric Dispersion Modelling Liaison Committee) (2003)

Annual Report 1999/2000 including Review of Dispersion Over Bodies of Water and Best Practice for Binning Meteorological Data

*ADMLC Annual Report 1999/2000, 203 p.*

Antoine, F. (2008)

*Communication personnelle [Publication en préparation : Performance assessment of several correlations for liquid pool evaporation]*

Boe R. (1998)

Pool boiling of hydrocarbon mixtures on water

*International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, pp.1003–1011

Bouet, R. (1999)

Ammoniac - Essais de dispersion atmosphérique à grande échelle

Rapport INERIS référencé INERIS - DRA - RBo - 1999 – 20410

Boufadel M.C., R.D. Bechtel & J. Weaver (2006)

The movement of oil under non-breaking waves

*Marine Pollution Bulletin*, 52, pp.1056-1065

Brambilla S. & D. Manca (2009)

Accidents involving liquids: a step ahead in modeling pool spreading, evaporation and burning

*J. Haz. Mat.*, 161, pp.1265-1280

Brighton P.W.M. (1985)

Evaporation from a plane liquid surface into a turbulent boundary layer

*J. Fluid Mech.* 159, pp.323–345

Britter R.E. (2002)

Model Evaluation Report on UDM Version 6.0

Brutsaert, W. (1982)

Evaporation into the atmosphere: Theory, history, and applications.  
*Environmental fluid mechanics. Dordrecht, Holland: Reidel*

Carissimo B., S.F. Jagger, N.C. Daish, A. Halford, S. Selmer-Olsen, K. Riikonen, J.M. Perroux, J. Wurtz, J.G. Bartzis, N.J. Duijm, K. Ham, M. Schatzmann, D.-R. Hall (2001)

The SMEDIS database and validation exercise  
*Int. J. Environment and Pollution, 16, 1-6, pp.614 - 629*

Cedre (2006)

Etude du comportement de produits chimiques déversés en mer  
Rapport du Cedre R.06.63.C/3266, décembre 2006.

Charnock, H. (1955)

Wind stress on a water surface.  
*Q. J. Royal Meteorol. Soc. 81, pp.639-640*

Clancey V.J. (1974)

The evaporation and dispersion of flammable liquid spillages  
*Chemical Process Hazards Conference, Manchester*

Cormier B., Y. Wang & M. S. Mannan (2007)

Bulk temperature profile of LNG spill on unconfined water – Experiment results and analysis  
*AIChE Spring Meeting, Houston, Texas, 22-26 avril.*

Dodge F.T., J.T. Park, J.C. Buckingham & R.J. Magott (1983)

Revision and Experimental Verification of the Hazard Assessment Computer System Models for Spreading, Movement, Dissolution, and Dissipation of Insoluble Chemicals Spilled Onto Water.  
*US Coast Guard Report CG-D-35-83 Volume 1*

EUR 18195 (1998)

COST Action 710 - Final report. Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models.  
*Edited by B.E.A. Fisher, J.J. Erbrink, S. Finardi, P. Jeannet, S. Joffre, M.G. Morselli, U. Pechinger, P. Seibert and D.J. Thomson. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities*



Fay J.A. (2003)

Model of spills and fires from LNG and oil tankers

*J. Haz. Mat. B96, pp.171-188*

Feldbauer G. F., J. J. Heigl, W. McQueen, R. H. Whipp, and W. G. May (1972)

Spills of LNG on water. Vaporization and drift of combustible mixtures.

*Technical Report EE61E-72, Esso Research and Engineering, 1972.*

FERC (*Federal Energy Regulatory Commission*) (2004)

Notice of availability of staff's responses to comments on the consequence assessment methods for incidents involving releases from liquefied natural gas carriers

*Docket No. AD04-6-000, June 2004, 39 p.*

Gorlé C., J. van Beeck, P. Rambaud & G. Van Tendeloo (2009)

CFD modelling of small particle dispersion: The influence of the turbulence kinetic energy in the atmospheric boundary layer

*Atmospheric Environment, 43, Issue 3, pp. 673-681.*

Hanna S.R., Chang J.C., Strimaitis D.G. (1993)

Hazardous Gas Model Evaluation With Field Observations

*Atmospheric Environment, 27A, No.15, pp. 2265–2285.*

Hightower, M., Gritzo, L., Luketa-Hanlin, A., Covan, J., Tieszen, S., Wellman, G., Irwin, M., Kaneshige, M., Melof, B., Morrow, C., Ragland, D. (2004)

Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water

*Sandia National Laboratories. Sandia Report SAND2004-6258, 167 p.*

Kaiser G.D. (1989)

A review of models for predicting the dispersion of ammonia in the atmosphere

*Plant/Operations Progress, Vol. 8, n°1, pp.58-64*

Koopman R.P., J. Baker et al. (1982)

Burro Series Data Report - LLNL/NWC 1980 LNG Spills Tests.

*UCID-19075. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore.*

Koopman R.P., B.R. Bowman & D.L. Ermak (1979)

Data and calculations of dispersion on 5 m<sup>3</sup> LNG spill tests

*Lawrence Livermore National Lab. Report UCRL 52876*

- Koopman R.P. & D.L. Ermak (2007)  
Lessons learned from LNG safety research  
*J. Haz. Mat.*, 140, pp. 412-428
- Lines I. G., J. H. Daycock & D. M. Deaves (2001)  
Guidelines for the inclusion of low wind speed conditions into risk assessments  
*Journal of Hazardous Materials, Volume 83, Issue 3, pp.153-179*
- Luketa-Hanlin A. (2006)  
A review of large-scale LNG spills: Experiments and modeling  
*J. Haz. Mat. A132, pp.119–140*
- Mackay D. and R.S. Matsugu (1973)  
Evaporation Rates of Liquid Hydrocarbon Spills on Land and Water  
*Canadian Journal of Chemical Engineering vol.51*
- Melhem G.A., S. Saraf, H. Ozog (2006)  
LNG Properties and Hazards – Understand LNG Rapid Phase Transitions (RPT)  
*White Paper, IoMosaic Corporation*
- Pitblado R., J. Baik, V. Raghunathan (2006)  
LNG decision making approaches compared  
*J. Haz. Mat. 130, pp. 148–154.*
- Riou Y. (1987)  
Comparison between MERCURE-GL code calculations, wind tunnel measurements and Thorney Island Field Trials  
*J. Haz. Mat. 16, pp. 847-865*
- Saraf S.R. & G. A. Melhem (2005)  
Modelling LNG pool spreading and vaporization  
*AIChE Spring Meeting, Atlanta, 10-14 avril.*
- Sciencé C.T., C.P. Colver and C.M. Sliepcevich (1967)  
Film boiling measurements and correlation for liquefied hydrocarbon gases  
*Chemical Engineering Progress Symposium Series 63, pp. 115–119*
- Sutton (1934)  
Wind structure and Evaporation in a Turbulent Atmosphere

- Proc.Roy.Soc., 1934*
- UIC (*Union des Industries Chimiques*) (1987)  
Cahier de sécurité n°11
- Van Den Bosch C.J.H (1997)  
Pool evaporation  
*Methods for the calculation of physical effects, Chapter 3, third edition (Yellow Book)*
- Verfondern K. & B. Dienhart (2007)  
Pool spreading and vaporization of liquid hydrogen  
*Int. J. Hydrogen Energy, 32, pp.2106-2117*
- Vesovic V. (2007)  
The influence of ice formation on vaporization of LNG on water surfaces  
*Journal of Hazardous Materials, Volume 140, Issue 3, pp. 518-526*
- Waite P. J., R. J. Whitehouse, E. B. Winn, W. A. Wakeham (1983)  
The spread and vaporisation of cryogenic liquids on water  
*Journal of Hazardous Materials, Volume 8, Issue 2, pp.165-184*
- Webber D.M. (1990)  
A Model for Pool Spreading and Vaporization and its Implementation in the Computer Code G\*A\*S\*P  
*AEA Technology, SRD/HSE/R507*
- Webber D.M. (2005)  
Model for Pool Spreading, Evaporation and Solution on Land and Water (PVAP) – Verification Manual  
*PHAST 6.0 Manual, 2005*
- Witlox H.W.M (2005)  
Unified Dispersion Model - Technical Reference Manual  
*Det Norske Veritas, London (1999, révisé 2005)*
- Witlox H.W.M (2006)  
PVAP Theory document  
*Det Norske Veritas, London (2003, révisé 2006)*
- Zilitinkevich S. S., P.-E. Johansson, D. V. Mironov & A. Baklanov (1998)

A similarity-theory model for wind profile and resistance law in stably stratified planetary boundary layers

*J. Wind Eng. Indust. Aerodyn.*, 74-76, pp. 209-218

## **8. LISTE DES ANNEXES**

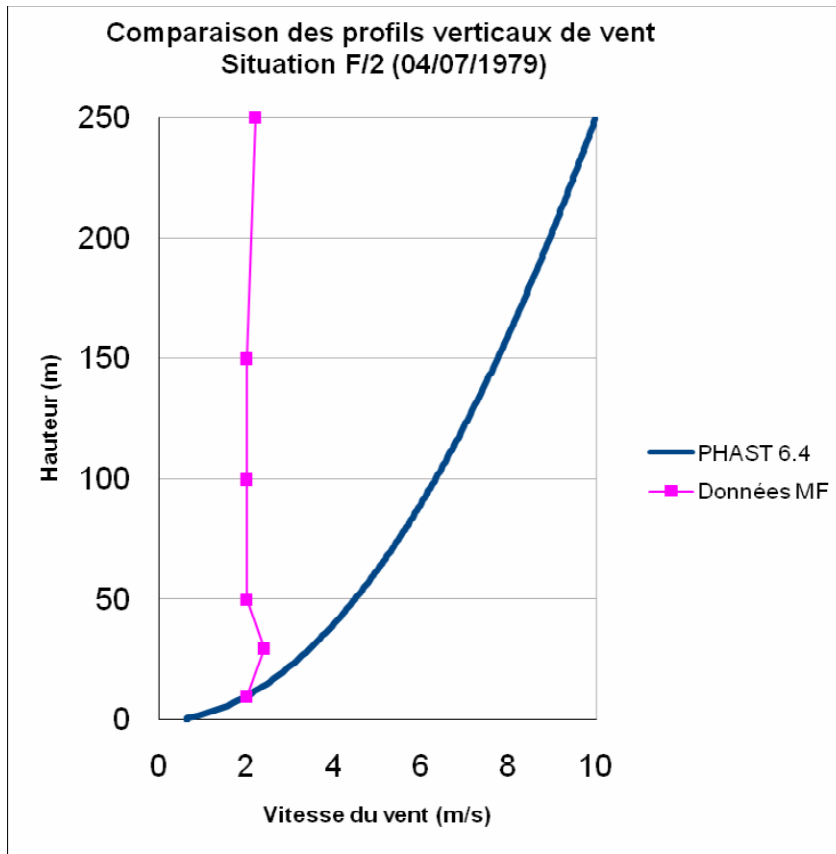
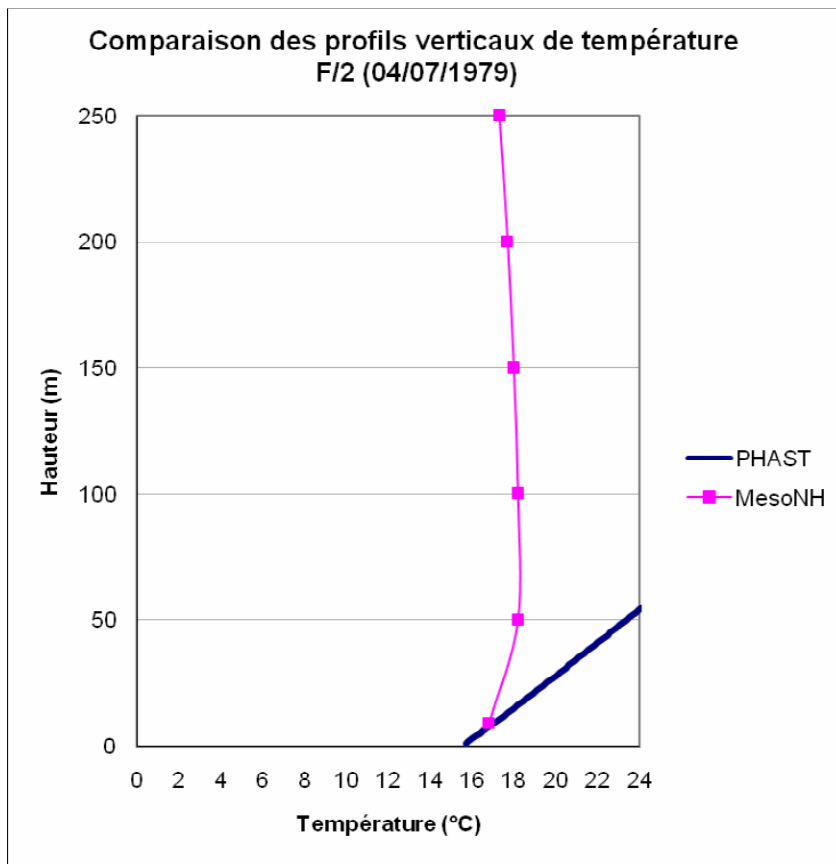
<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
Annexe 1	Comparaison des profils verticaux de vent et de température obtenus avec PHAST et MESO-NH	4



# Annexe 1

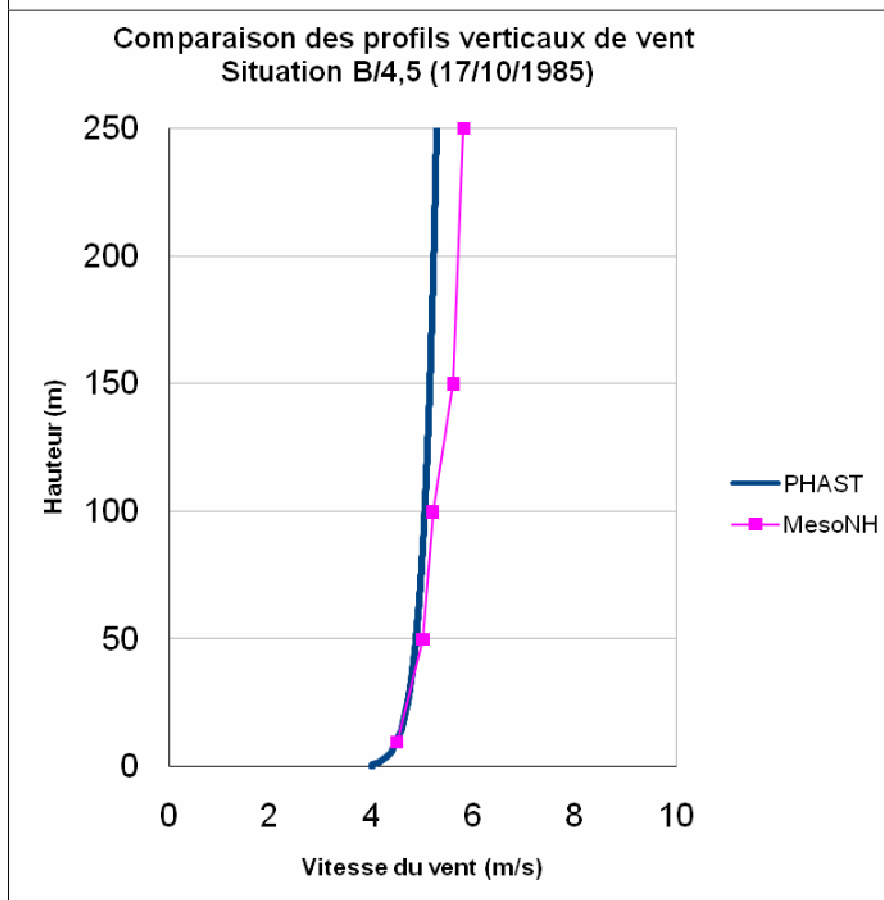
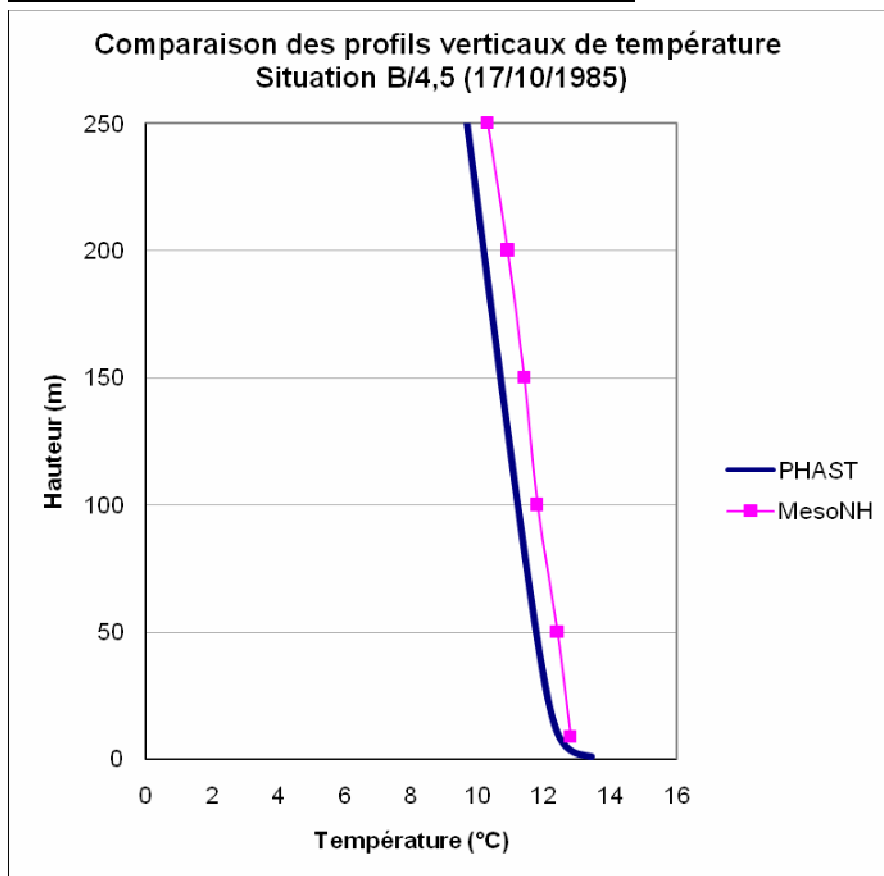
Comparaison des profils verticaux de vent et de température  
obtenus avec PHAST et MESO-NH

### Situation météorologique F/2 (04/07/79)

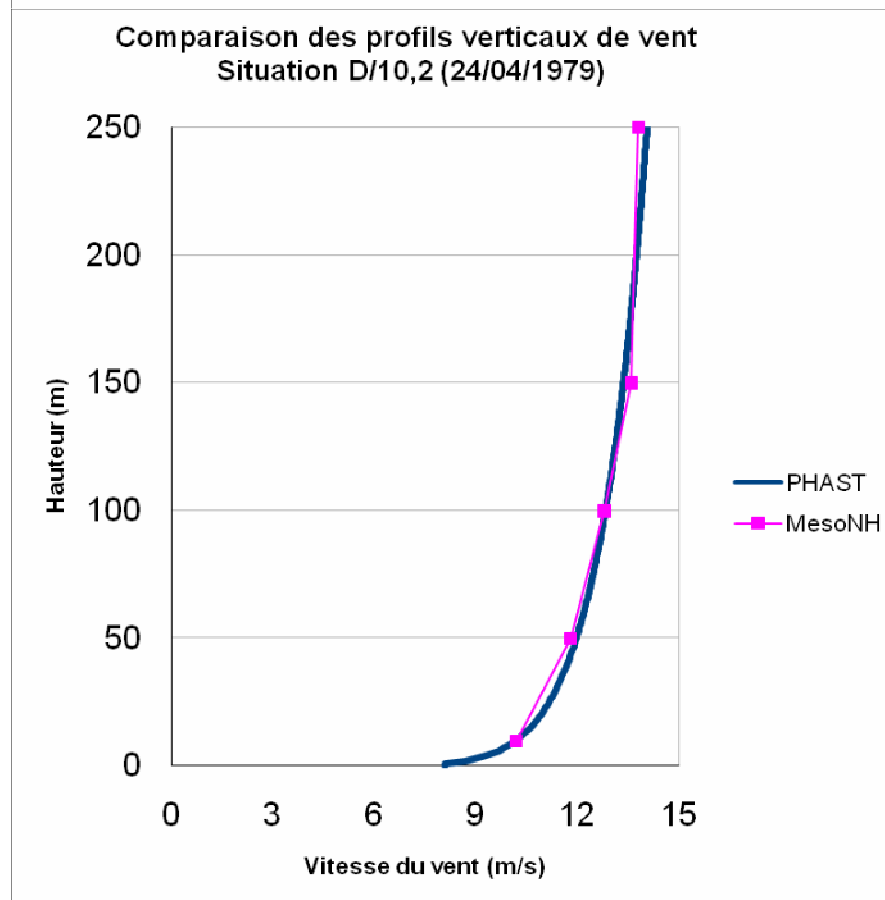
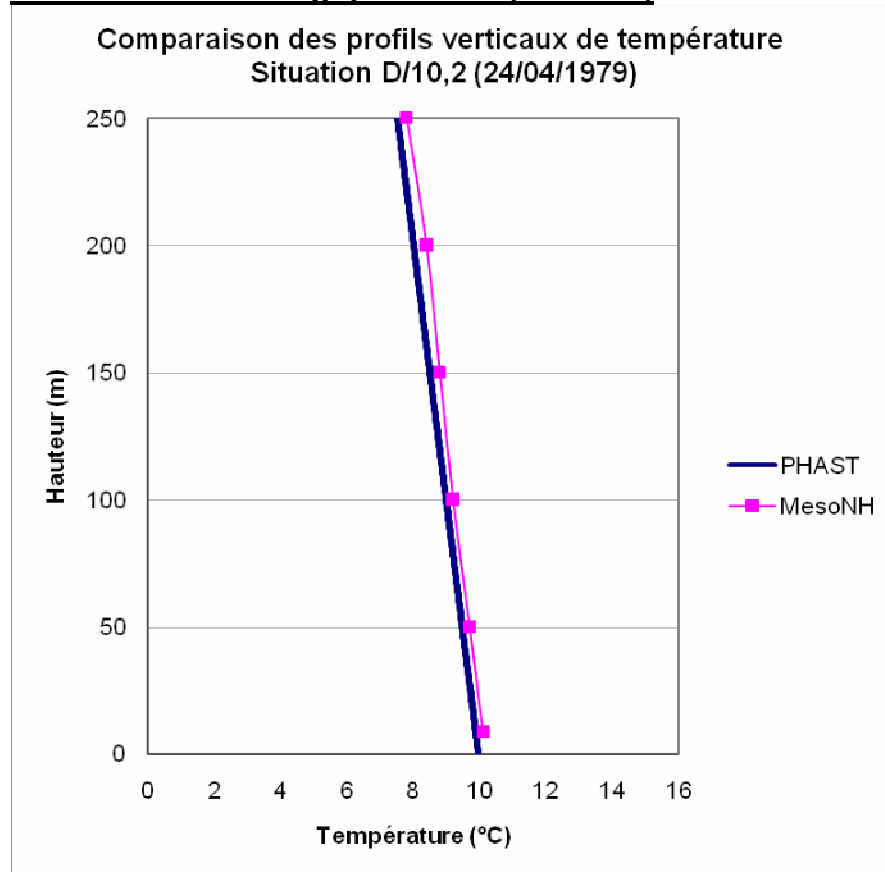




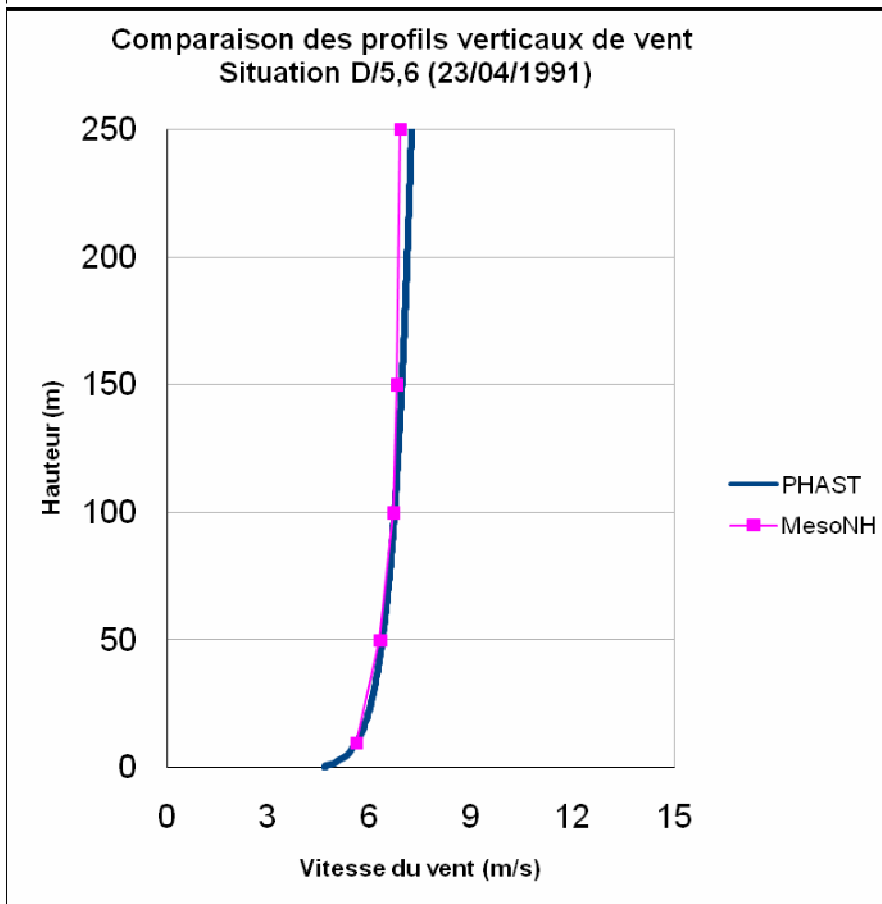
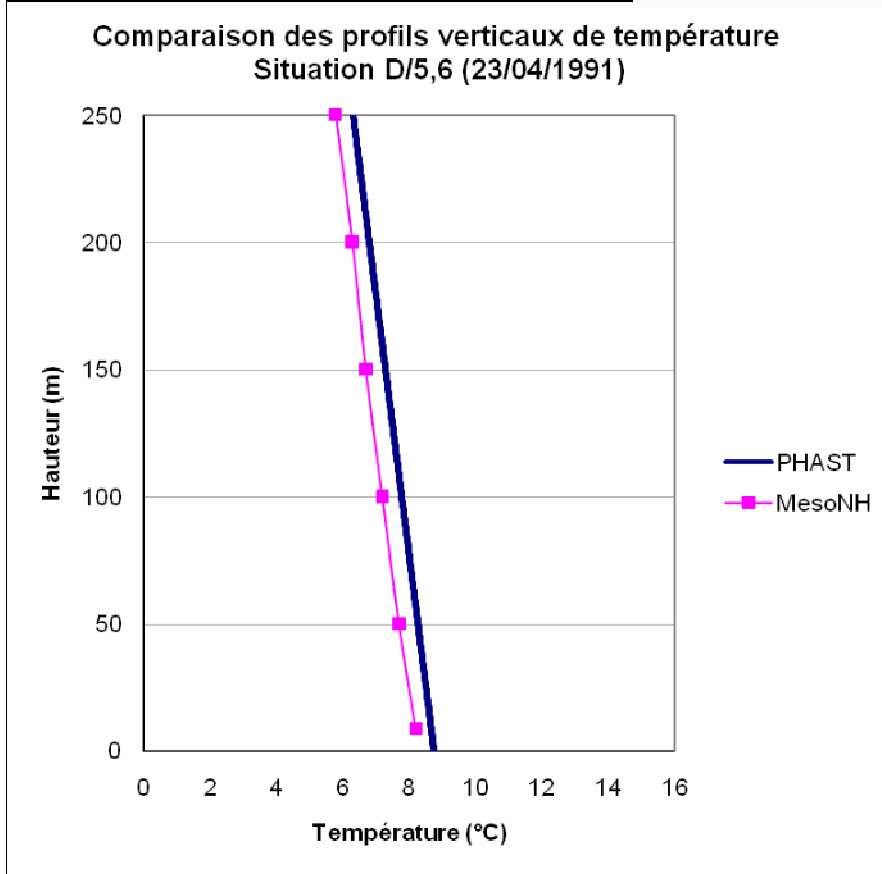
### Situation météorologique B/4,5 (17/10/85)



**Situation météorologique D/10.2 (24/04/79)**



**Situation météorologique D/5,6 (23/04/91)**



# CHAPITRE 2-A

RAPPORT D'ÉTUDE

15/05/2008

**GALERNE – Tâche 2**

**Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer**

**Termes sources pour la dispersion en champ lointain avec les modèles de Météo-France (MOTHY/PERLE)**

## **GALERNE – Tâche 2**

**Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer**

**Termes sources pour la dispersion en champ lointain avec les modèles de Météo-France (MOTHY/PERLE)**

Verneuil-en-Halatte (Oise)

Client : ANR/PRECODD, MEEDDAT

Liste des personnes ayant participé à l'étude : F. Antoine, T. Pénélon

## PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	T. Pénelon	R. Bouet	B. Debray
<b>Qualité</b>	Ingénieur Unité Explosion-Dispersion Direction des Risques Accidentels	Responsable de l'Unité Explosion-Dispersion Direction des Risques Accidentels	Délégué scientifique Direction des Risques Accidentels
<b>Visa</b>			

## TABLE DES MATIÈRES

<b>1. ACRONYMES .....</b>	<b>5</b>
<b>2. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>3. SCÉNARIOS ET TERMES SOURCES .....</b>	<b>6</b>
3.1 Scénarios GNL.....	6
3.2 Scénarios Gaz Liquéfiés .....	8
3.2.1 Scénarios Liquides Evaporants .....	22
3.3 Outils de calcul.....	60
<b>4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>61</b>
4.1.1 Liste des annexes .....	62



## **1. ACRONYMES**

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

GPL :Gaz de Pétrole Liquéfié

GL : Gaz Liquéfié

LSMS : Liquid Spill Modelling System

PHAST : Process Hazard Analysis Software Tool

## **2. INTRODUCTION**

Ce rapport présente les scénarios retenus pour de la dispersion atmosphérique en champ lointain, avec dérive de nappe ou nuage émis directement à l'atmosphère.

Les substances retenues pour cette sous-tâche sont :

- GNL,
- Ammoniac,
- Xylènes,
- Benzène.

Les calculs de dispersion atmosphériques présentés dans ce rapport ont été effectués au moyen du logiciel PHAST, version 6.4. Ce logiciel permet de simuler la dispersion de gaz, liquides et gaz liquéfiés dans le champ proche (inférieur à 10 km), en l'absence d'obstacles importants et de relief, et avec des conditions météorologiques constantes dans le temps et l'espace au cours de la dispersion.

Les profils verticaux de vent et de température de PHAST ont été comparés aux profils fournis par Météo-France, simulés par le code MesoNH pour des situations réelles présentées dans le tableau ci-dessous.

Les profils simulés par PHAST sont pour la plupart assez proches des profils simulés par Meso-NH (premier point à 10 m au-dessus de la surface), sauf pour la situation de forte stabilité atmosphérique du 04/07/1979, pour lequel les profils simulés par PHAST s'écartent fortement des profils MesoNH dès que l'on monte en altitude. Cela est dû aux paramétrisations employées dans PHAST pour les cas stables, qui sont peu pertinentes au-dessus de 200 m d'altitude. En particulier, le profil de vitesse simulé par MesoNH montre un jet de basse couche que les formulations employées dans PHAST ne permettent pas de traduire.

Date et heure	04/07/1979	18/10/1980	17/10/1985	24/04/1979	16/04/1984	13/04/1991
	15 UTC	09 UTC	21 UTC	21 UTC	21 UTC	03 UTC
Force du vent (m/s)	2	9.8	4.5	10.2	6.6	5.6
Delta theta (temp. potentielle virtuelle - temp. mer)	1.5	-5.3	-3.2	0.7	-1.8	-2.3
Classe de pasquill	F	C	B	D	C	D
Température ambiante 2m (K)	288.95	282.79	286.2	283.1	282.3	281.90
Température de surface de la mer (K)	288.1	287.5	288.4	282.9	282.6	282.63
Rayonnement en surface (kW/m <sup>2</sup> )	0.57	0.17	-0.02	-0.1	-0.13	-0.12
Rugosité z0 (m)	2.00E-06	2.10E-04	3.30E-05	2.20E-04	8.00E-05	5.40E-05
Humidité relative 2m (%)	100	91	100	83	80	91
Pression atmosphérique surface (hPa)	1029	1010	1027	1006	1028	1024

### **3. SCENARIOS ET TERMES SOURCES**

#### **3.1 Scénarios GNL (réfrigéré en dessous de -160°C)**

Trois ordres de grandeur de tailles de brèches ont été identifiés lors de la tâche 1.5 du projet :

- de l'ordre de quelques cm<sup>2</sup>,
- de l'ordre de quelques dm<sup>2</sup>,
- enfin, de l'ordre de quelques m<sup>2</sup>.

Ainsi, les diamètres de brèche suivants ont été considérés dans l'étude présente :

- 5 cm, soit 20 cm<sup>2</sup> de section,
- 25 cm, soit 5 dm<sup>2</sup> de section,
- 1,6 m, soit 2 m<sup>2</sup> de section environ.

Pour un rejet au-dessus de la ligne de flottaison, on considère que la hauteur de liquide au-dessus de la brèche est de 16 m au début du rejet, le réservoir étant immergé de 7 m de hauteur environ.

Les scénarios sont simulés en assimilant le GNL à du méthane pur.

Scénarios 1/3	Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	1. « cm <sup>2</sup> »	3. « dm <sup>2</sup> »	3bis. « m <sup>2</sup> »
Quantité	40000 m <sup>3</sup> / 18000 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	16 m	16 m	16 m
Débit estimé	8.8 kg/s		
Durée de rejet	> 20 jours		
Conséquences et risques	Nappe bouillonnante Feu de nappe Feu flash/VCE Brûlures froides	Idem 1. + Transition rapide de phase (TRP) Fragilisation des structures	Idem 3.
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

### Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Rejet continu de durée supérieure à 20 jours !

Aucune flaque ne se forme à la surface de l'eau, car l'ammoniac pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

La dispersion devient passive à partir de 780 m de la brèche.

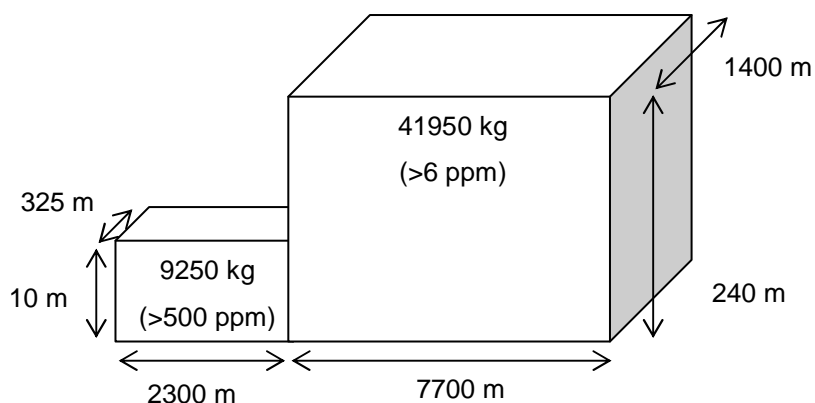
Après 1570 s de rejet, le nuage atteint 10000 m. Au-delà de cette distance, les résultats du logiciel PHAST ne sont plus à considérer comme valides en principe.

La masse rejetée après 1570 s est de 53537 kg. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 6 ppm est de 51200 kg, soit 95% de la masse rejetée.

Le terme source du système MOTHY/PERLE est soit une nappe avec un taux surfacique d'évaporation, soit un ou plusieurs parallélépipède(s) d'un volume donné contenant une quantité de produit donnée. La brèche est située sur la face gauche du parallélépipède le plus à gauche.

En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

#### Cas 1 : deux blocs



## 3.2 Scénarios Gaz Liquéfiés (ammoniac, propane)

### 3.2.1 Ammoniac

Les mêmes tailles de brèches que pour le GNL ont été retenues pour les scénarios impliquant l'ammoniac.

Scénario 6	AMMONIAC - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3600 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	34.1 kg/s	856 kg/s	35000 kg/s
Durée de rejet	29 h	1 h 10 min	103 s
Conséquences et risques	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides	Nuage toxique Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Très soluble dans l'eau Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau	Très soluble dans l'eau	Très soluble dans l'eau

#### Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Rejet continu de durée supérieure à 24h.

Aucune flaque ne se forme à la surface de l'eau, car l'ammoniac pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

La dispersion devient passive à partir de 780 m de la brèche.

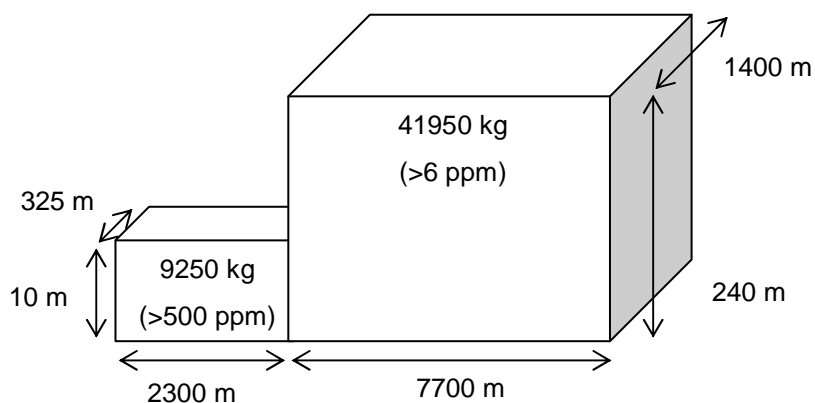
Après 1570 s de rejet, le nuage atteint 10000 m. Au-delà de cette distance, les résultats du logiciel PHAST ne sont plus à considérer comme valides en principe.

La masse rejetée après 1570 s est de 53537 kg. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 6 ppm est de 51200 kg, soit 95% de la masse rejetée.

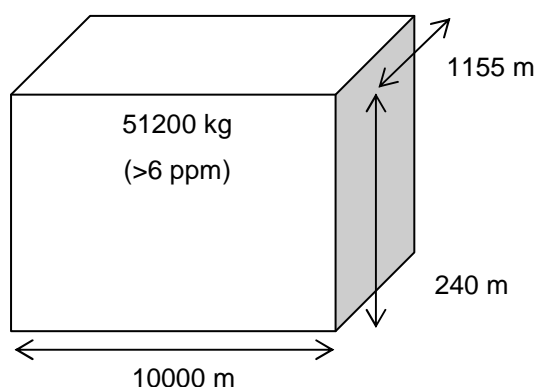
Le terme source du système MOTHY/PERLE est soit une nappe avec un taux surfacique d'évaporation, soit un ou plusieurs parallépipède(s) d'un volume donné contenant une quantité de produit donnée. La brèche est située sur la face gauche du parallépipède le plus à gauche.

En l'occurrence, nous proposons les parallépipèdes suivants :

### Cas 1 : deux blocs



### Cas 2: un seul bloc



Le rejet étant continu, on peut considérer qu'au bout de 29 h, ce même nuage représenté par le parallélépipède est toujours établi à proximité de la brèche.

On peut considérer que ce nuage peut dériver dès que la fuite à la brèche s'arrête.

Les deux configurations de terme source proposées visent à étudier la sensibilité des résultats au choix des "boîtes élémentaires".

### **Scénario b - 5 dm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991**

Rejet continu de durée 1 h10 (4205 s).

Une petite flaque de 6 de diamètre maximal se forme à la surface de l'eau, mais son évaporation est négligeable devant l'émission directe à la brèche ( $\ll 1$  kg/s) car l'ammoniac pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

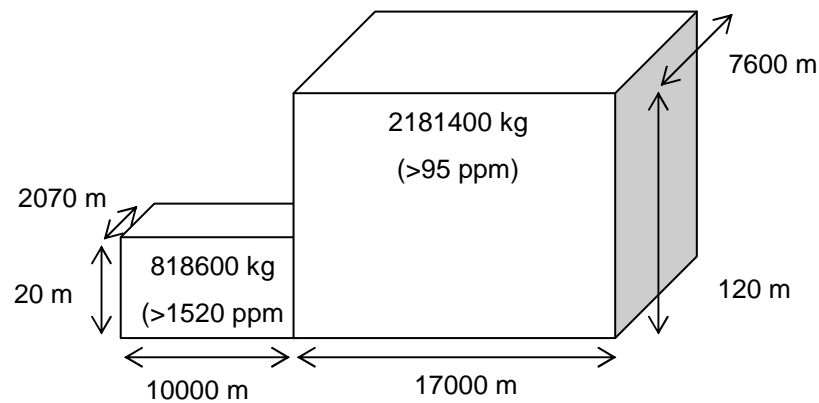
La dispersion devient passive à partir de 8400 m de la brèche.

Après 4205 s de rejet, le nuage atteint 27000 m. Même si au-delà de 10 km, les résultats du logiciel PHAST ne sont plus à considérer comme valides en principe, les parallélépipèdes ont été calculés à partir du nuage à  $t=4205$  s, quand toute la masse contenue dans le réservoir a été rejetée.

La masse rejetée après 4205 s est de 3600 t. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 95 ppm est de 3000 t environ, soit 83% de la masse rejetée. La concentration de 95 ppm est choisie c'est la concentration sur l'axe du nuage à 50 km, qui est la distance maximale à laquelle le logiciel peut calculer les concentrations.

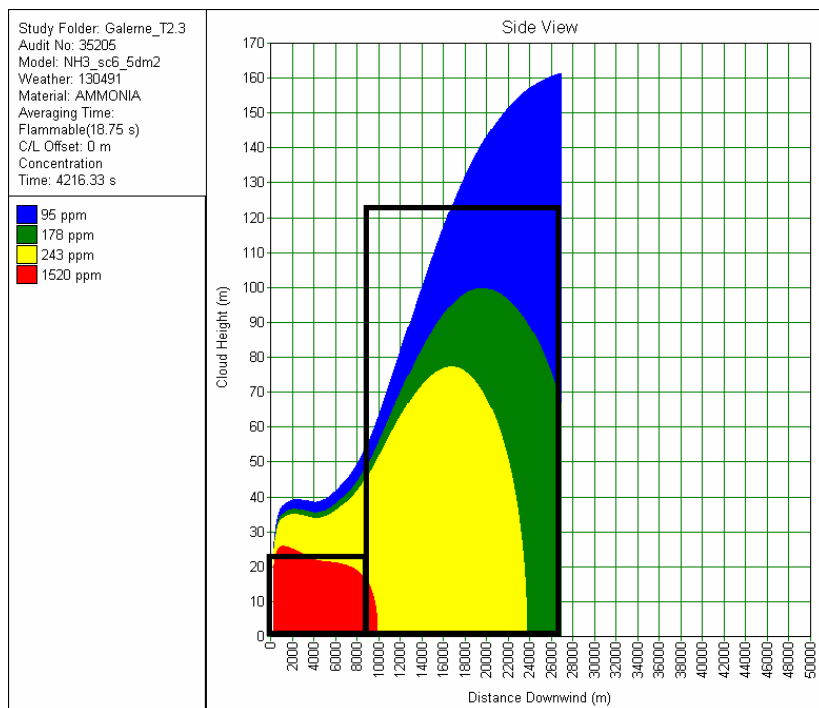
En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

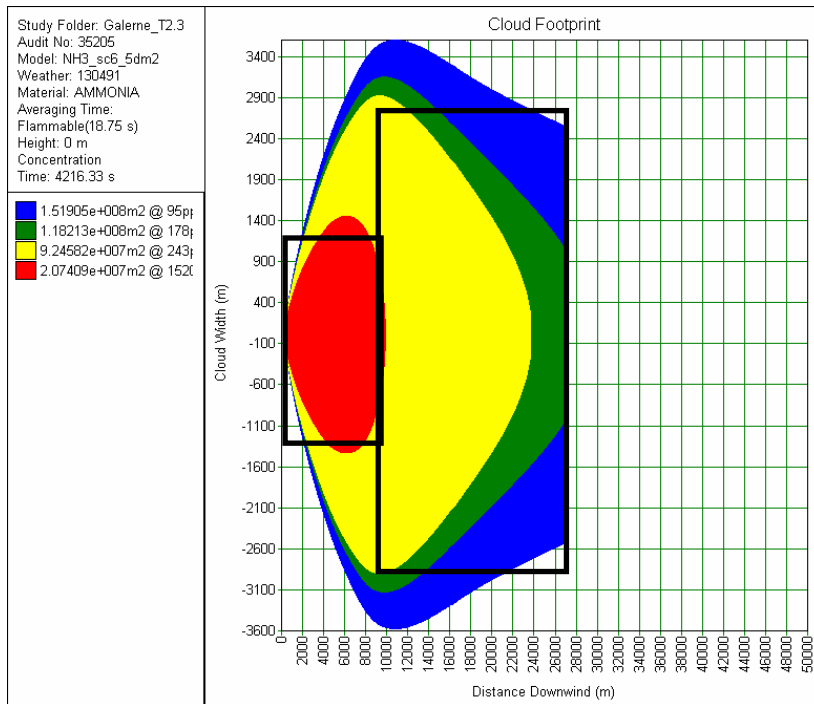
Cas unique : deux blocs



Images en coupe du nuage :

Coupe verticale sur l'axe du panache et coupe horizontale au niveau du sol (les rectangles noirs représentent les parallélépipèdes).





**Scénario c - 2 m<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991**

Rejet court de durée 103 s.

Une flaque de 110 m de diamètre maximal se forme à la surface de l'eau, mais elle s'évapore en un peu plus de 2 minutes. La formation de la flaque est donc négligée devant la bouffée émise directement, et la masse de liquide au sol (11% du total rejeté) est réintroduite dans la bouffée.

La dispersion devient passive à partir de 18960 m de la brèche.

Après 103 s de rejet, le nuage atteint 3700 m (5 ppm).

La masse rejetée après 103 s est de 3600 t. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 5 ppm est de 3600 t, soit 100% de la masse rejetée. À t=152 s (premier instant après 103 s auquel le champ de concentration est accessible dans le logiciel), la masse impliquée est toujours très proche de 3600 t.

En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

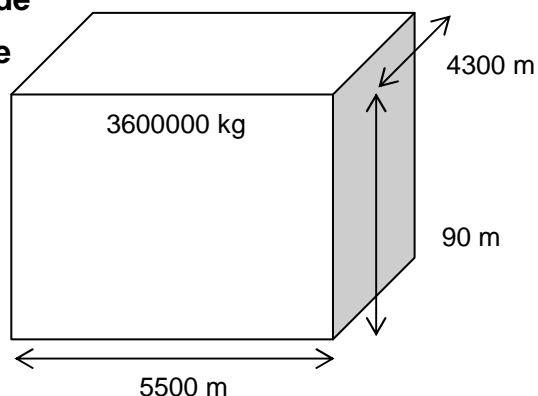
**Cas 1 : un bloc à t=152 s**

**Face gauche du parallélépipède**

**à 500 m en amont de la brèche**

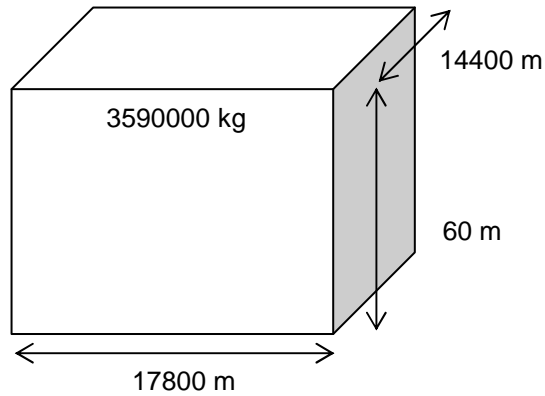
(centre du parallélépipède

à 2250 m de la brèche)



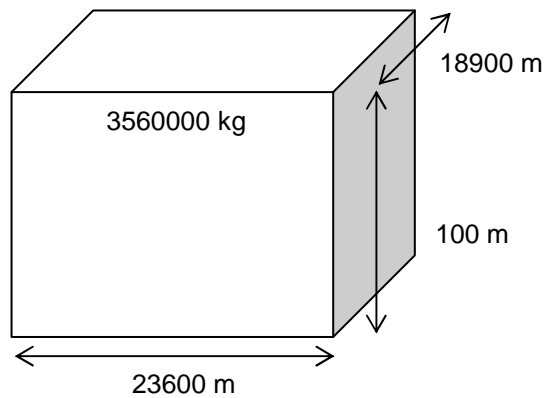
Cas 2 : un bloc à t=1294 s

**Face gauche du parallélép.**  
**à 1200 m en aval de la brèche**  
(centre du parallélépipède  
à 10100 m de la brèche)



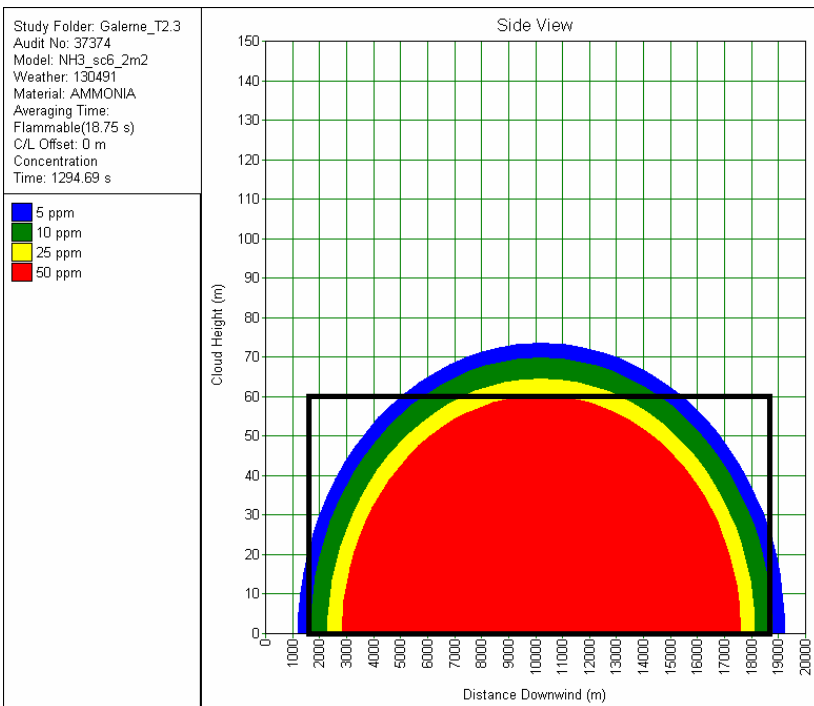
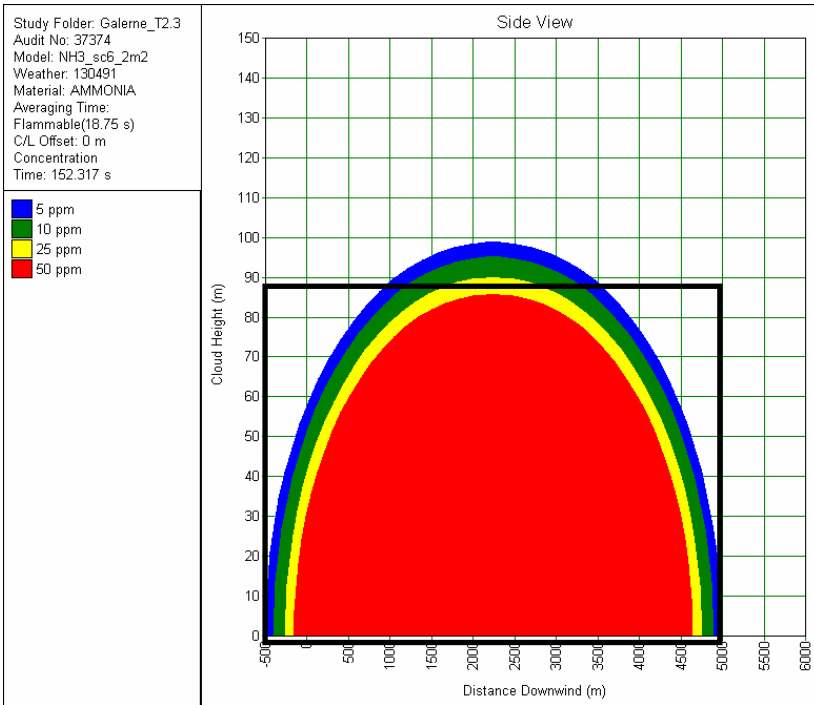
Cas 3 : un bloc à t=2740 s

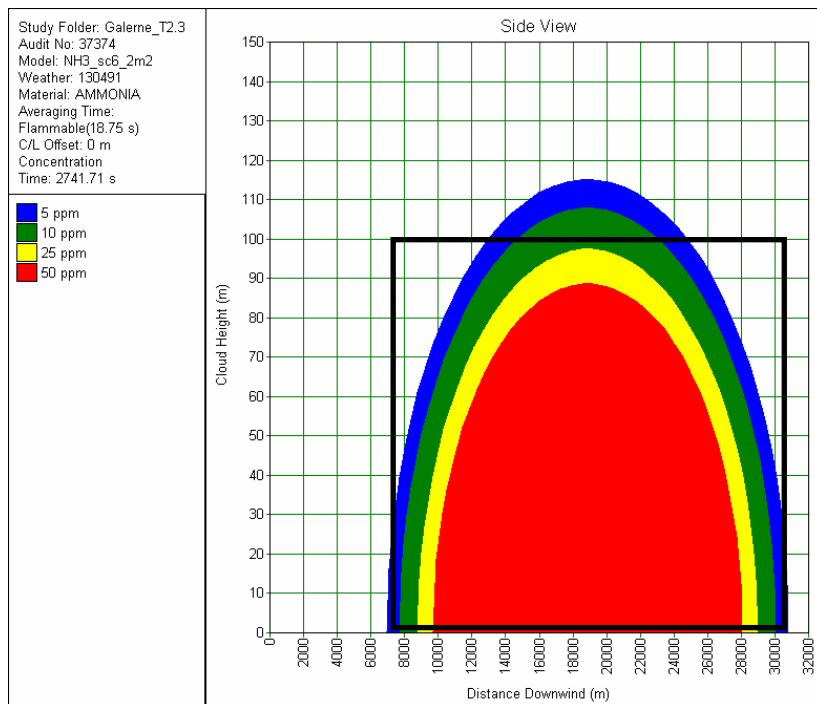
**Face gauche du parallélép.**  
**à 7000 m en aval de la brèche**  
(centre du parallélépipède  
à 18800 m de la brèche)



Images en coupe du nuage à t=152s, 1294s et 2741s:







### 3.2.2 Propane

Les mêmes tailles de brèches que pour le GNL ont été retenues pour les scénarios impliquant l'ammoniac.

Scénario 8	PROPANE - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 3000 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	31 kg/s	774 kg/s	31717 kg/s
Durée de rejet	27 h	1 h 05 min	95 s
Conséquences et risques	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides	Jet enflammé Feu flash/VCE Brûlures froides
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

#### Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Rejet continu de durée supérieure à 24h.

Aucune flaque ne se forme à la surface de l'eau, car le propane pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

La dispersion devient passive à partir de 750 m de la brèche.

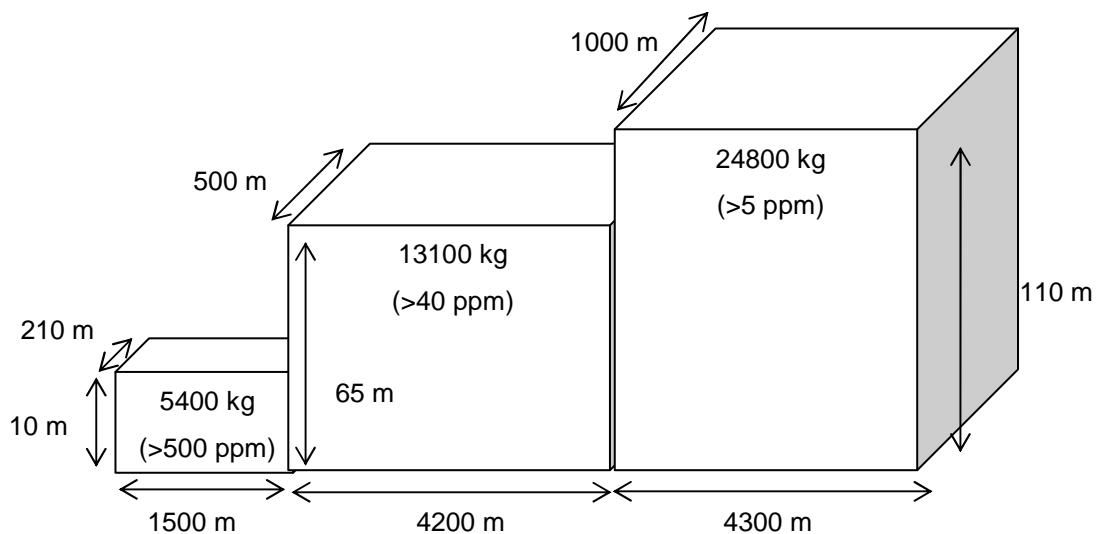
Après 1570 s de rejet, le nuage atteint 10000 m. Au-delà de cette distance, les résultats du logiciel PHAST ne sont plus à considérer comme valides en principe.

La masse rejetée après 1570 s est de 48600 kg. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 5 ppm est de 43300 kg, soit 89% de la masse rejetée.

Le terme source du système MOTHY/PERLE est représenté par un ou plusieurs parallélépipède(s) d'un volume donné contenant une quantité de produit donnée. La brèche est située sur la face gauche du parallélépipède le plus à gauche.

En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

Cas 1 : trois blocs



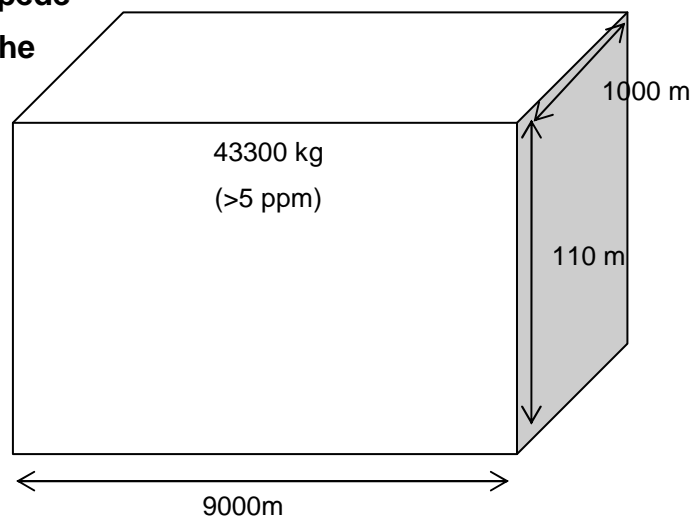
Cas 2: un seul bloc:

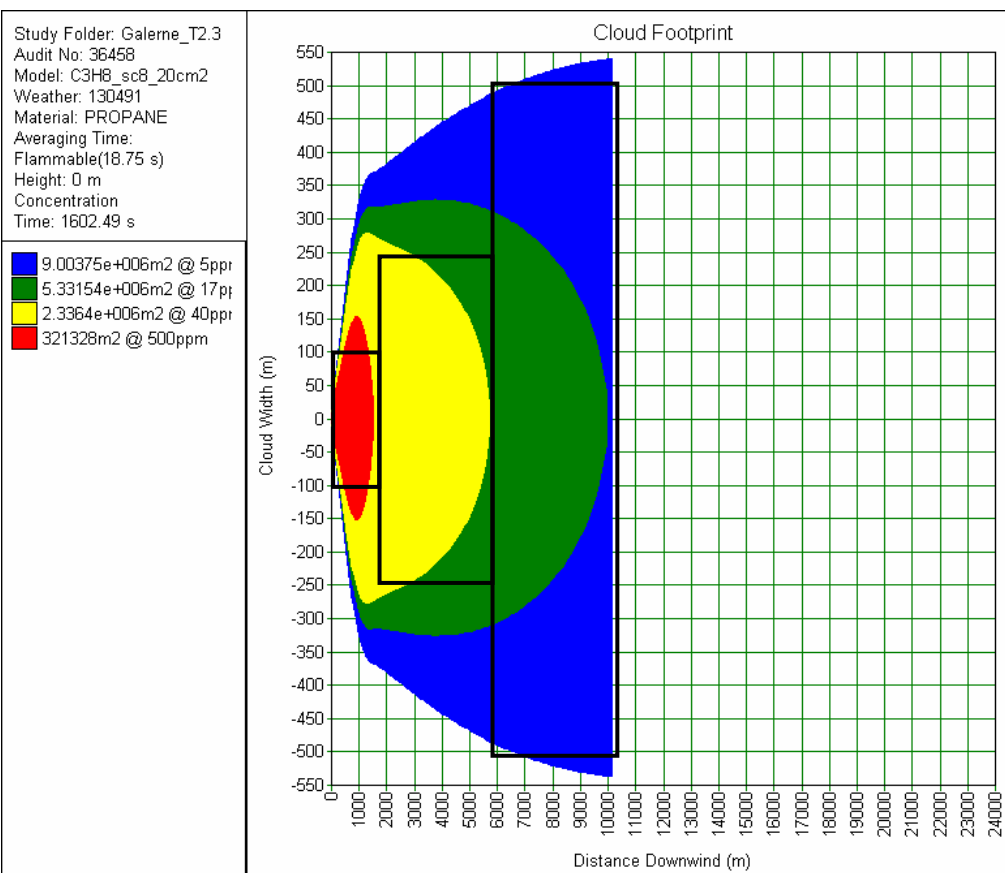
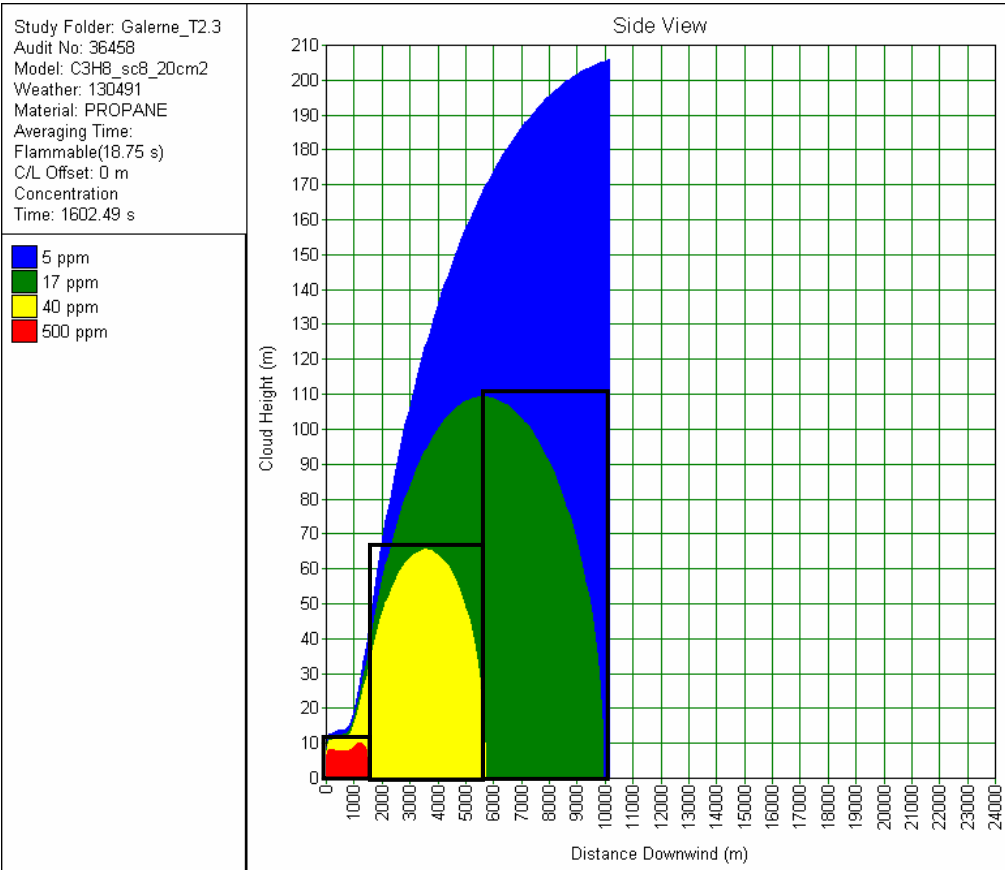
**Face gauche du parallélépipède**

**à 1000 m en aval de la brèche**

(centre du parallélépipède

à 5500 m de la brèche)





### Scénario b - 5 dm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Rejet continu de durée 1h05 (3874 s).

Aucune flaque ne se forme à la surface de l'eau, car le propane pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

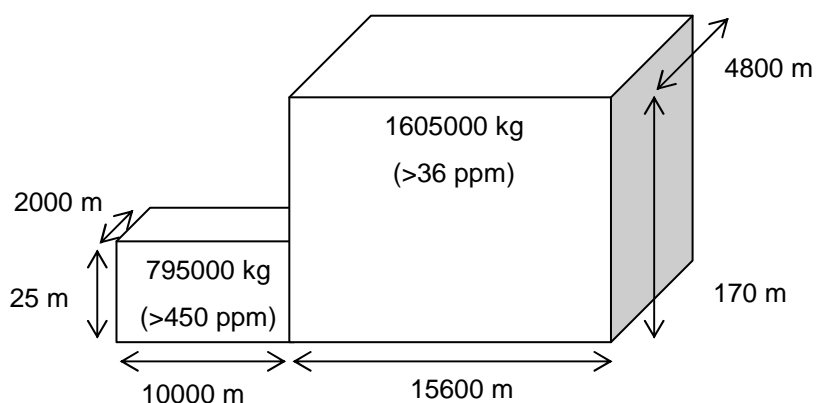
La dispersion devient passive à partir de 6100 m de la brèche.

Après 3900 s de rejet, le nuage atteint 25600 m. Même si au-delà de 10 km, les résultats du logiciel PHAST ne sont plus à considérer comme valides en principe, les parallélépipèdes ont été calculés à partir du nuage à  $t=3900$  s, quand toute la masse contenue dans le réservoir a été rejetée.

La masse rejetée après 3900 s est de 3000 t. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 36 ppm est de 2400 t environ, soit 80% de la masse rejetée. La concentration de 36 ppm est choisie c'est la concentration sur l'axe du nuage à 50 km, qui est la distance maximale à laquelle le logiciel peut calculer les concentrations.

En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

#### Cas unique : deux blocs

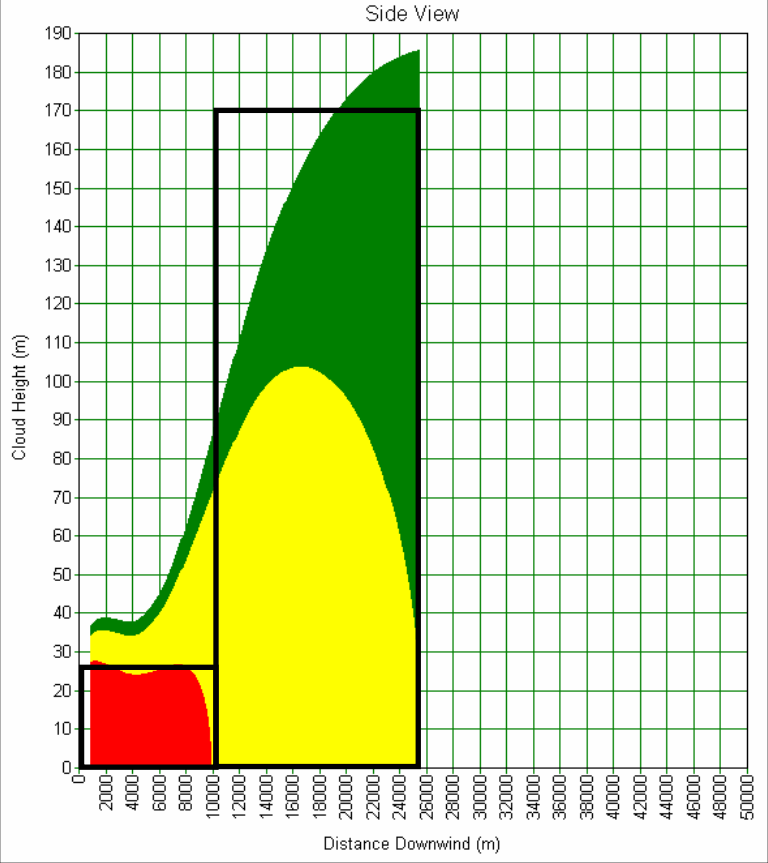


#### Images en coupe du nuage :

Coupe verticale sur l'axe du panache et coupe horizontale au niveau du sol (les rectangles noirs représentent les parallélépipèdes).

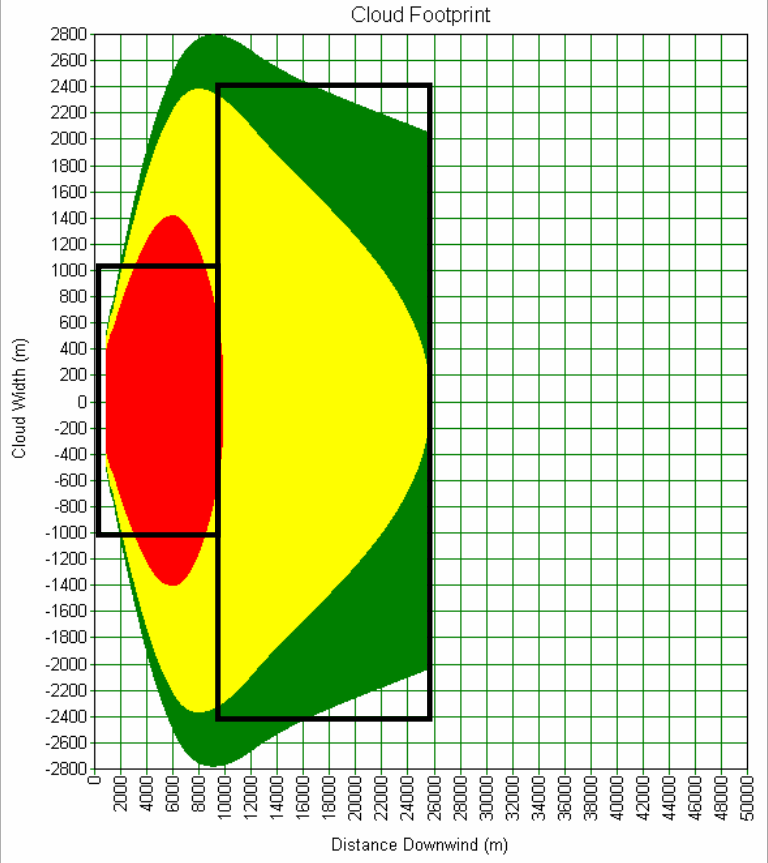
Study Folder: Galeme\_T2.3  
 Audit No: 36631  
 Model: C3H8\_sc8\_5dm2  
 Weather: 130491  
 Material: PROPANE  
 Averaging Time:  
 Flammable(18.75 s)  
 C/L Offset: 0 m  
 Concentration  
 Time: 3952.27 s

- 36 ppm
- 36 ppm
- 80 ppm
- 450 ppm



Study Folder: Galeme\_T2.3  
 Audit No: 36631  
 Model: C3H8\_sc8\_5dm2  
 Weather: 130491  
 Material: PROPANE  
 Averaging Time:  
 Flammable(18.75 s)  
 Height: 0 m  
 Concentration  
 Time: 3952.27 s

- 1.1289e+008m2 @ 36ppr
- 1.1289e+008m2 @ 36ppr
- 7.90944e+007m2 @ 80ppr
- 1.9046e+007m2 @ 450ppr



### Scénario c - 2 m<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Rejet court de durée 95 s.

Aucune flaque ne se forme à la surface de l'eau, car le propane pressurisé dans la cuve se vaporise intégralement soit à la brèche soit au cours de sa dispersion dans l'air.

La dispersion devient passive à partir de 17400 m de la brèche.

Après 95 s de rejet, le nuage atteint 2100 m.

La masse rejetée après 95 s est de 3000 t. A ce même instant, la masse impliquée dans le nuage concentré à plus de 5 ppm est de 3000 t, soit 100% de la masse rejetée. Au moins jusqu'à t=2500 s, la masse impliquée dans le nuage au-dessus de 5 ppm est toujours très proche de 3000 t.

En l'occurrence, nous proposons les parallélépipèdes suivants :

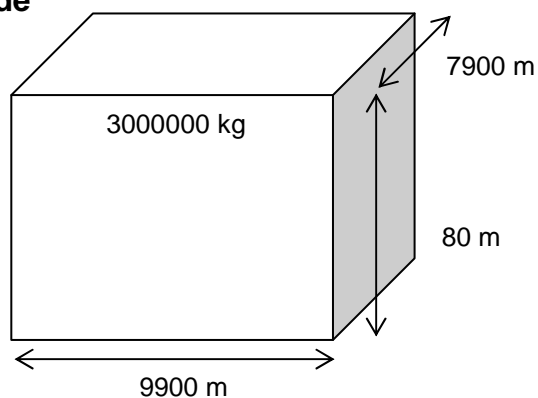
#### Cas 1 : un bloc à t=570 s

##### **Face gauche du parallélépipède**

**à 500 m en aval de la brèche**

(centre du parallélépipède

à 5500 m de la brèche)



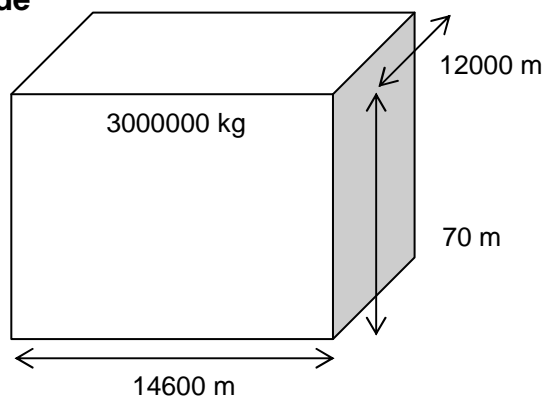
#### Cas 2 : un bloc à t=1250 s

##### **Face gauche du parallélépipède**

**à 2700 m en aval de la brèche**

(centre du parallélépipède

à 10000 m de la brèche)



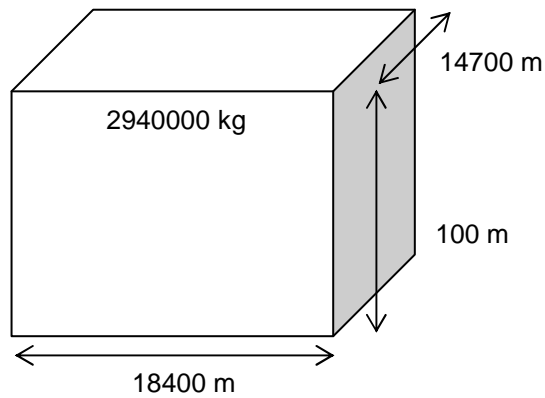
Cas 3 : un bloc à t=2450 s

**Face gauche du parallélép.**

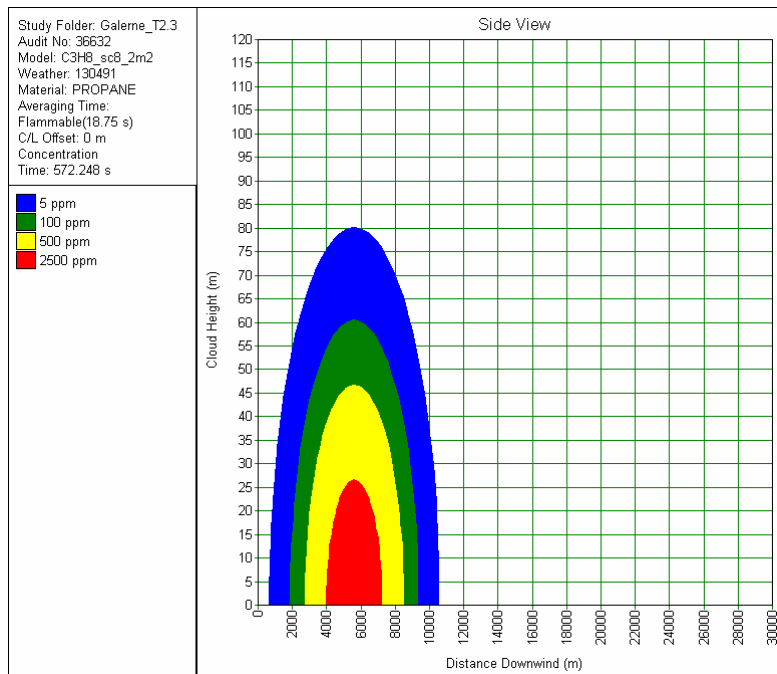
**à 8000 m en aval de la brèche**

(centre du parallélépipède

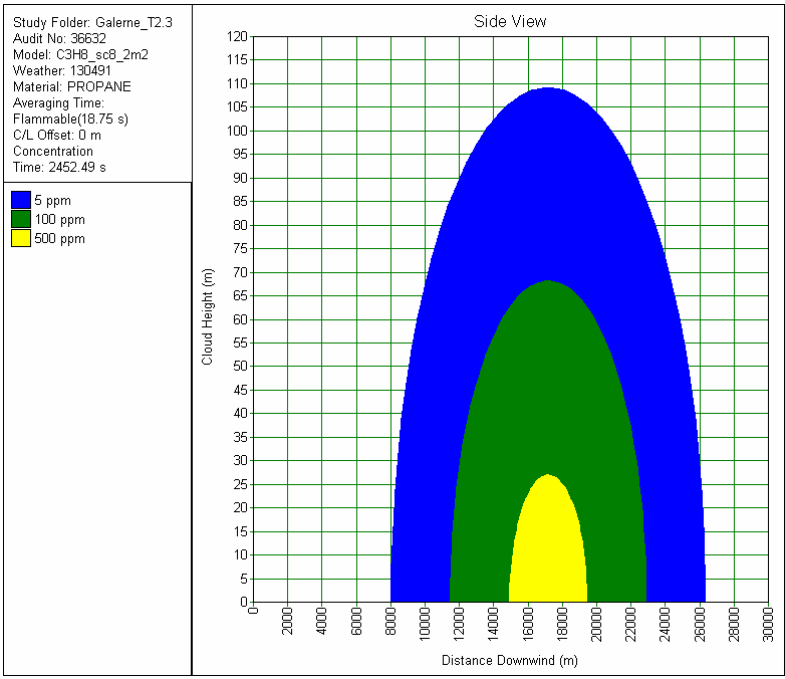
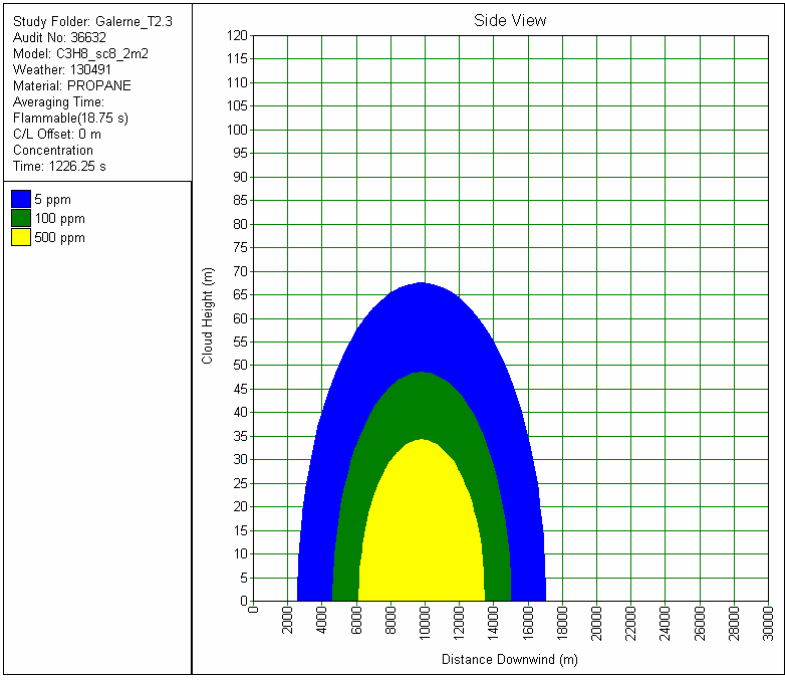
à 17400 m de la brèche)



Images en coupe du nuage à t=570 s, 1250 s et 2450 s:







### 3.2.3 Chlorure de vinyle

Des tailles de brèche de 20 cm<sup>2</sup>, 5 dm<sup>2</sup> et 2 m<sup>2</sup> ont été retenues.

Les débits de rejet, associés à ces différentes brèches, ont été calculés à l'aide de PHAST 6.4 et apparaissent dans le tableau suivant :

Scénario 7	Chlorure de Vinyle - Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	6000 m <sup>3</sup> / 5800 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	26,7 kg/s	670 kg/s	27400 kg/s
Durée de rejet	60 h	2 h 30 min	3 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires	Polymérisation avec oxygène Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène

Le rejet de chlorure de vinyle, stocké initialement sous pression à l'intérieur du navire, va générer un rejet diphasique (aérosol). Une partie du produit rejetée peut éventuellement, suivant la configuration du rejet, tomber au niveau de la surface de la mer et former une nappe.

### **Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991**

Dans ce cas, seul 0,5 % du débit massique (rainout) va alimenter la nappe formée au niveau de la surface de la mer, soit un débit de l'ordre de 139 g/s. Le rayon et le débit d'évaporation de la nappe formée se stabilisent respectivement à 1.1 m et 139 g/s, 100 secondes après le début du rejet. Un débit surfacique de 36 g/m<sup>2</sup>.s est ainsi calculé.

PHAST 6.4 prend en compte un taux de dissolution de 0.006 pour le chlorure de vinyle.

### **Scénario b - 5 dm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991**

Le rejet étant plus massif que précédemment, 20 % du débit massique (rainout) vont venir alimenter la nappe, soit un débit de l'ordre de 134 kg/s. 500 secondes après le début du rejet, le rayon et le débit d'évaporation se stabilisent respectivement à 35 m et 134 kg/s. Un débit surfacique de 35 g/m<sup>2</sup>.s est ainsi calculé.

### **Scénario c - 2 m<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991**

Le rainout du rejet est évalué à 68 %, ce qui représente une masse de 3910 tonnes de chlorure de vinyle. La nappe formée au niveau de la mer s'étale progressivement jusqu'à 700 secondes ( plus de 11 minutes) après le début du rejet. Un rayon maximal de 350 m ainsi qu'un débit d'évaporation maximal de 12570 kg/s sont alors observés.

Cependant, le taux d'évaporation étant important, la nappe diminue fortement de taille après avoir atteint sa taille maximale et, 15 minutes après le début du rejet, disparaît.

### 3.3 Scénarios Liquides Evaporants

#### 3.3.1 Xylènes

Comme précédemment, des tailles de brèche de 20 cm<sup>2</sup>, 5 dm<sup>2</sup> et 2 m<sup>2</sup> ont été envisagées au niveau de la coque du bateau.

Le xylènes ayant une faible pression de vapeur saturante (615 Pa à 15°C), ce produit va, lors de sa mise à l'eau, former une nappe qui s'évaporer progressivement.

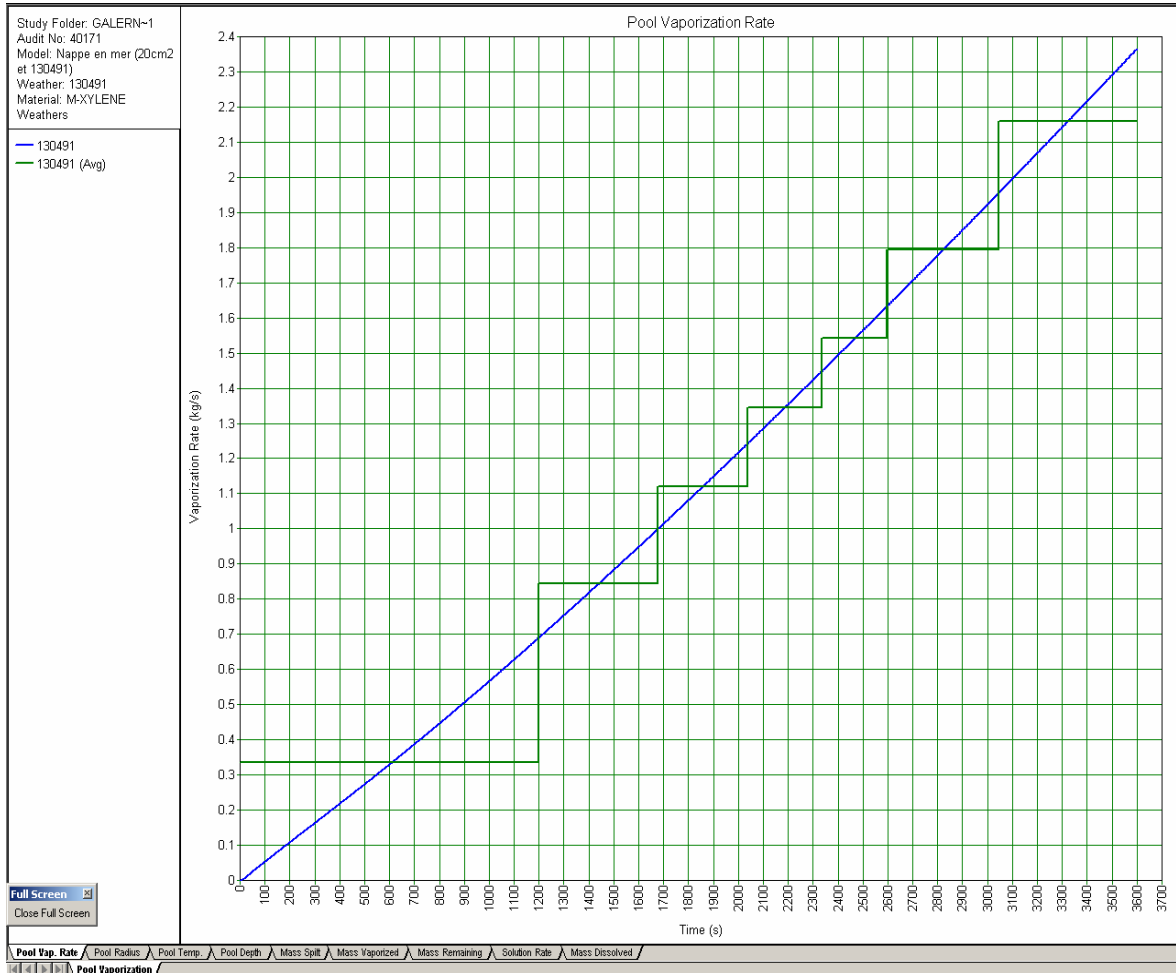
Les débits et durées de rejet associés à chacun des trois scénarios sont les suivants :

Scénario 10	XYLENES - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	14.3 kg/s	358 kg/s	14668 kg/s
Durée de rejet	42 h 45 min	1 h 45 min	2 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie	Nappe flottante évaporante Entretien d'un Incendie
Commentaires	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		

## Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

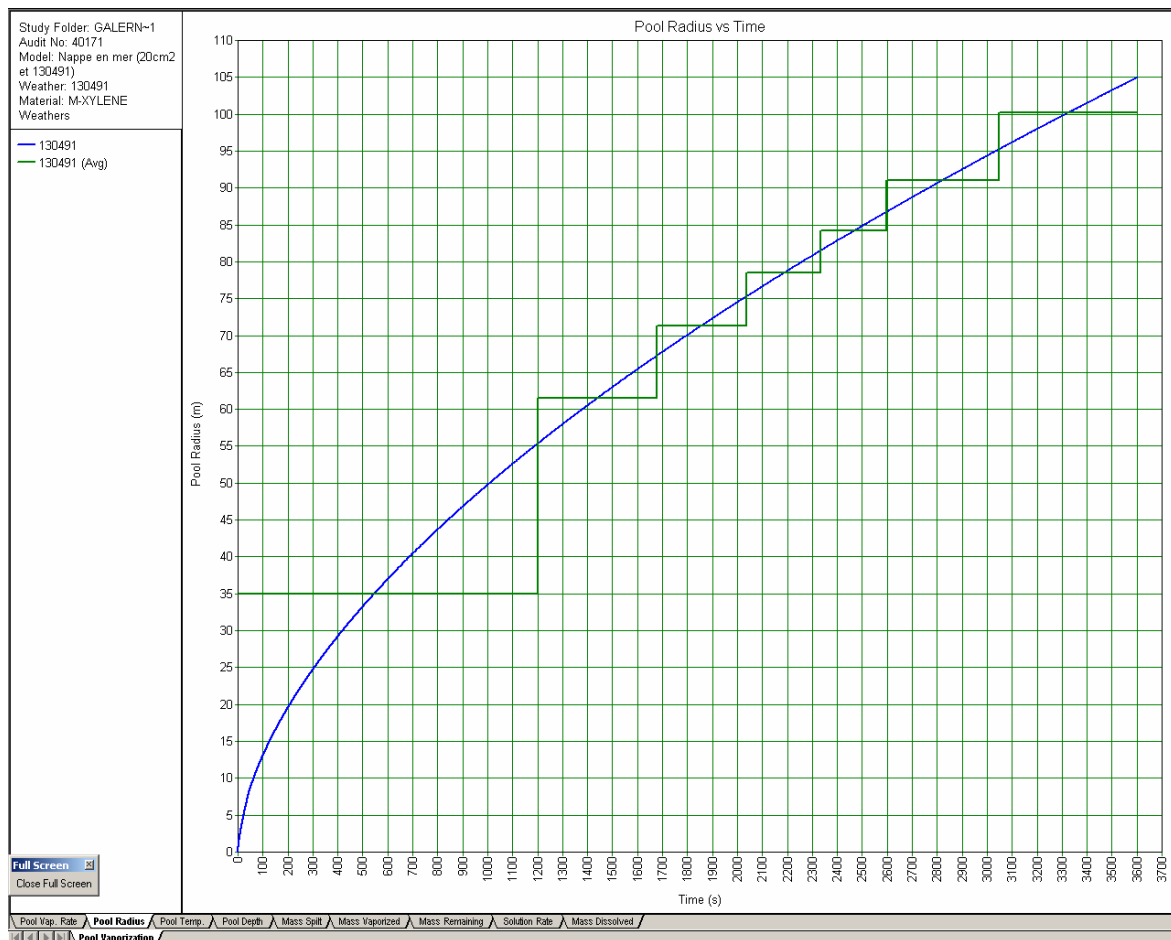
L'évolution des caractéristiques, au cours de la première heure de rejet, de la nappe de xylènes liquide formée à la surface de la mer, sont les suivantes :

### Taux d'évaporation :



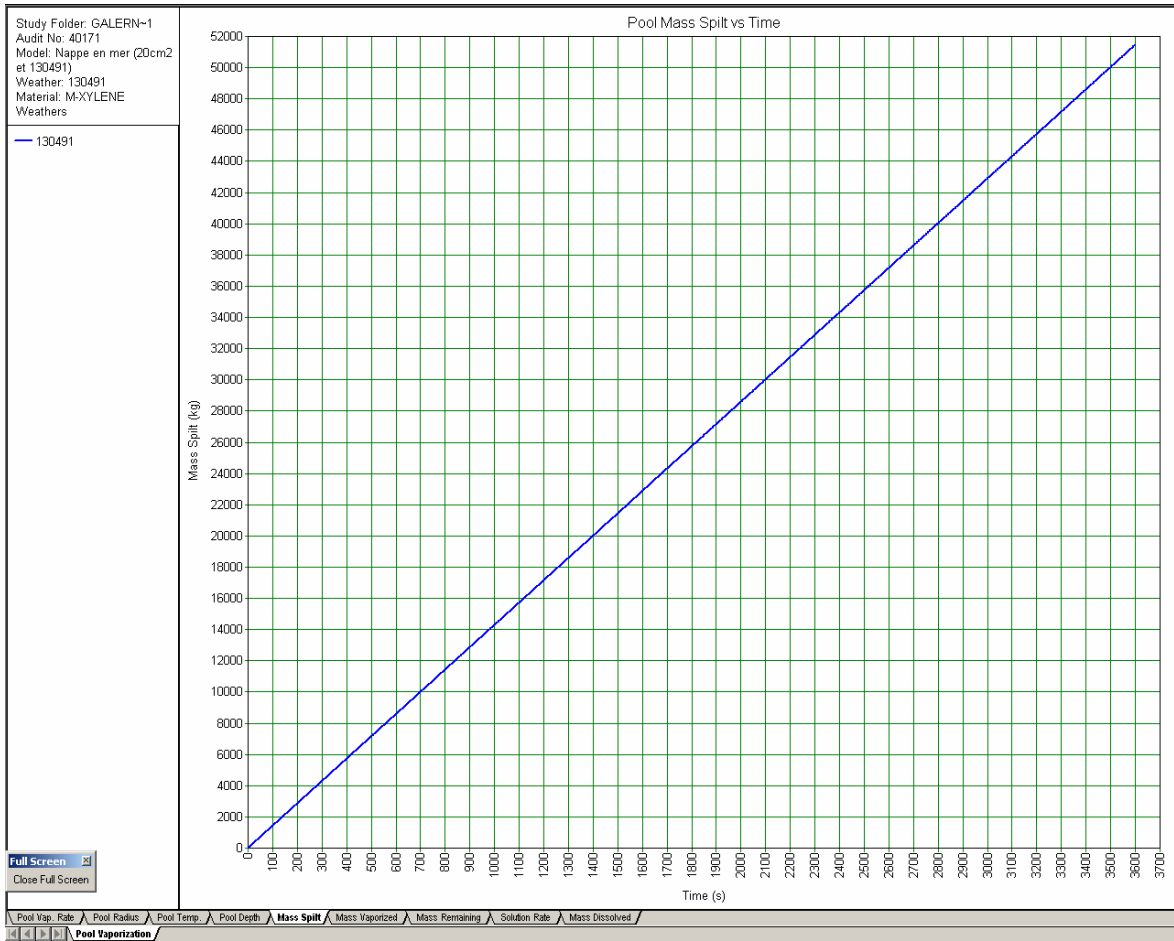
Le taux d'évaporation surfacique est de l'ordre de 0.07 g/(m<sup>2</sup>.s).

## Rayon de la nappe :

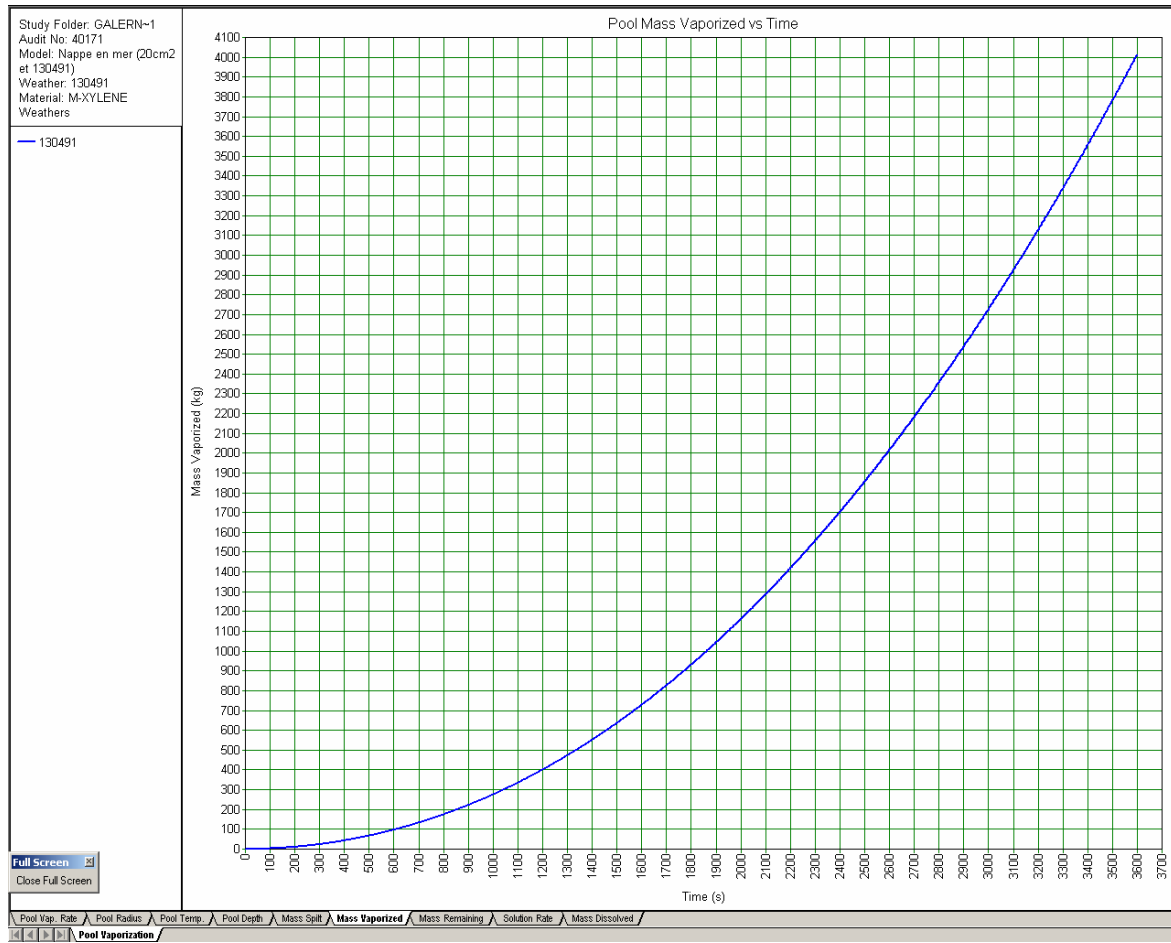


En tenant compte d'un débit surfacique de  $0.07 \text{ g/m}^2.\text{s}$ , une nappe de 255 m de rayon est nécessaire pour générer un débit de  $14.3 \text{ kg/s}$  égal au débit d'alimentation de la nappe, et ainsi créer un état stationnaire. Le logiciel PHAST 6.4 ne permet pas d'afficher l'évolution du rayon de la nappe au delà d'une heure. Après calculs, 3 h 30 minutes environ, depuis le début du rejet, sont nécessaires pour atteindre cet équilibre.

## Masse totale rejetée :

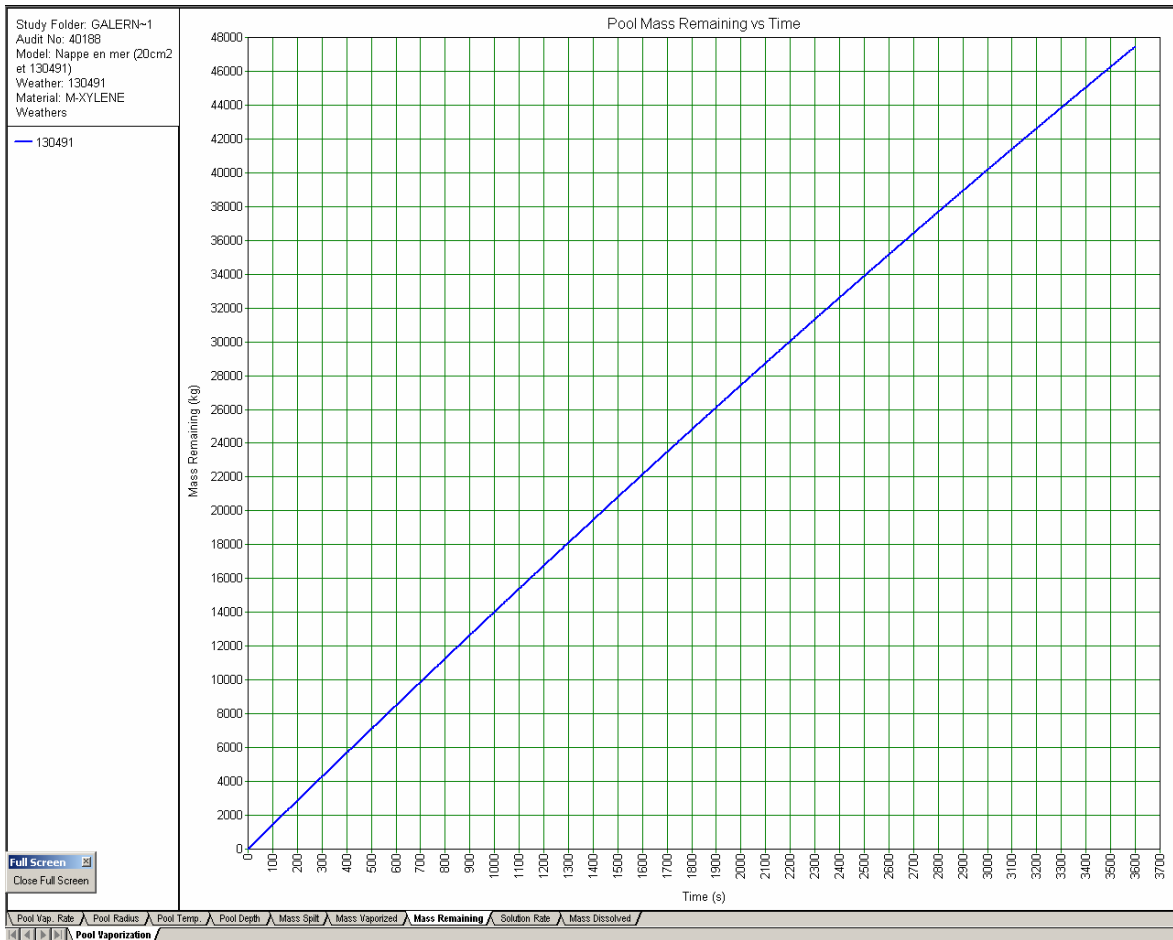


## Masse totale évaporée :





## Masse restante dans la nappe :

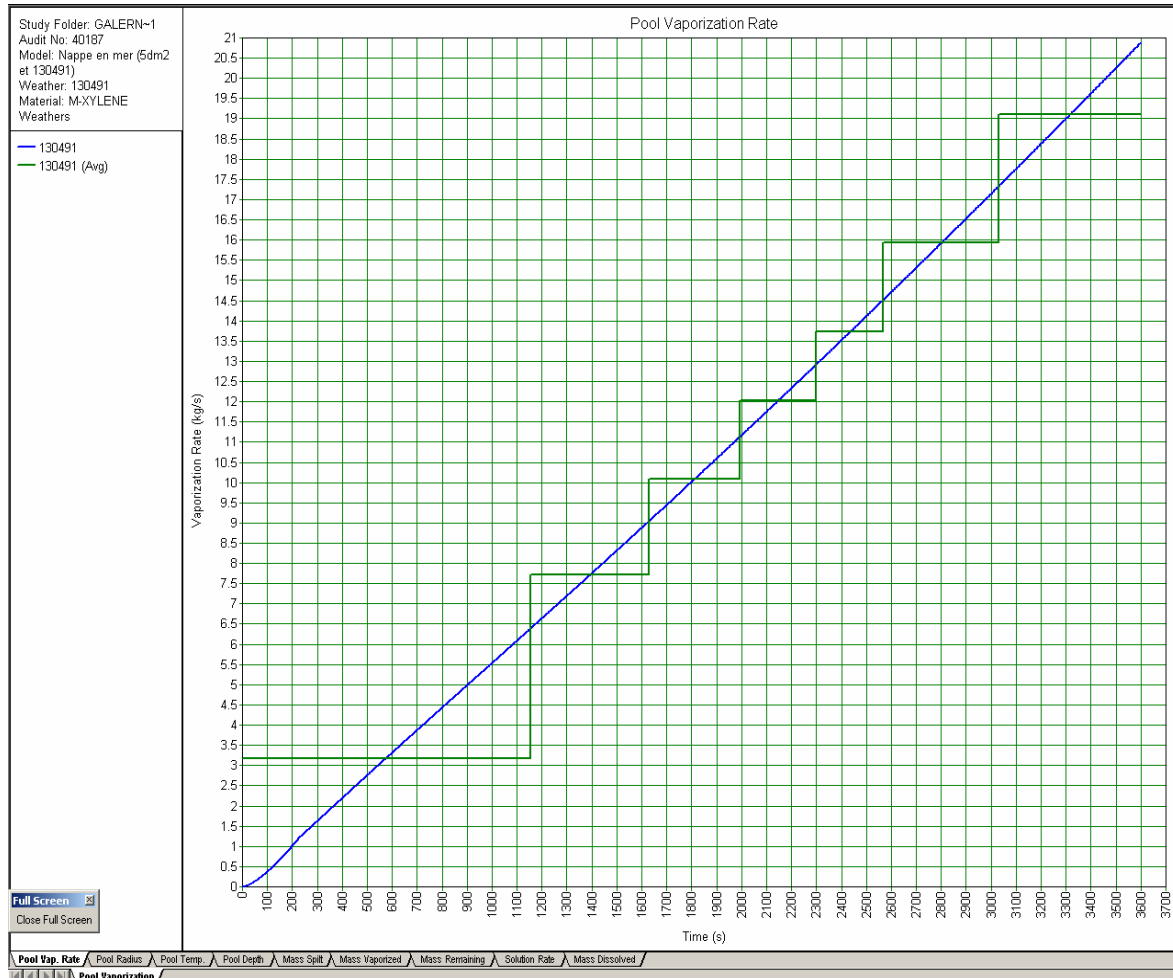


Par ailleurs, PHAST 6.4 ne prend pas en compte la dissolution du xylènes dans l'eau.

## Scénario b - 5 dm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

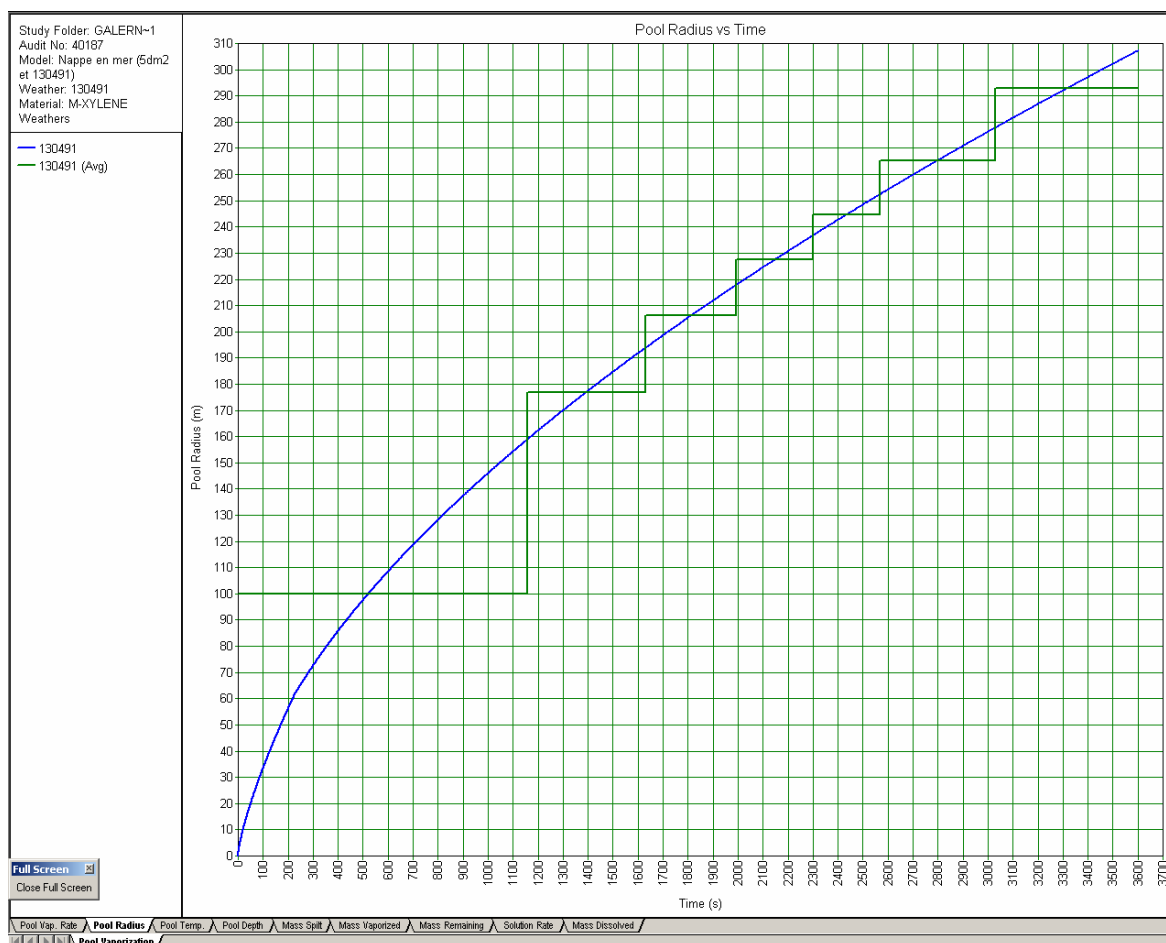
De la même façon que pour la fuite de 20 cm<sup>2</sup>, nous obtenons les courbes suivantes :

Taux d'évaporation :



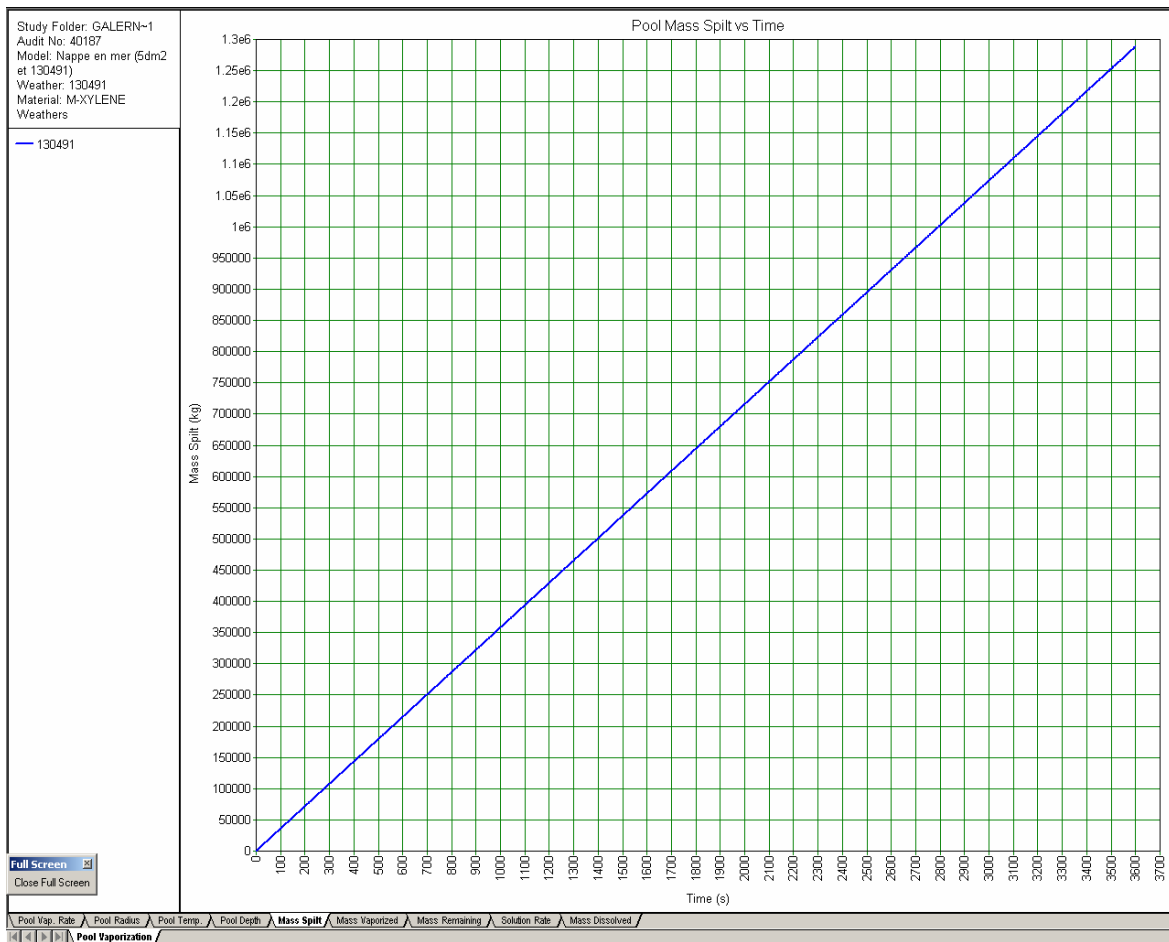
Le débit surfacique est de l'ordre de 0.07 g/(m<sup>2</sup>.s).

## Rayon de la nappe :

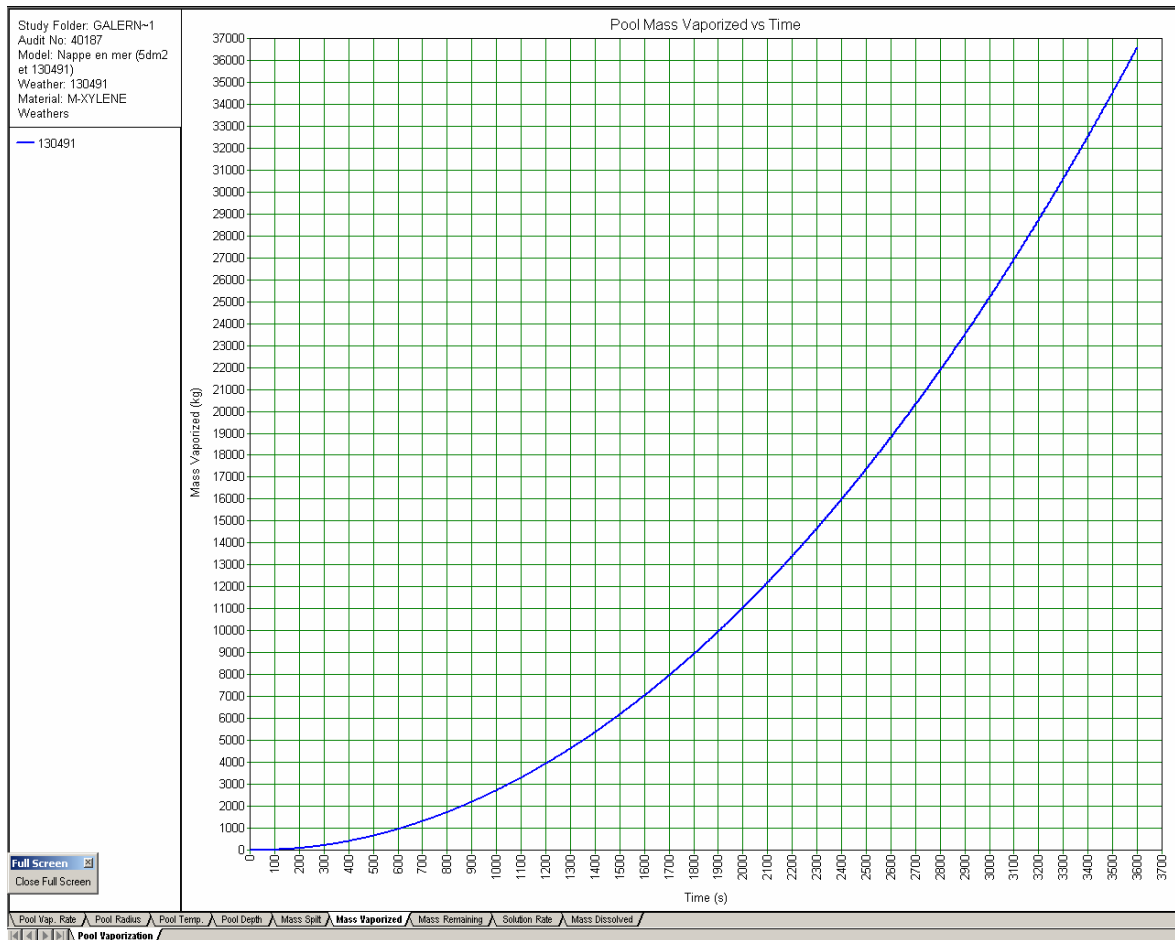


En tenant compte d'un débit d'évaporation surfacique de  $0.07 \text{ g/m}^2.\text{s}$ , une nappe de 1275 m de rayon est nécessaire pour générer un débit de 358 kg/s égal au débit d'alimentation de la nappe, et ainsi créer un état stationnaire. Le logiciel PHAST 6.4 ne permet pas d'afficher l'évolution du rayon de la nappe au delà d'une heure. Après calculs, 6 h environ, depuis le début du rejet, sont nécessaires pour atteindre cet équilibre.

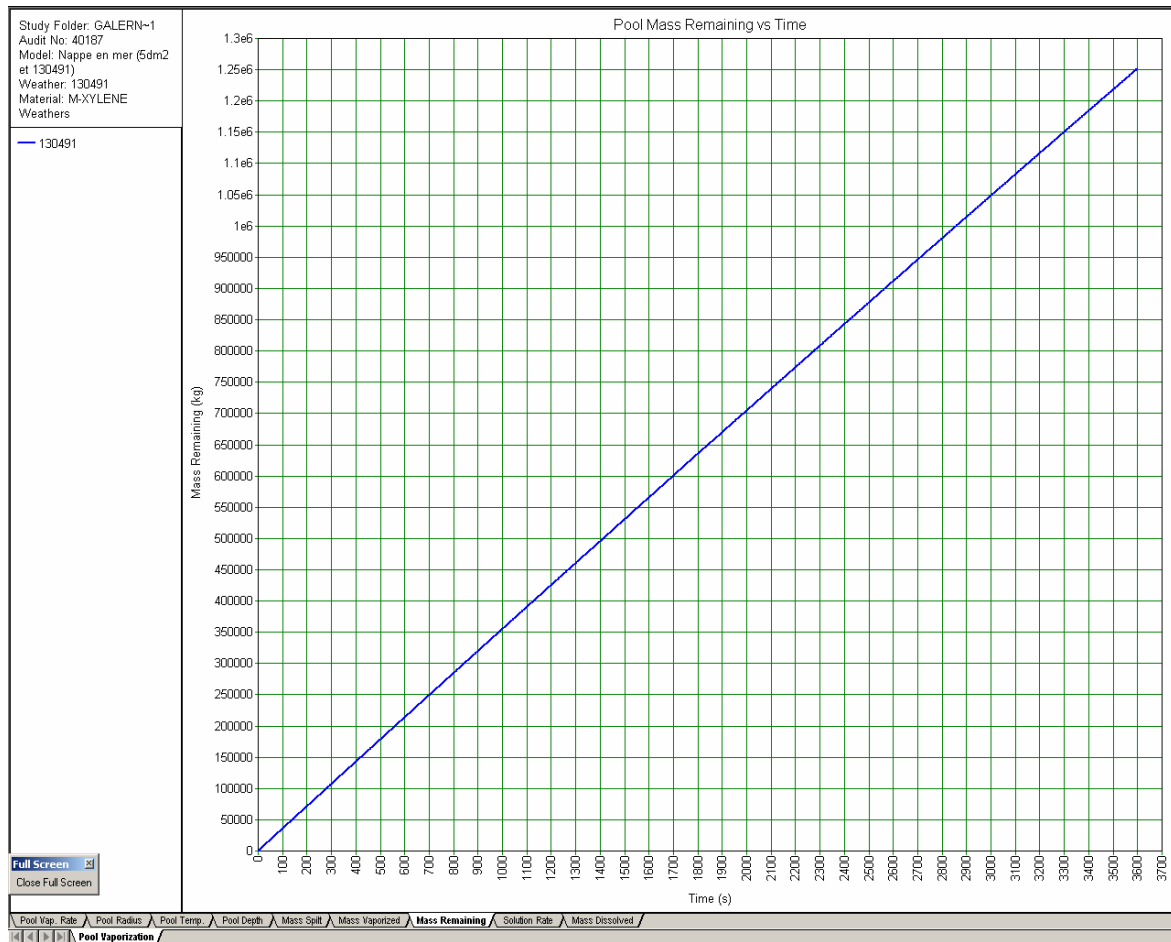
## Masse totale rejetée :



## Masse totale évaporée :



## Masse restante dans la nappe :



PHAST 6.4 ne prend pas en compte la dissolution du xylènes dans l'eau.

## Scénario c - 2 m<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

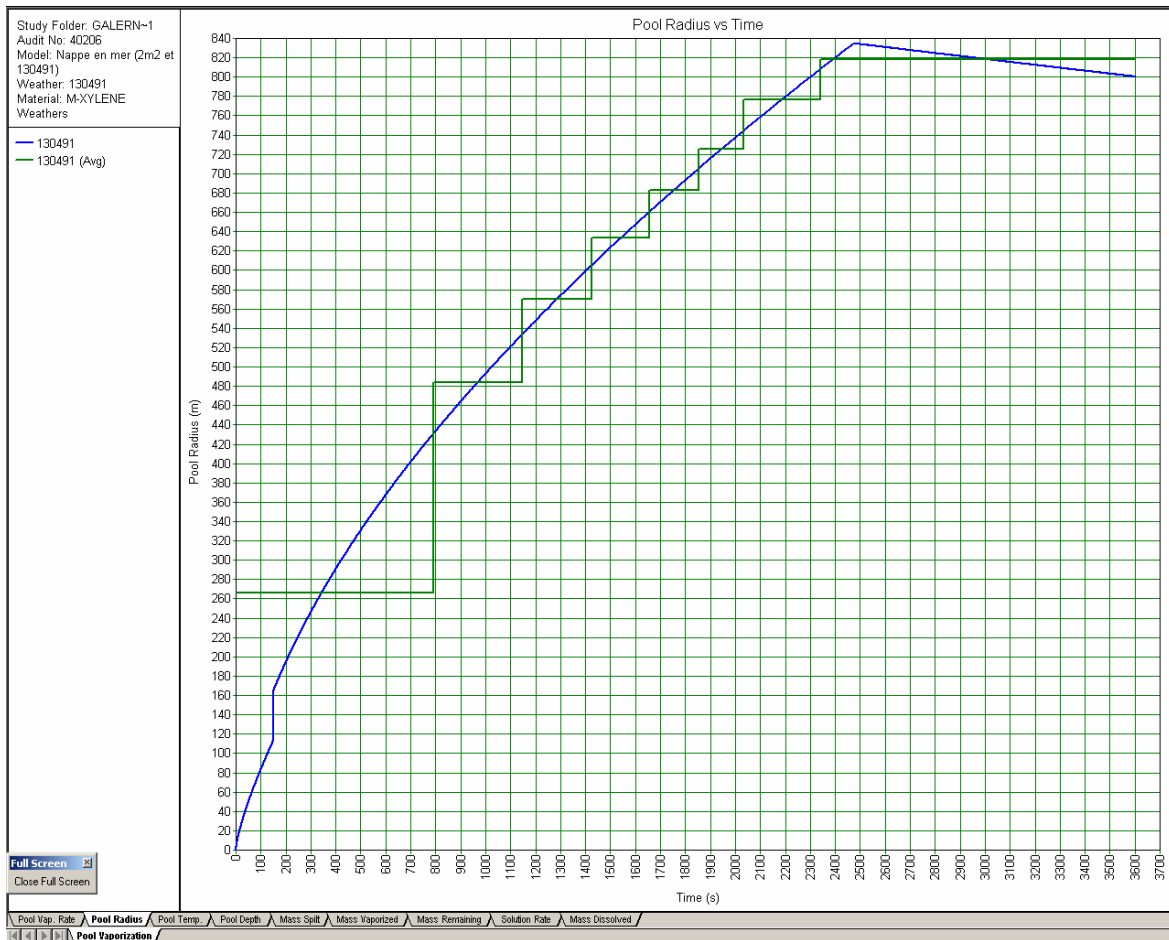
De la même façon que pour les fuites de 20 cm<sup>2</sup> et 5 dm<sup>2</sup>, nous obtenons les courbes suivantes :

Taux d'évaporation :



Le débit d'évaporation surfacique est de l'ordre de 0.7 g/m<sup>2</sup>.s.

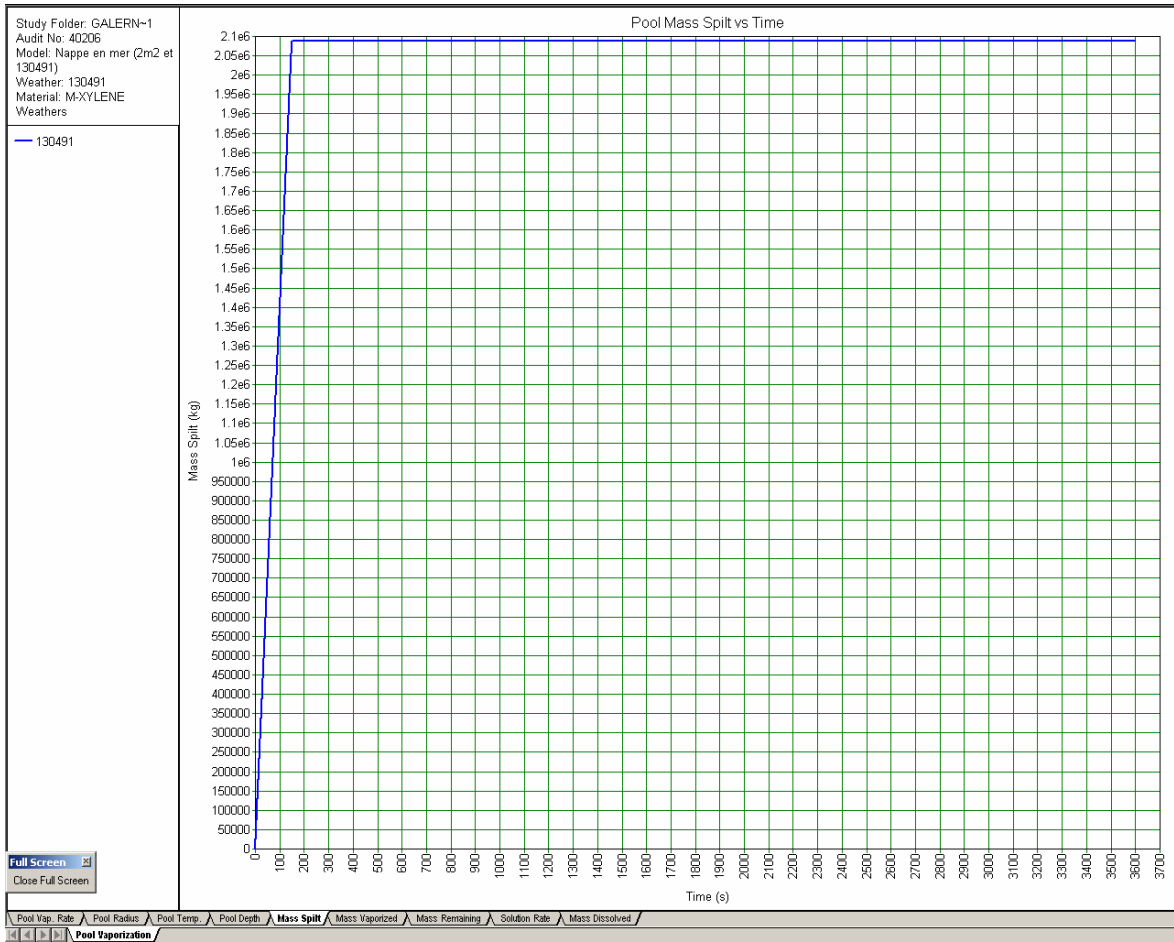
## Rayon de la nappe :



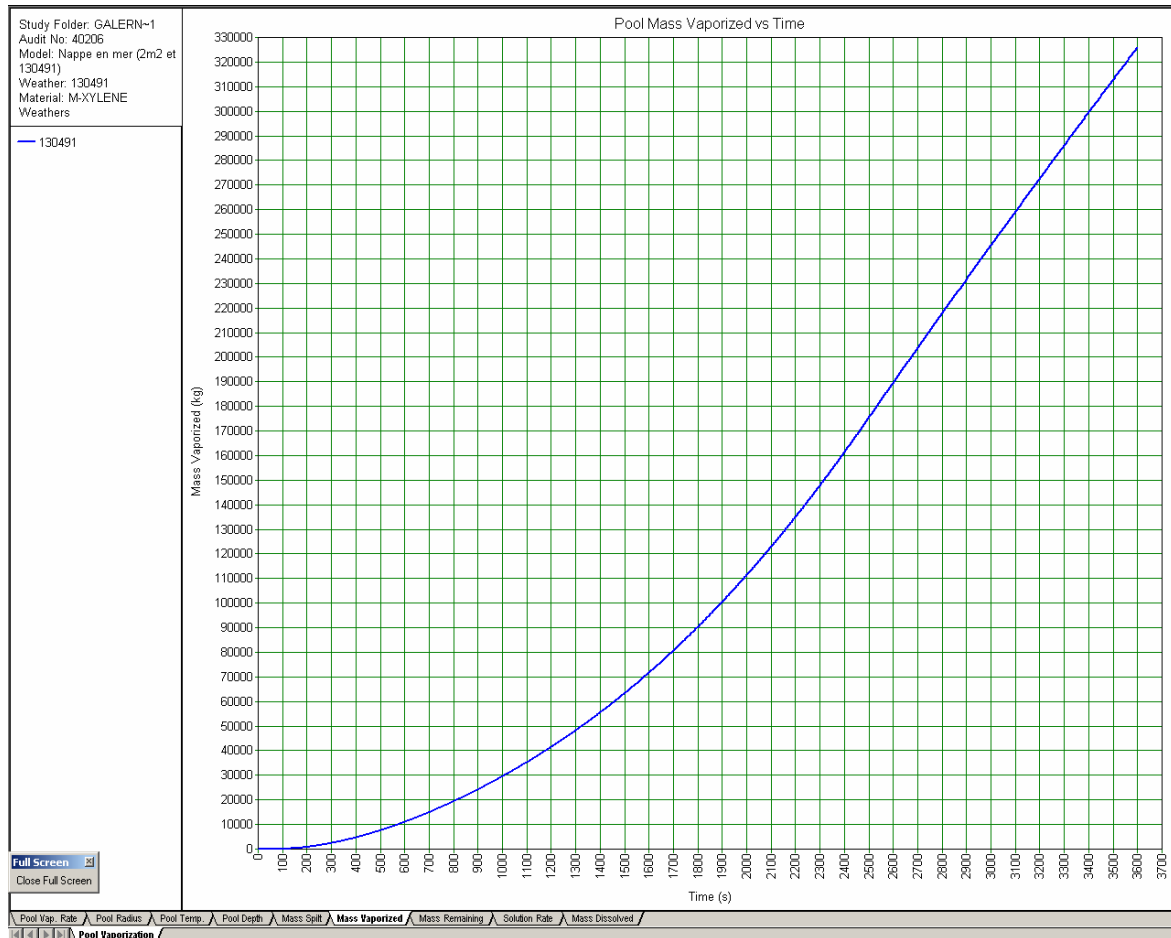
Le graphique permet de voir qu'un état stationnaire est globalement atteint au bout de 2400 secondes, soit 40 minutes.



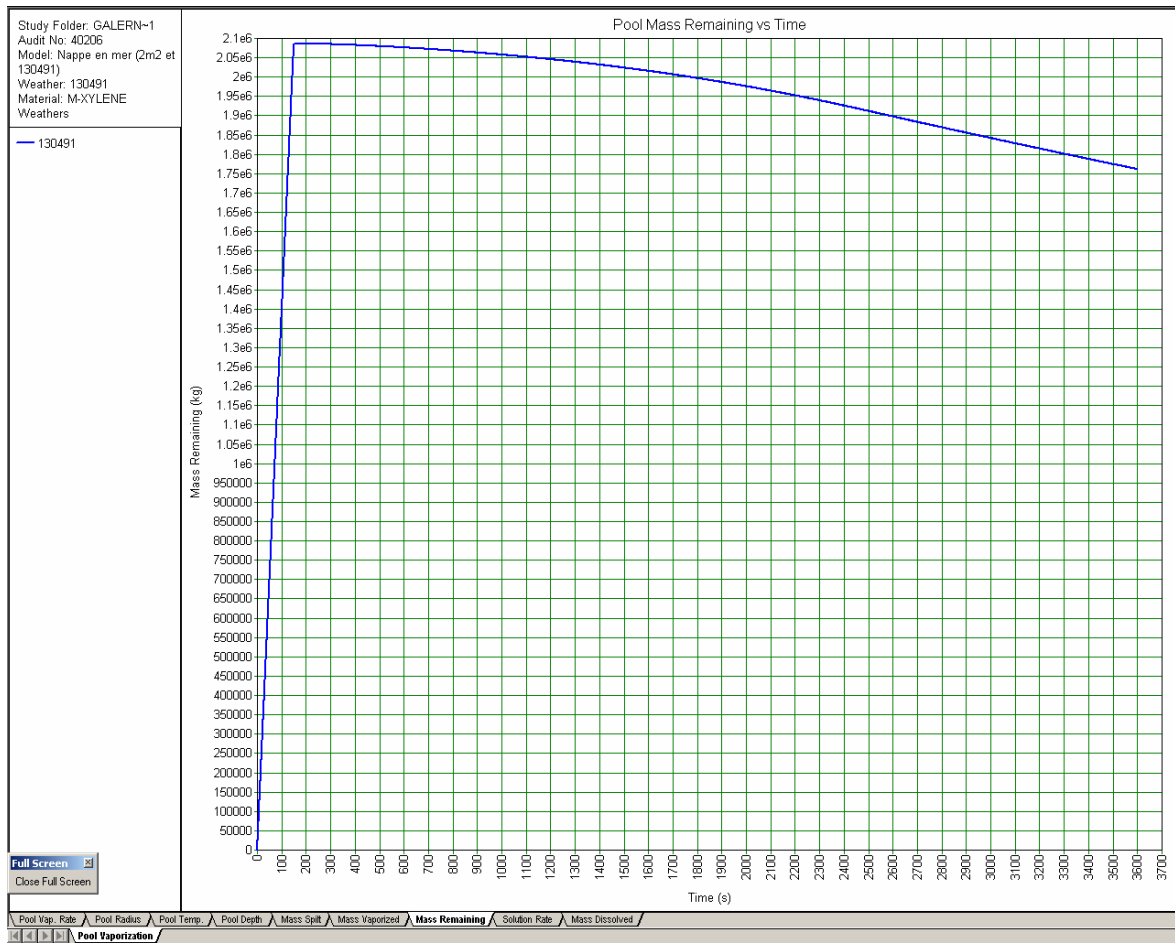
# Rayon totale rejetée :



## Masse totale évaporée :



## Masse restante dans la nappe :



PHAST 6.4 ne prend pas en compte la dissolution du xylènes dans l'eau.

Scénario 11	XYLENES - Brèche cuve pleine <u>au-dessous</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>1</sup>	10 m	10 m	10 m
Débit estimé			
Durée de rejet			
Conséquences et risques	Nappe flottante évaporante	Nappe évaporante flottante	Nappe flottante évaporante
Commentaires	Jet liquide sous l'eau, remontant à la surface		

---

1 La hauteur de liquide est exprimée en mètres de GNL. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer (rejet sous 1 m d'eau, soit un équivalent de 2 m de GNL)

### 3.3.2 Benzène

Comme précédemment des tailles de brèche de 20 cm<sup>2</sup>, 5 dm<sup>2</sup> et 2 m<sup>2</sup> ont été envisagées au niveau de la coque du bateau.

De la même façon que le xylènes, le benzène, du fait de sa pression de vapeur saturante (7800 Pa à 15°C) relativement faible, va former une nappe qui va s'évaporer progressivement. La comparaison des pressions de vapeur saturante du xylènes et du benzène montre cependant que ce dernier s'évapore bien plus facilement que le premier.

Les débits et durées de rejet associés à chacun des trois scénarios sont les suivants :

Scénario 12	BENZENE - Brèche cuve pleine <u>au-dessus</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>2</sup>	10 m	10 m	10 m
Débit estimé	14,6 kg/s	364 kg/s	14900 kg/s
Durée de rejet	42 h	1 h 40 min	2 min 30 s
Conséquences et risques	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires			

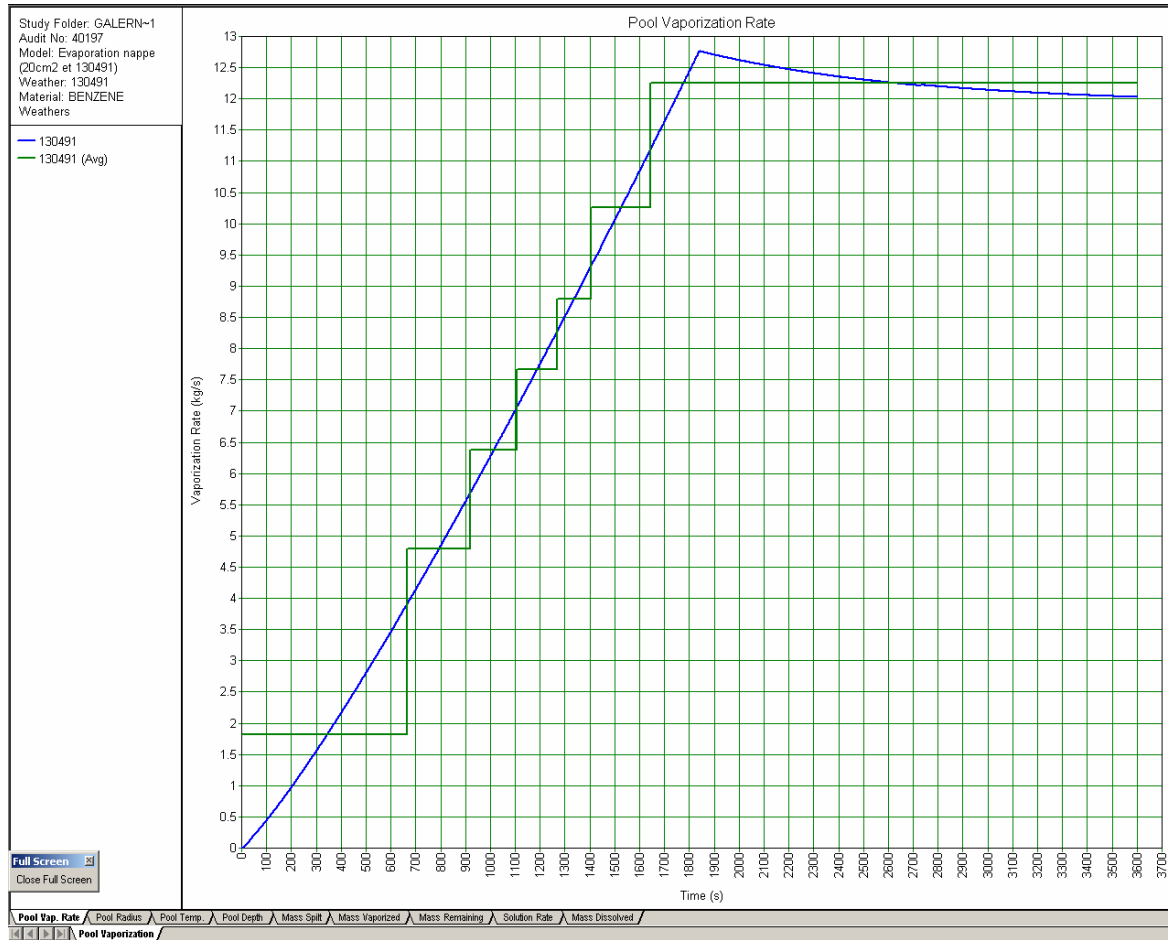
---

<sup>2</sup> La hauteur de liquide est exprimée en mètres de GNL. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer (rejet sous 1 m d'eau, soit un équivalent de 2 m de GNL)

## Scénario a - 20 cm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

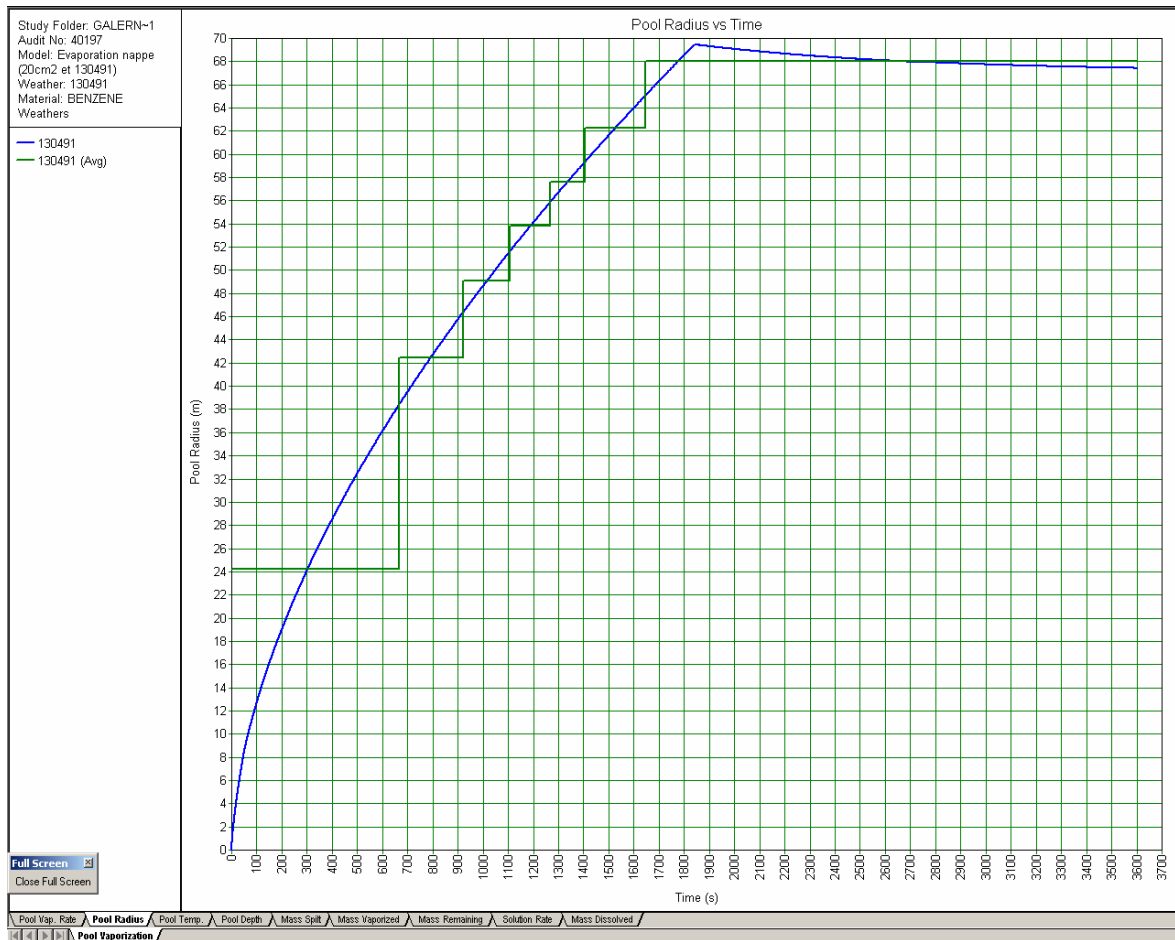
L'évolution des caractéristiques, au cours de la première heure de rejet, de la nappe de benzène liquide formée à la surface de la mer, sont les suivantes :

### Taux d'évaporation :



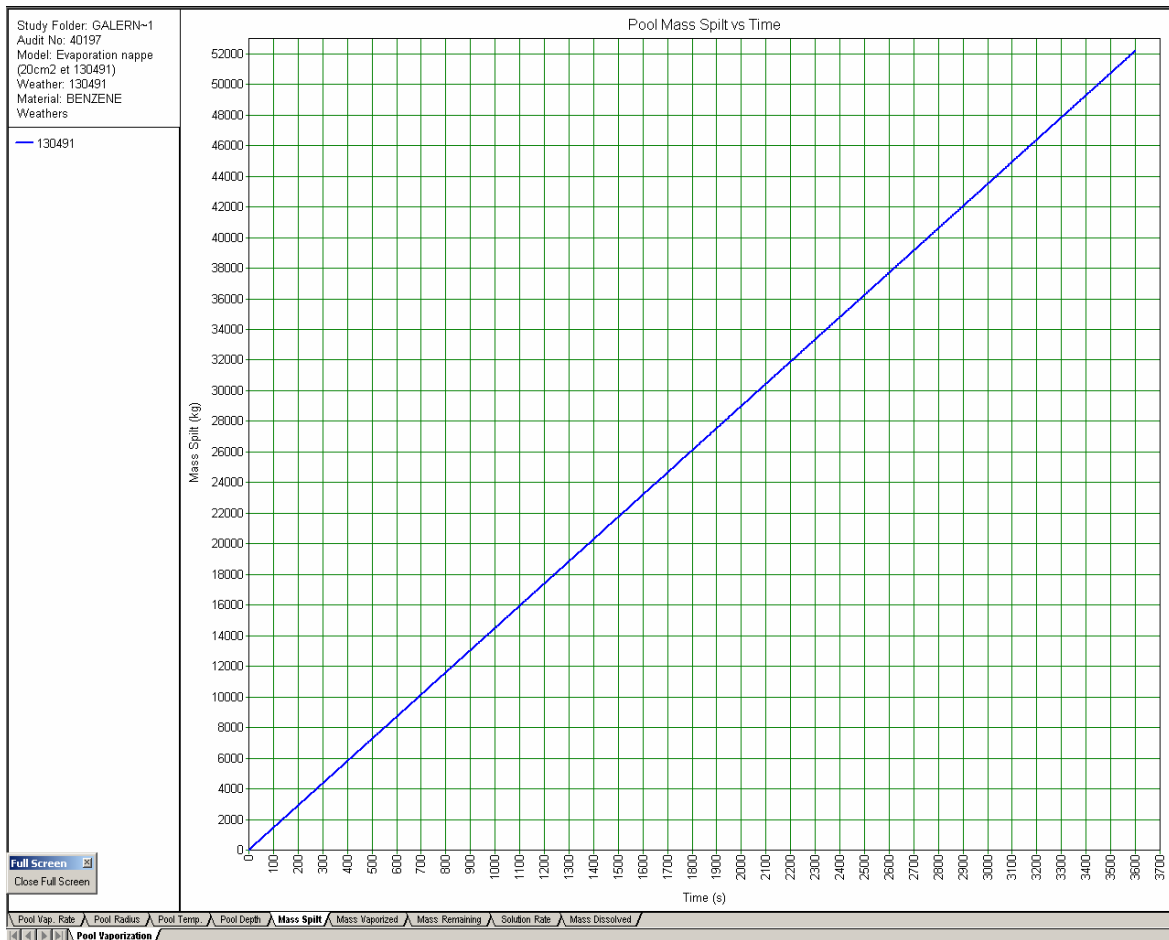
Le débit d'évaporation surfacique est de l'ordre de 0.85 g/m<sup>2</sup>.s.

## Rayon de la nappe :



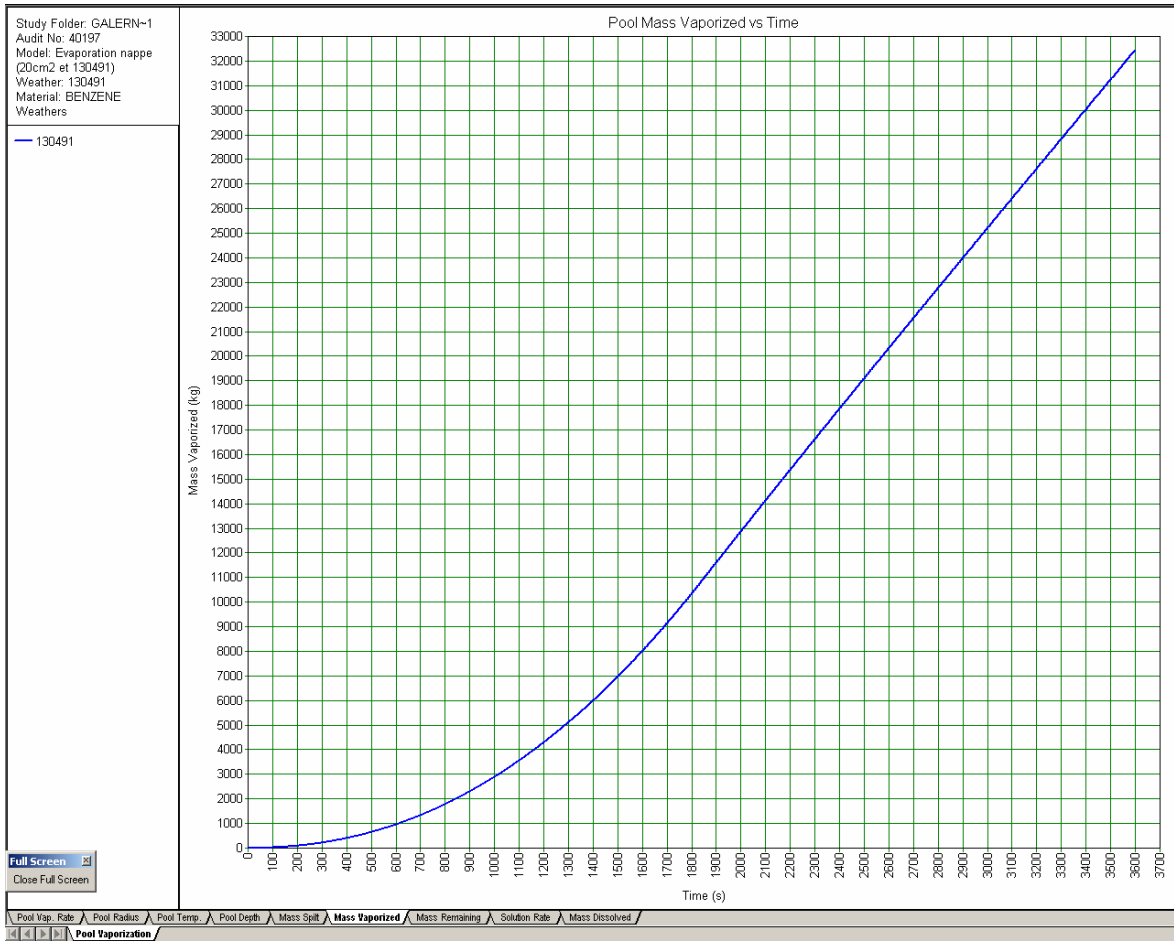
Le rayon de la nappe se stabilise au bout de 30 minutes environ. Cette stabilisation est due au taux d'évaporation du benzène qui compense le débit d'alimentation de la nappe généré au niveau de la fuite.

## Masse totale rejetée :

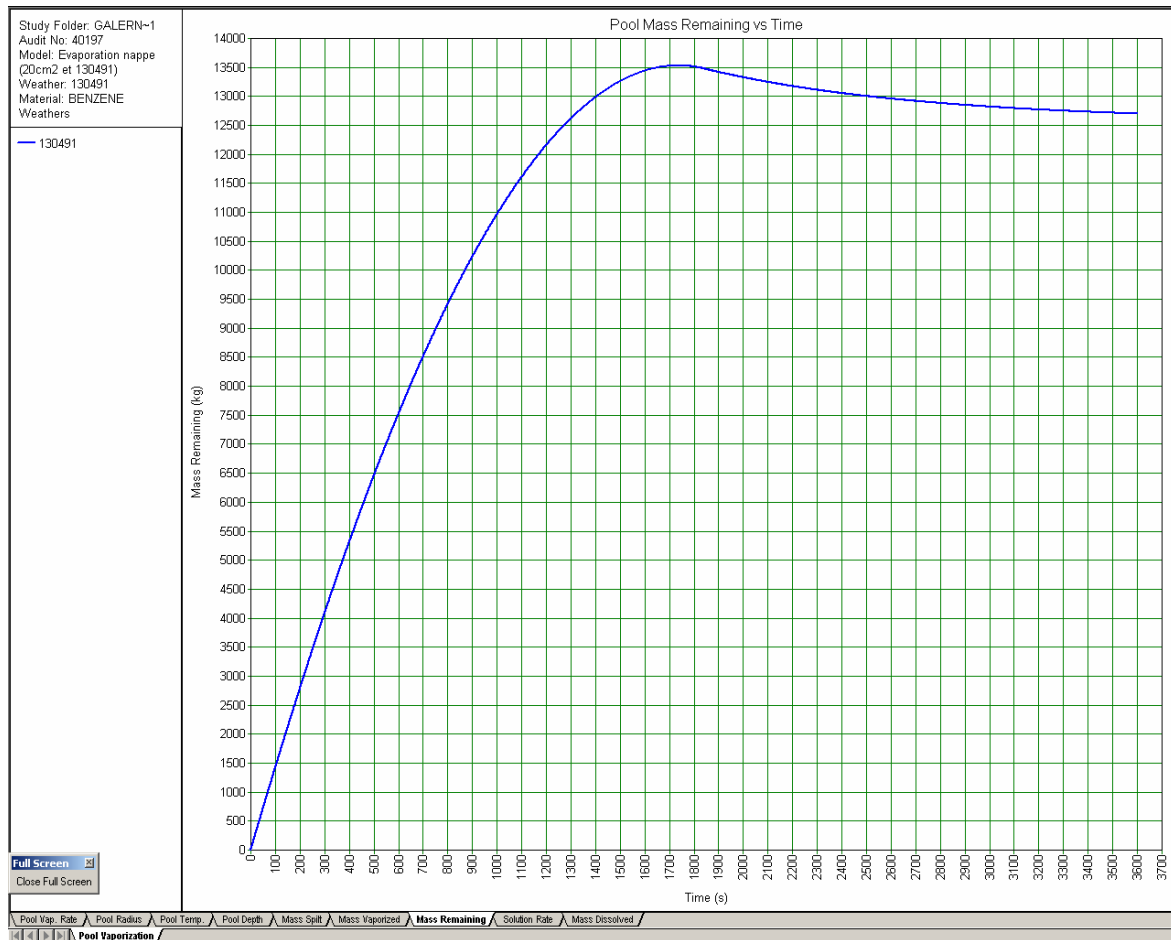




# Masse totale évaporée :

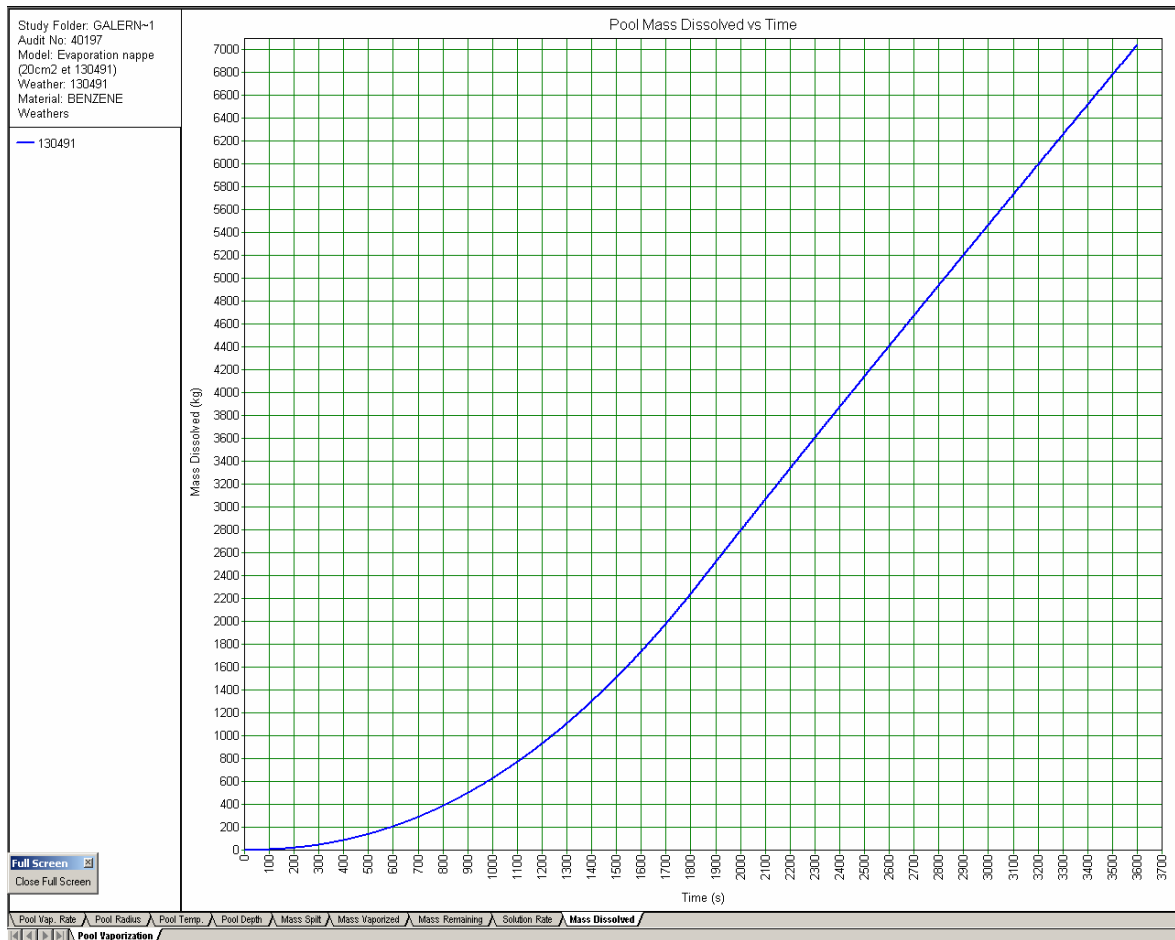


## Masse restante de produit :



Contrairement au xylènes, une partie du produit est dissoute.

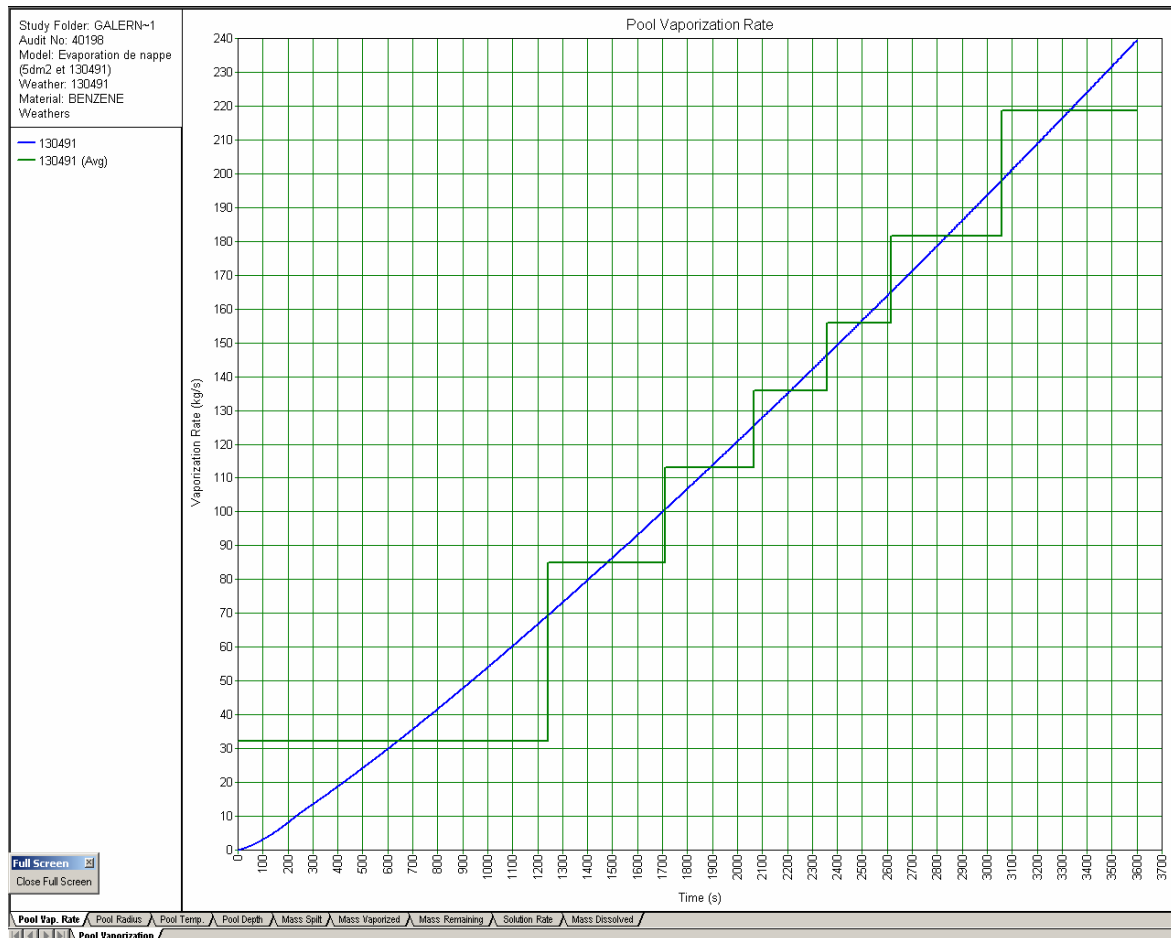
## Masse totale dissoute :



Le taux de dissolution du benzène est considéré égal à 0.018.

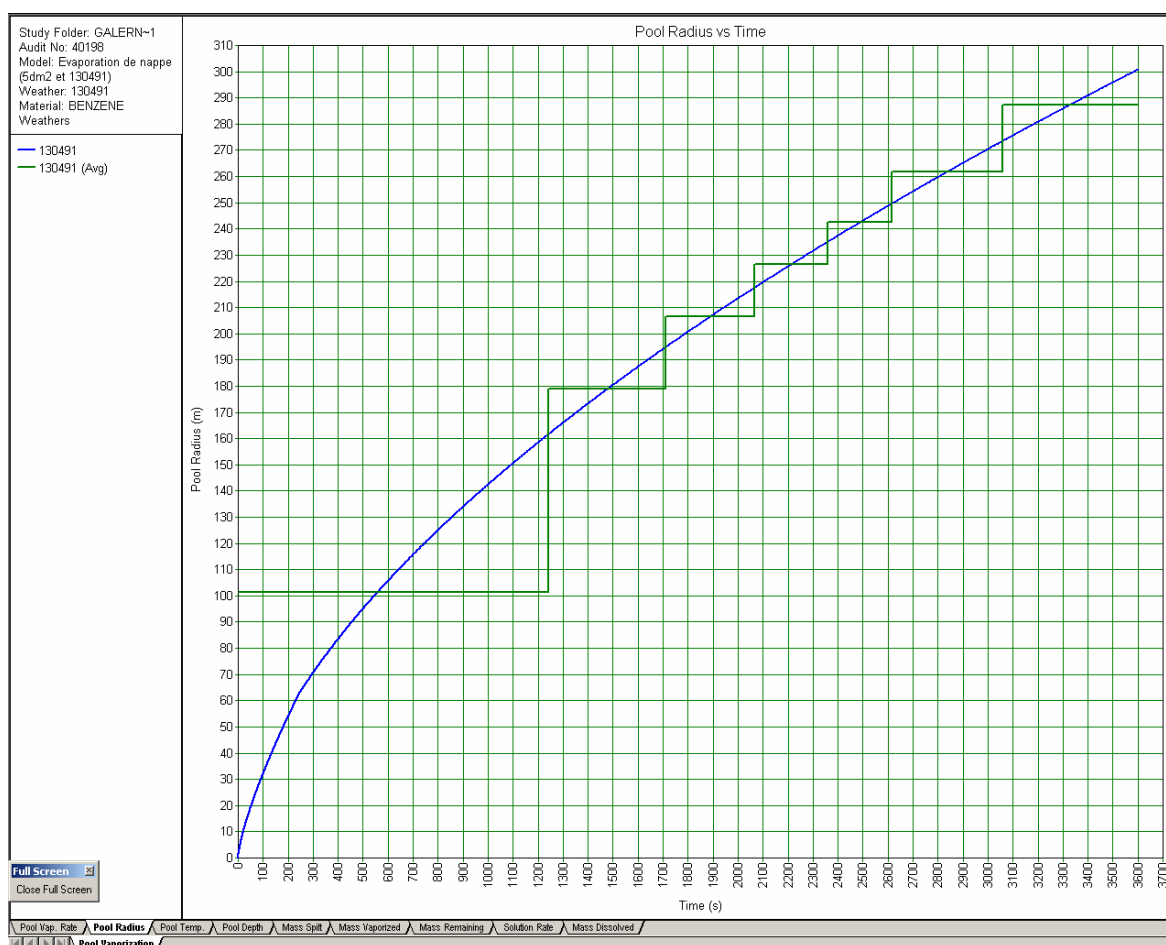
## Scénario b - 5 dm<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Taux d'évaporation :



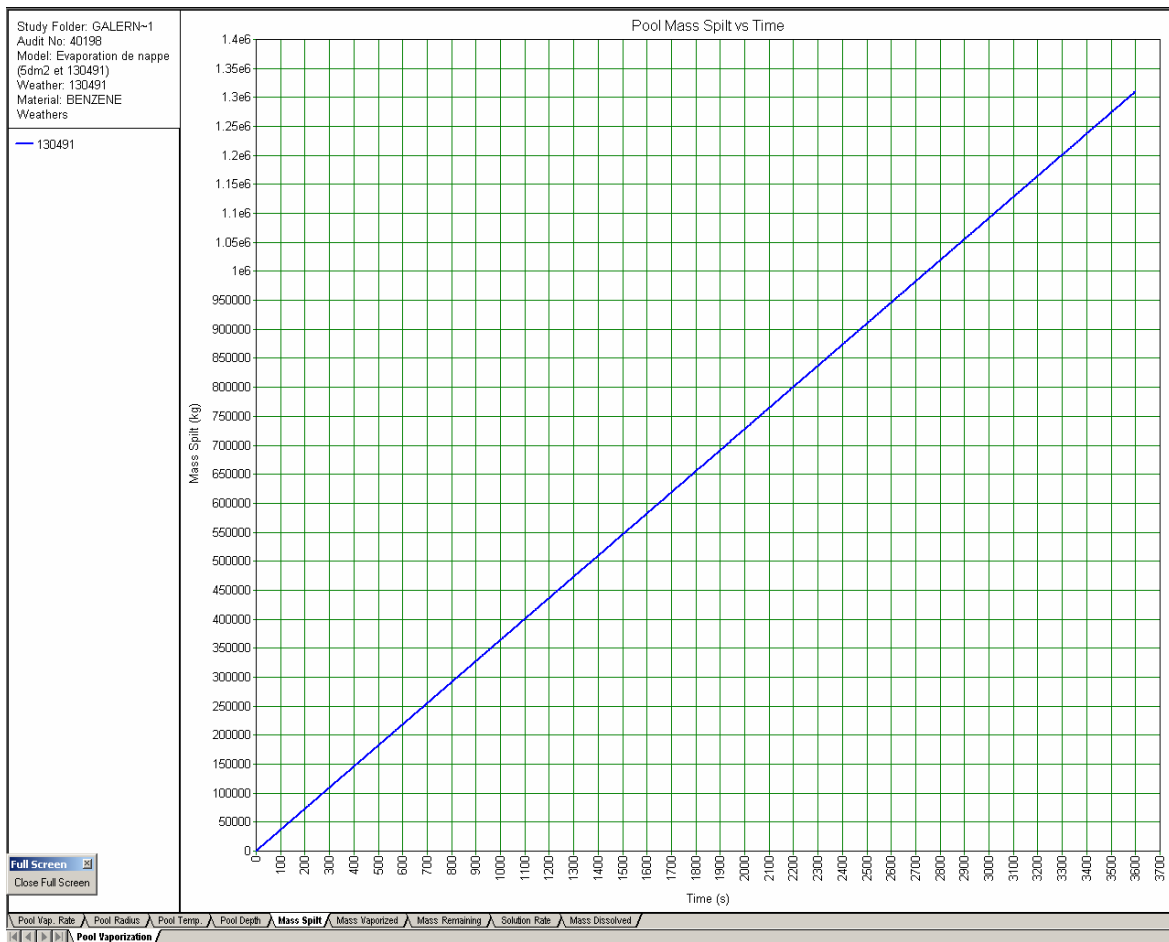
Le débit d'évaporation surfacique est de l'ordre de 0.85 g/m<sup>2</sup>.s.

## Rayon de la nappe :

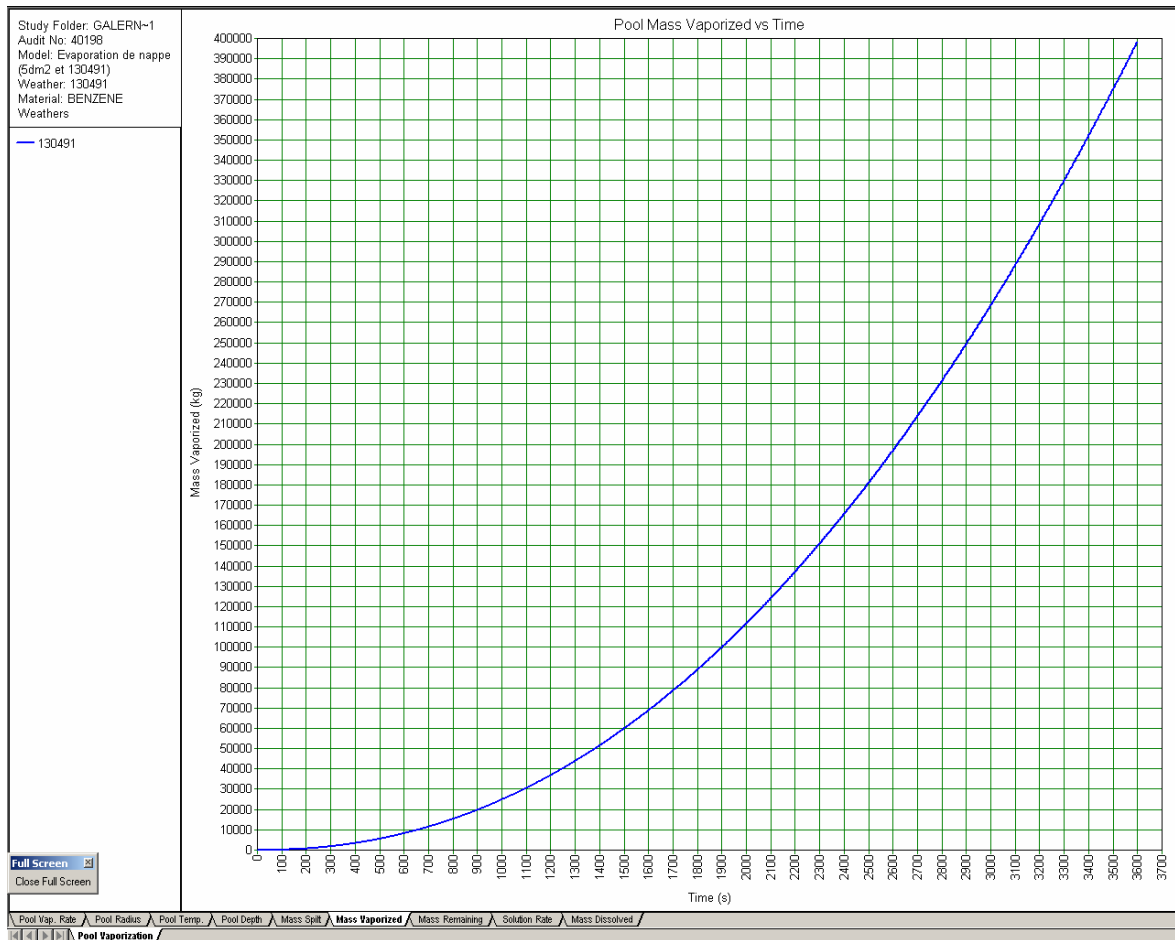


En tenant compte d'un débit d'évaporation surfacique de  $0.85 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}$ , une nappe de 370 m de rayon est nécessaire pour générer un débit de 364 kg/s égal au débit d'alimentation de la nappe, et ainsi créer un état stationnaire. Le logiciel PHAST 6.4 ne permet pas d'afficher l'évolution du rayon de la nappe au delà d'une heure. Après calculs, 1 h 25 min environ, depuis le début du rejet, est nécessaire pour atteindre cet équilibre.

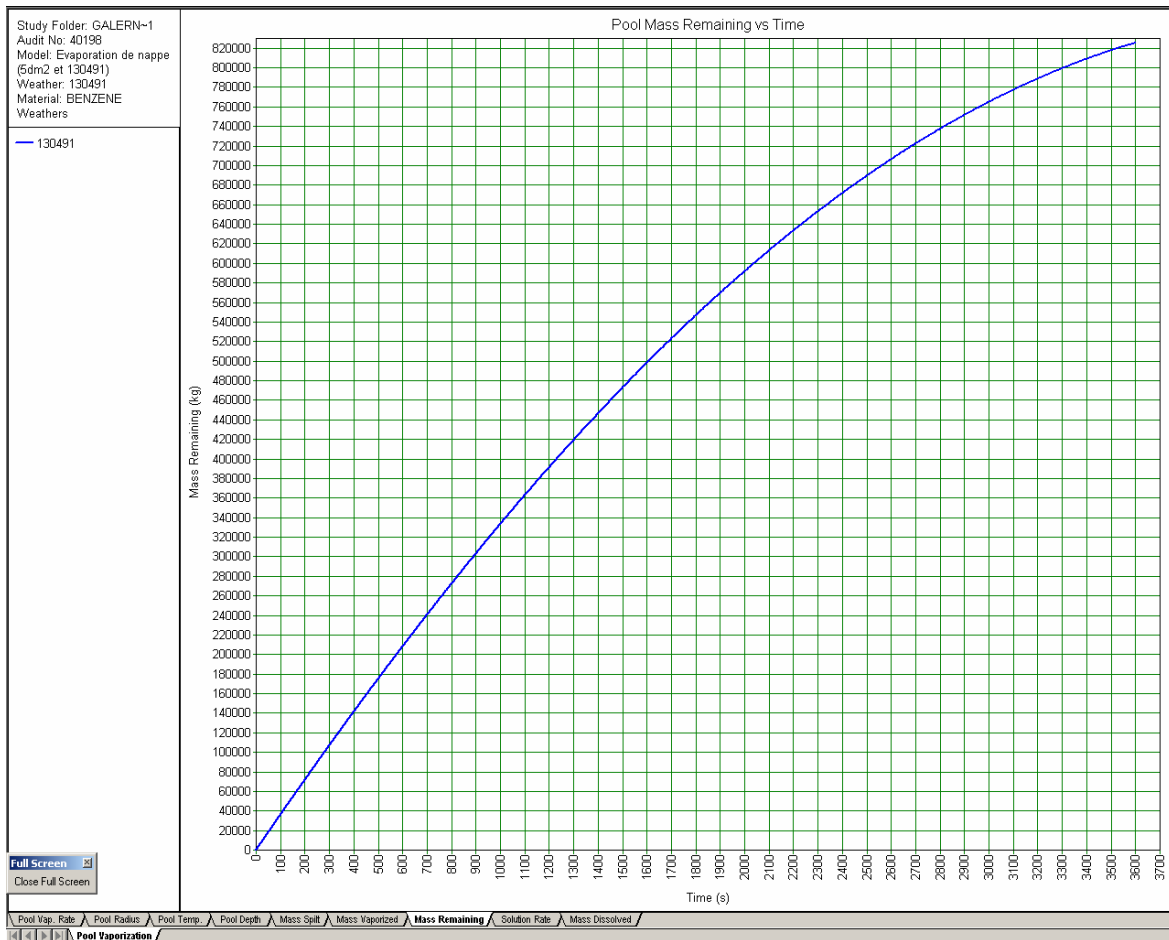
## Masse totale rejetée :



## Masse totale évaporée :

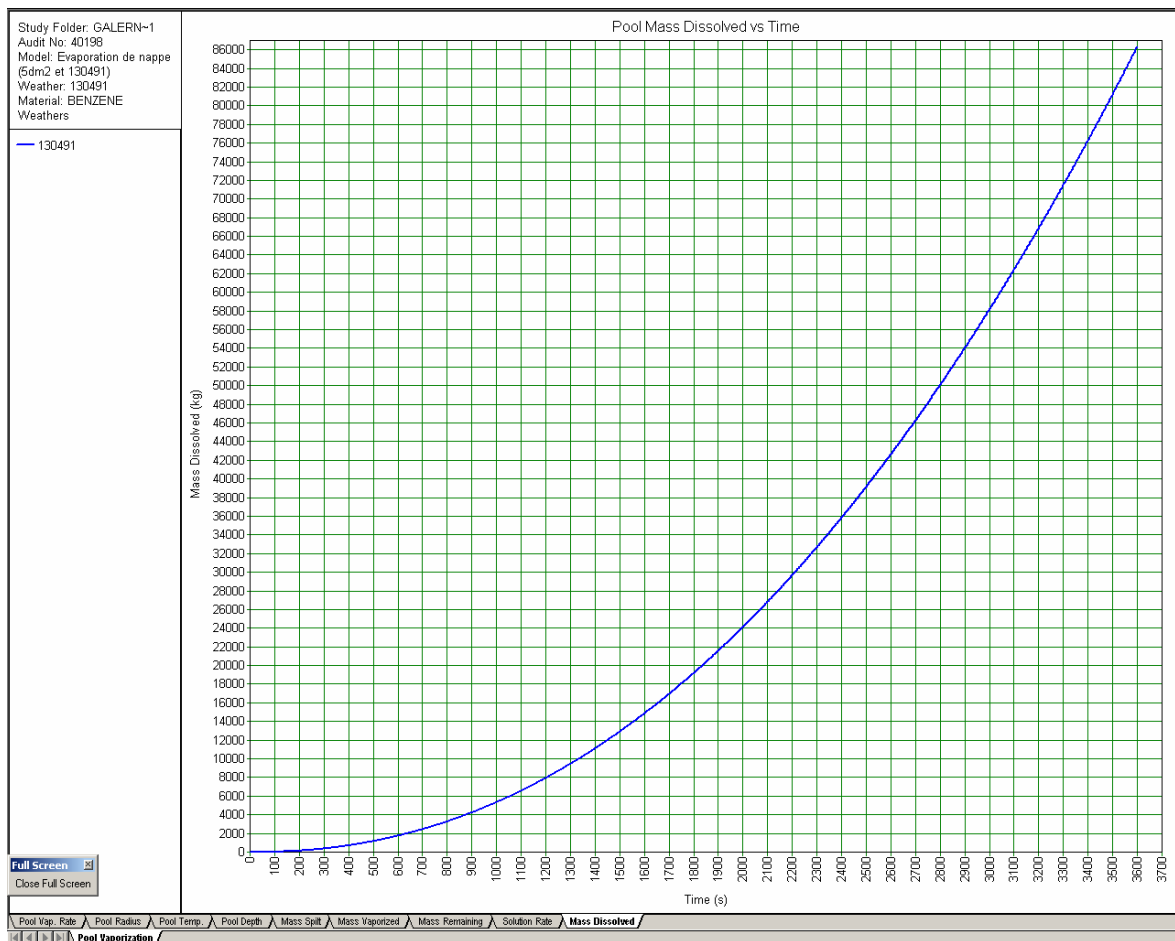


## Masse totale restante :





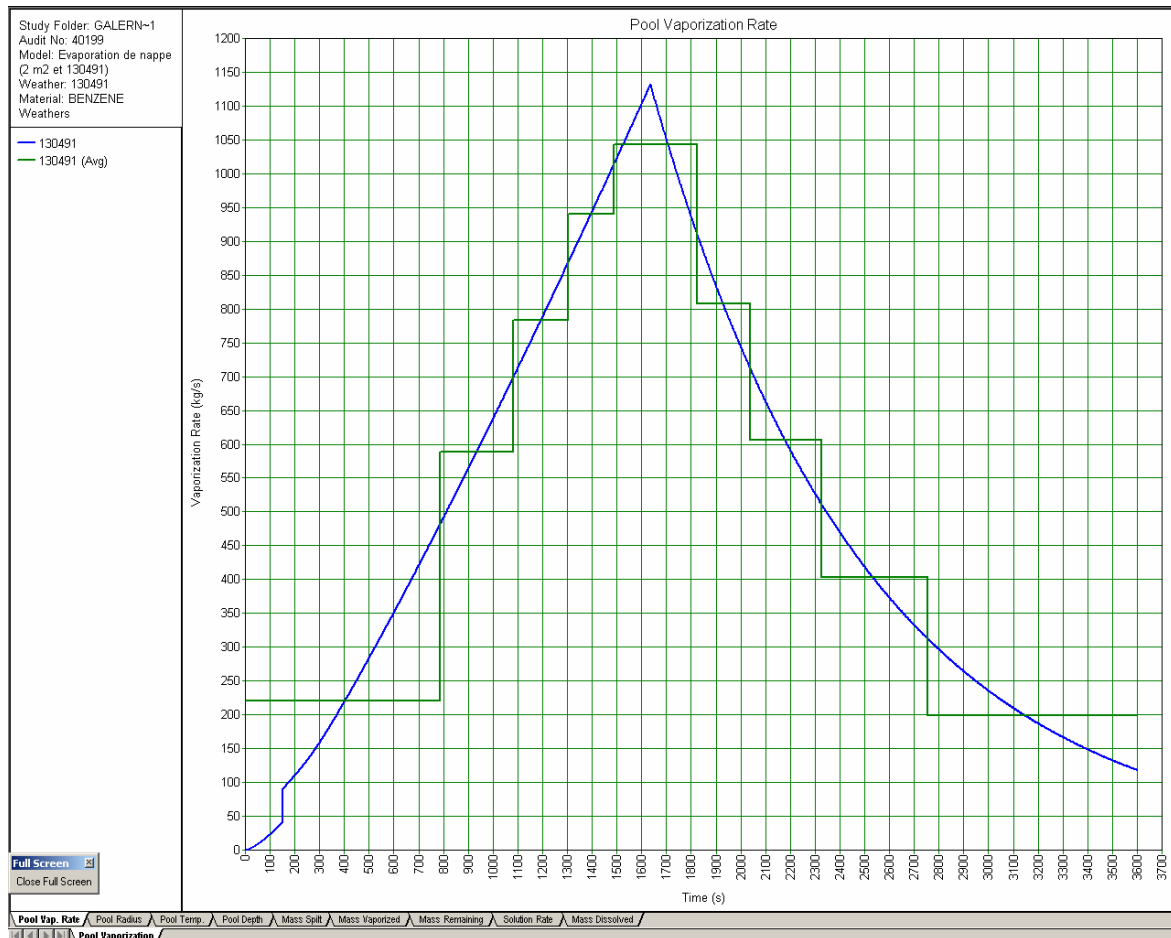
## Masse totale dissoute :



Le taux de dissolution du benzène est considéré égal à 0.018.

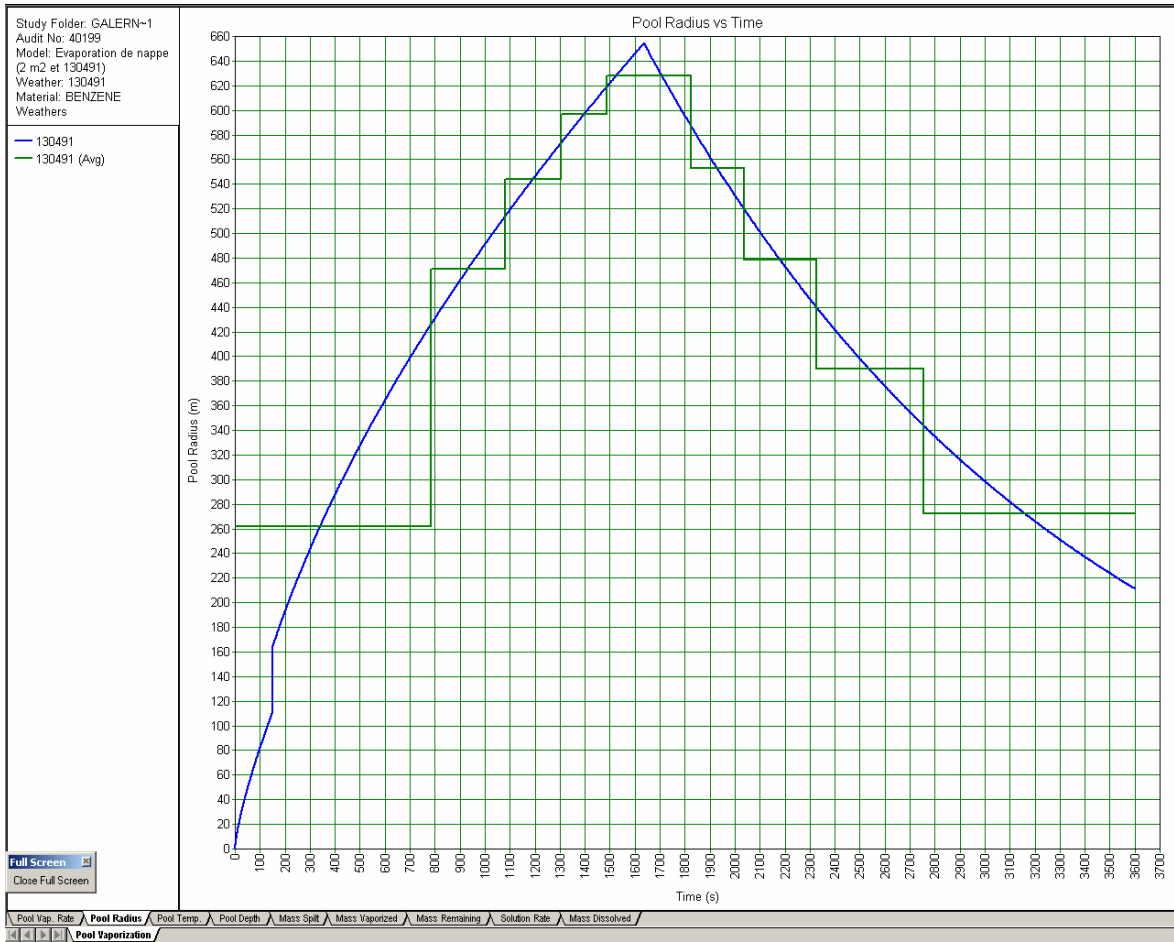
## Scénario c - 2 m<sup>2</sup> - Situation du 13/04/1991

Taux d'évaporation :

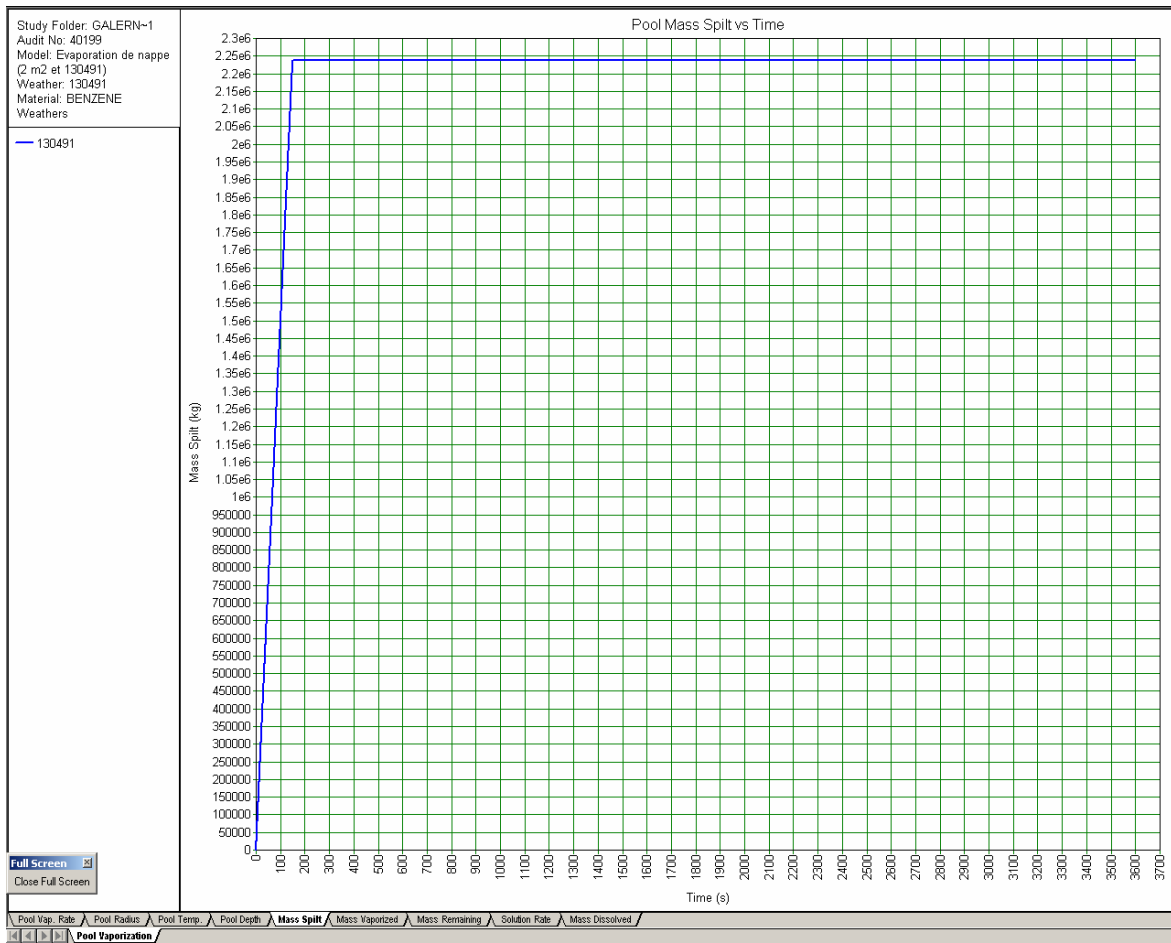


Le débit d'évaporation surfacique est de l'ordre de 0.85 g/m<sup>2</sup>.s.

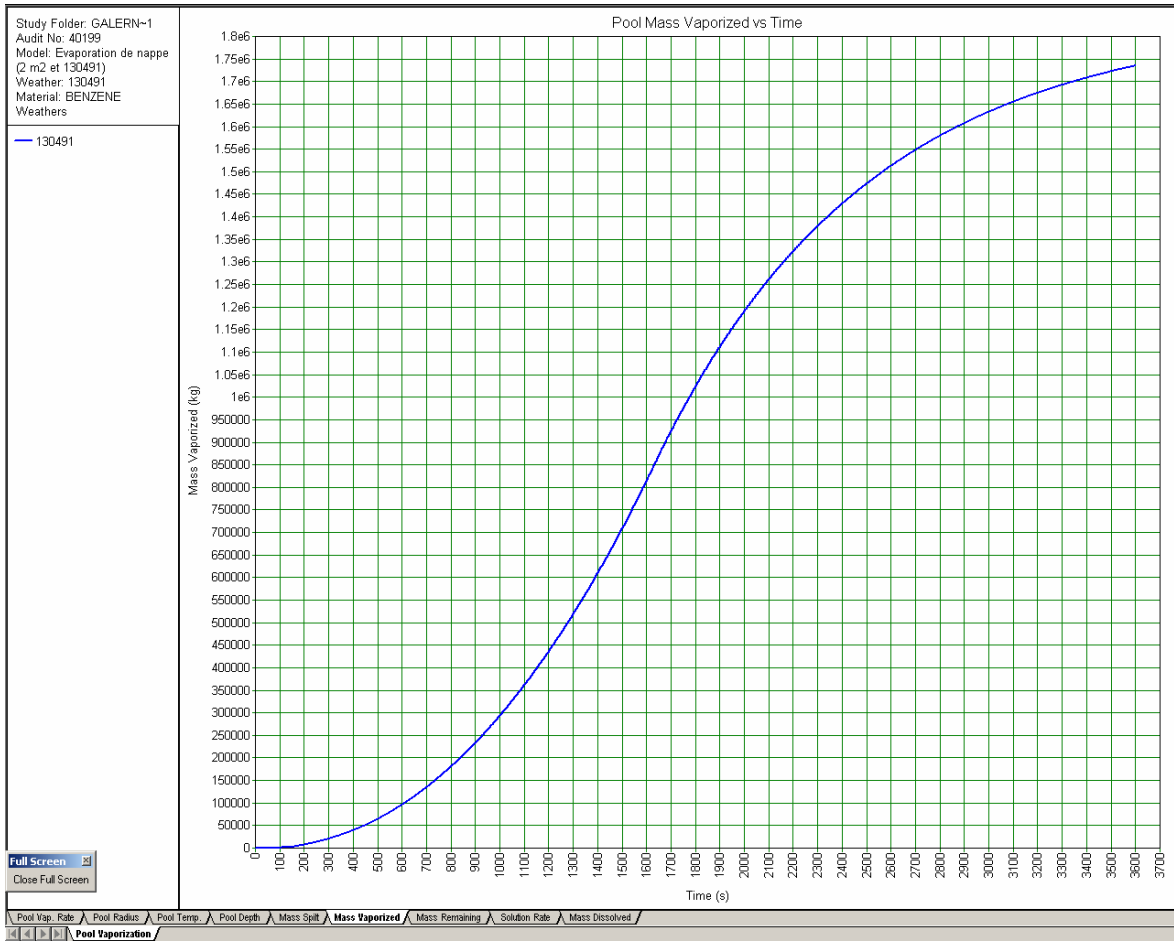
# Rayon de la nappe :



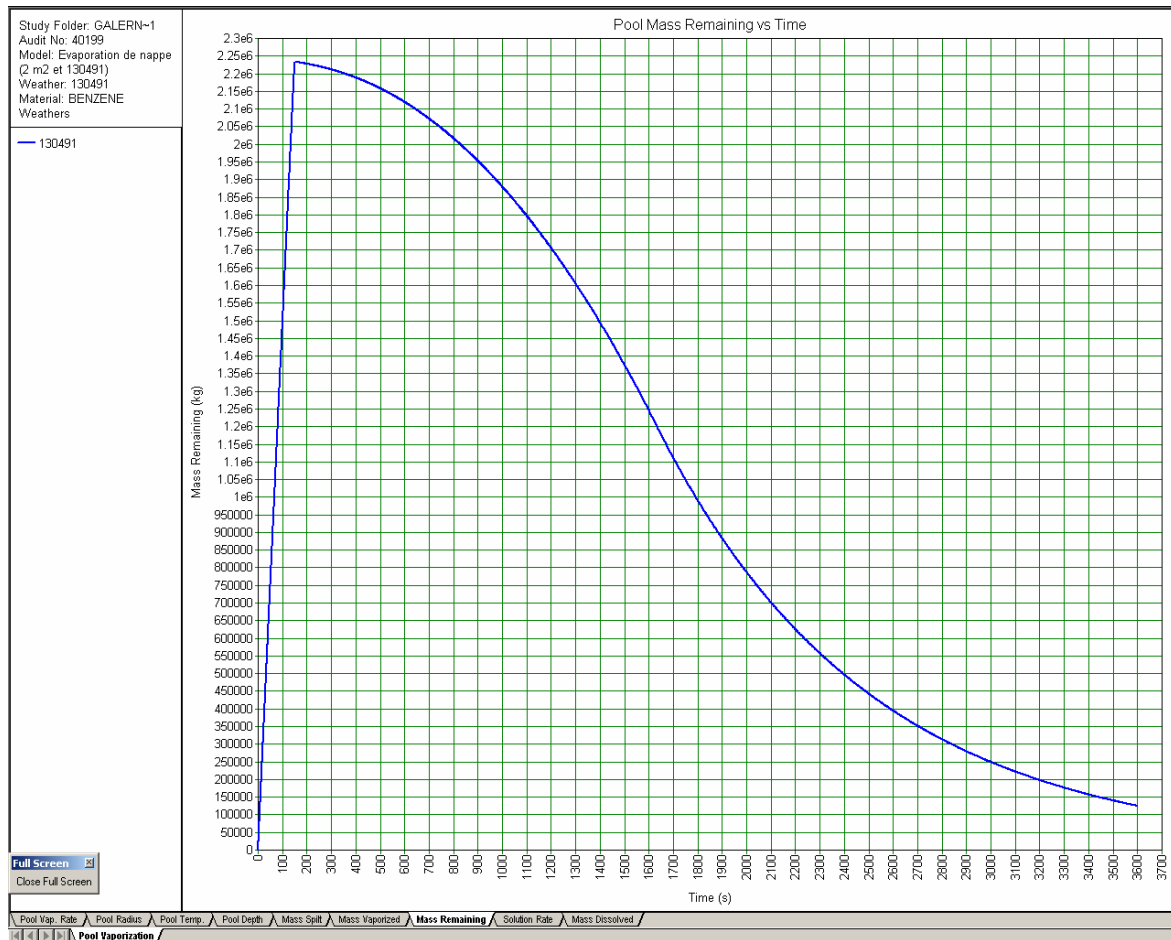
# Masse totale rejetée :



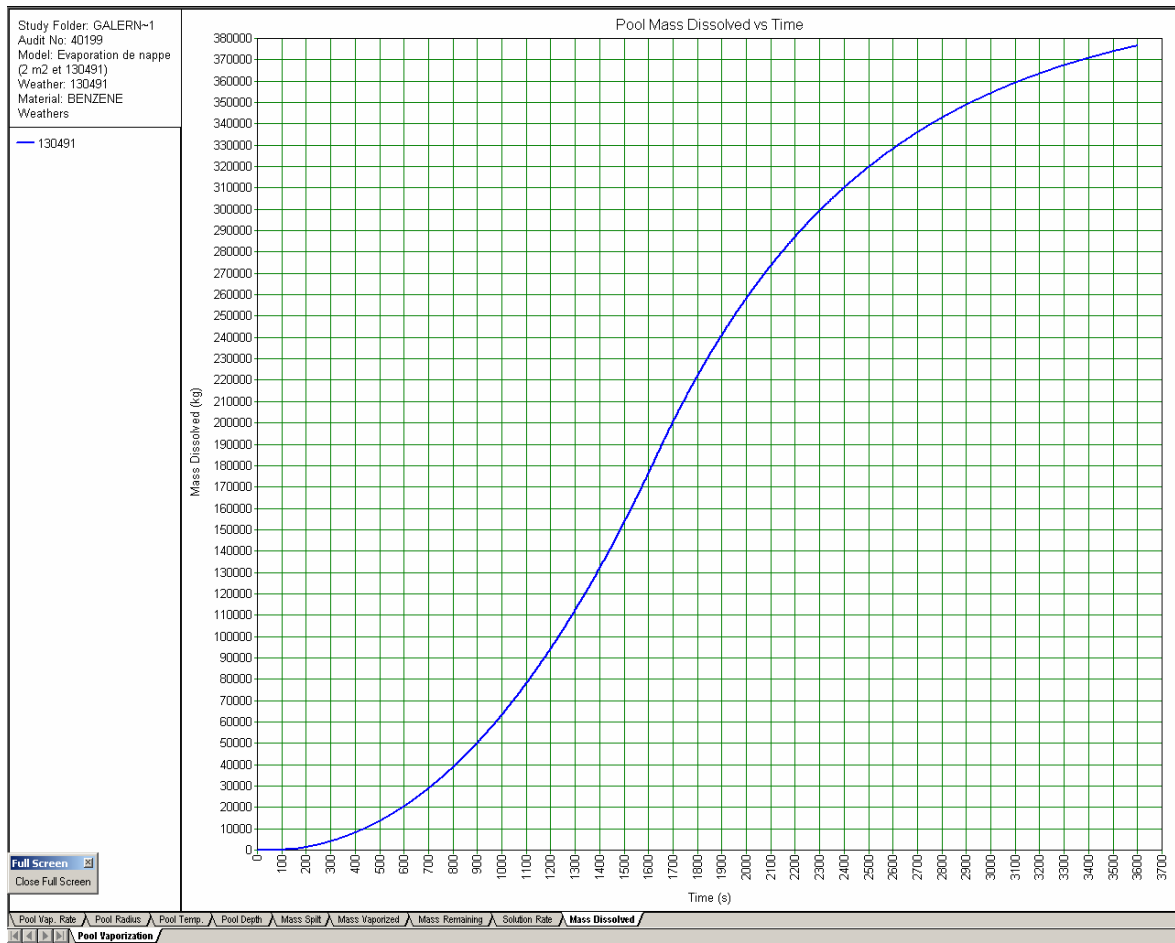
# Masse totale évaporée :



## Masse restante dans la nappe :



## Masse totale dissoute :



Le taux de dissolution du benzène est considéré égal à 0.018.

Scénario 13	BENZENE - Brèche cuve pleine <u>au-dessous</u> de la ligne de flottaison		
	a. « cm <sup>2</sup> »	b. « dm <sup>2</sup> »	c. « m <sup>2</sup> »
Quantité	2500 m <sup>3</sup> / 2200 t		
Section brèche	20 cm <sup>2</sup>	5 dm <sup>2</sup>	2 m <sup>2</sup>
Hauteur liquide <sup>3</sup>	10 m	10 m	10 m
Débit estimé			
Durée de rejet			
Conséquences et risques	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash/VCE
Commentaires	Jet liquide sous l'eau, remontant à la surface		

### 3.4 Outils de calcul

Les outils de calcul au moyen desquels les simulations seront effectuées ont été identifiés. Gaz de France utilisera un outil de type intégral dédié à la dispersion du GNL. Un code de calcul de type CFD dont dispose Gaz de France pourra également être mis en œuvre afin de simuler plus finement la dispersion du nuage de GNL formé au-dessus de la surface de la mer, ainsi que la présence du navire.

L'INERIS prévoit d'employer un outil de calcul "classique" de type intégral permettant l'estimation du terme source et de la dispersion en champ proche pour des substances gazeuses, liquides ou diphasiques.

---

3 La hauteur de liquide est exprimée en mètres de GNL. Elle prend en compte la contre-pression de l'eau de mer (rejet sous 1 m d'eau, soit un équivalent de 2 m de GNL)



#### **4. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Pitblado R., J. Baik, V. Raghunathan (2006)

LNG decision making approaches compared

*Journal of Hazardous Materials* 130 (2006) 148–154.

Hightower, M., Gritzo, L., Luketa-Hanlin, A., Covan, J., Tieszen, S., Wellman, G., Irwin, M., Kaneshige, M., Melof, B., Morrow, C., Ragland, D. (2004)

[Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas \(LNG\) Spill Over Water](#)”

*Sandia National Laboratories. Sandia Report SAND2004-6258, 167 p.*

#### 4.1.1 Liste des annexes

Repère	Désignation	Nombre de pages
Figure 1		1 A4
Figure 2		1 A4
Figure 3		1 A4

# CHAPITRE 2-B



## **TACHE 2.3.2**

# **Dispersion atmosphérique des polluants en champ lointain**

*Etude de la diffusion à partir d'une nappe dérivante*

**Rapport rédigé par :**

**François BONNARDOT, Pierre DANIEL, Julien PAUL, Aline PEUCH**



Le projet GALERNE a été retenu par l'ANR dans le cadre du programme PRECODD géré par l'ADEME. Contrat : n° ADEME : 0594C0064 / n° ANR : ANR-05-ECOT-008-04.

Mars 2009



## Plan du document

<b>1</b>	<b>CONTEXTE DE L'ETUDE.....</b>	<b>4</b>
1.1	Le projet GALERNE .....	4
1.2	Météo-France dans GALERNE .....	4
1.3	Objet du document.....	5
<b>2</b>	<b>PRESENTATION DES MODELES NUMERIQUES UTILISES POUR CETTE ETUDE .....</b>	<b>6</b>
2.1	MOTHY .....	6
2.2	PERLE.....	7
<b>3</b>	<b>LE COUPLAGE MOTHY-PERLE .....</b>	<b>10</b>
3.1	Schéma fonctionnel du couplage.....	10
3.2	Prise en compte de l'évaporation dans MOTHY .....	10
3.2.1	Surface de la nappe de polluant en surface de la mer .....	11
3.2.2	Calcul du taux d'évaporation.....	12
3.2.3	Masse émise dans l'atmosphère et « perdue » en surface de la mer.....	15
3.2.4	« Réduction » de la nappe de polluant .....	15
3.3	Reconstitution du terme source pour PERLE lié à l'évaporation.....	16
3.3.1	Principe, généralités .....	16
3.3.2	Source élémentaire (localisation et taille).....	16
3.3.3	Nombre et masse des particules fictives émises par chaque source élémentaire .	17
<b>4</b>	<b>SIMULATIONS COUPLEES MOTHY-PERLE POUR LES SCENARIOS METTANT EN JEU DES PRODUITS FLOTTANTS EVAPORANTS.....</b>	<b>20</b>
4.1	Scénarios accidentels.....	20
4.2	Situations étudiées .....	20

<b>4.3</b>	<b>Forçage météorologique considéré .....</b>	<b>21</b>
<b>4.4</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>22</b>
4.4.1	Rejet court (15 minutes).....	22
4.4.2	Rejet long (24 heures) .....	25
4.4.3	Synthèse .....	26
<b>4.5</b>	<b>Sensibilité de la dérive de nappe au choix du forçage météorologique en zone côtière .....</b>	<b>27</b>
<b>4.6</b>	<b>Activation du couplage MOTHY-PERLE .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>SIMULATIONS PERLE POUR LES SCENARIOS METTANT EN JEU DES GAZ LIQUEFIES.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Impact de la représentation de la mise en équilibre du gaz avec l'atmosphère environnante .....</b>	<b>32</b>
5.1.1	Méthodologie ; scénarios accidentels et situations météorologiques retenus .....	32
5.1.2	Remarques sur le couplage PHAST-PERLE .....	34
5.1.3	Résultats .....	35
<b>5.2</b>	<b>Evaluation de l'impact possible en champ lointain pour les scénarios mettant en jeu un rejet de « gaz liquéfié ».....</b>	<b>37</b>
5.2.1	Scénarios « rejets courts » (scénarios B et C) .....	38
5.2.2	Scénario « rejet long » (scénario A).....	39
<b>6</b>	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXE .....</b>	<b>44</b>
<b>8</b>	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>52</b>
<b>9</b>	<b>Liste des acronymes.....</b>	<b>54</b>

# 1 CONTEXTE DE L'ETUDE

## 1.1 Le projet GALERNE

Le projet GALERNE (Gaz et Liquides Evaporants et Risques des Nuisances Environnementales et humaines) a été retenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le programme PRECODD (Programme Ecotechnologies et Développement Durable) géré par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Il a débuté le 09/12/2005 pour une durée de 3 ans et 9 mois. Avec pour coordinateur le Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE), GALERNE associe plusieurs partenaires, dont CNRS/GAME-Météo-France.

Le projet GALERNE prend en compte un accident maritime mettant en jeu des chimiquiers transportant une substance dangereuse évaporante ou des gaziers chargés de gaz à l'état liquide : GNL (méthane), GPL (butane, propane), chlorure de vinyle monomère, ammoniac..., transportés en l'état (à la pression atmosphérique et température ambiantes), sous pression ou réfrigérés. En cas d'accident, les gaz émis à partir du navire ou des nappes flottantes présentent des risques importants pour les intervenants et les populations : incendie/explosion du nuage de gaz lui-même ou du gaz encore confiné, et toxicité. L'augmentation de la capacité et du nombre de navires rend cette menace plus aiguë. Pourtant, l'approche, la surveillance et l'intervention sur un navire en difficulté ou sur la pollution générée par un événement quelconque sont délicates et souvent mal appréciées par les intervenants.

Le projet GALERNE a pour but de proposer une évaluation objective du risque présenté et des dispositifs d'intervention et de protection les plus adaptés à la situation. La méthode choisie privilégie l'approche suivante : description des navires et définition des types de produits concernés, choix de scénarios d'accidents de référence et des termes sources, évaluation du comportement des substances déversées (expérimentations et modélisations), et enfin conditions d'intervention de première urgence et modalités de communication au sein d'un comité d'experts mis en place le jour suivant un accident majeur. Le projet est conduit par des organismes experts reconnus, en liaison permanente avec des centres opérationnels.

## 1.2 Météo-France dans GALERNE

Météo-France intervient principalement dans la tâche 2.3.2<sup>1</sup> (responsable : CNRS/GAME-Météo-France ; partenaires impliqués : Marins Pompiers de Brest et CEDRE) qui traite de l'étude de la diffusion atmosphérique. Météo-France est chargé de l'évaluation de la dispersion en champ lointain (c'est-à-dire au-delà des premiers kilomètres).

---

<sup>1</sup> Annexe scientifique au projet GALERNE N°ANR-05-ECOT-008

A partir des scénarios d'accident définis dans la tâche 1<sup>1</sup> du projet et selon les substances chimiques mises en jeu, le travail de Météo-France a consisté à :

- pour les produits liquides « flottants évaporants », simuler la dérive de la nappe de produit liquide déversé en mer lors de l'accident et la dispersion atmosphérique de la partie gazeuse qui s'évapore au fur et à mesure de la dérive de la nappe ;

- pour les gaz liquéfiés, simuler la dispersion atmosphérique en champ lointain à partir des résultats en sortie des simulations en champ proche ;

- analyser les résultats pour les différents scénarios afin d'en évaluer l'impact potentiel pour les équipes d'intervention ou les populations au-delà des premiers kilomètres autour du site accidentel.

La réalisation de la tâche 2.3.2 s'est accompagnée d'échanges avec l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS), chargé de l'étude de la diffusion en champ proche, notamment afin d'assurer une cohérence entre les travaux portant sur le champ proche et le champ lointain.

Au sein du projet GALERNE, Météo-France participe également aux tâches<sup>1</sup> 3.2 relative à l'élaboration des fiches « Intervention » sur bateau et épave, et 3.3 relative à la mise à disposition des données (outil de cartographie dynamique sur Internet).

### **1.3 Objet du document**

Le présent document présente le travail mené et les résultats obtenus dans la tâche 2.3.2<sup>1</sup> de GALERNE.

Les outils de modélisation numérique employés sont tout d'abord présentés dans la section 2 ; il s'agit du modèle de dérive de nappes MOTHY et du modèle de dispersion atmosphérique PERLE développés par Météo-France. Dans le cadre du projet, ces deux systèmes ont été couplés afin d'étudier la diffusion dans l'atmosphère d'un polluant émis à partir de nappes dérivantes. La réalisation technique de ce couplage est décrite en section 3.

Les scénarios d'accident à considérer ont été définis par l'équipe projet. Ils concernent deux grandes catégories de produits : des produits liquides flottants évaporants et des gaz liquéfiés. Dans les deux cas, ces scénarios ont été construits de manière à être « réalistes », en particulier du point de vue des quantités de polluant en jeu.

Pour les produits liquides flottants évaporants, on s'est intéressé au xylène. Les cas d'un déversement rapide et d'un déversement long ont été considérés, sous différentes conditions météorologiques et océanographiques. La section 4 du présent document décrit les simulations réalisées avec le système couplé MOTHY-PERLE et les résultats obtenus. Une étude de sensibilité des résultats à la résolution du modèle météorologique forceur est aussi présentée.

La catégorie des gaz liquéfiés a été étudiée principalement en considérant des rejets d'ammoniac, la dispersion étant modélisée par PERLE (section 5). Une première étape a consisté à s'intéresser à l'impact de la représentation ou non de la phase de mise à l'équilibre du gaz avec l'atmosphère environnante. Dans un second temps, les effets, en particulier sanitaires, d'un accident mettant en jeu de l'ammoniac ont été examinés.



## **2 PRESENTATION DES MODELES NUMERIQUES UTILISES POUR CETTE ETUDE**

### **2.1 MOTHY**

Le modèle MOTHY (Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures) traite la dérive de nappes d'hydrocarbures ([Daniel, 1996], [Daniel et al., 2001], [Daniel et al., 2004]). Il considère une nappe de polluant comme étant composée d'un ensemble de particules indépendantes (au nombre de 480), soumises au courant, à la diffusion turbulente et à la flottabilité. Les particules, toutes de même masse volumique, sont réparties selon une distribution en taille fixe (300 $\mu$ m à 1200 $\mu$ m) (pas de terme de dissolution dans l'eau) ; les grosses particules ont ainsi tendance à rester en surface, alors que les petites particules se déplacent dans la colonne d'eau et sont soumises au cisaillement vertical du courant. La différence de déplacement en fonction de la taille des particules provoque la dispersion de la nappe. Les particules peuvent s'échouer à la côte ou au fond.

MOTHY est constitué d'un modèle d'océan et d'un modèle de nappe. Le modèle d'océan est un modèle 2D couplé à un modèle 1D. Le modèle 2D est forcé par les champs météorologiques dynamiques des modèles numériques de prévision ARPEGE (Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle) ou ALADIN (Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement International) de Météo-France ou encore IFS (Integrated Forecasting System) du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMET), et prend en compte la marée sur certaines zones ; il fournit un courant moyen. Le modèle 1D calcule le profil de courant horizontal à partir d'un profil de viscosité turbulente, sous la contrainte de la tension du vent en surface, du frottement au fond et du courant moyen calculé par le modèle 2D. Le modèle de nappe prévoit ensuite la dérive du polluant sous l'effet du courant horizontal fourni par le modèle d'océan, et en prenant en compte la diffusion turbulente et la flottabilité.

MOTHY fonctionne sur des domaines imbriqués. La résolution la plus fine utilisée usuellement est de 1 mile nautique.

Le système peut aussi être utilisé « à rebours » pour déterminer des dérives inverses, de manière à obtenir des indications spatio-temporelles sur l'origine d'une pollution détectée.

MOTHY a été évalué sur plusieurs accidents et essais en mer. Il a notamment montré sa fiabilité lors des accidents de l'Erika en 1999 ([Daniel et al., 2001]) et du Prestige en 2002 ([Daniel et al., 2004]). Opérationnel depuis février 1994, il peut être activé 24h/24 par un prévisionniste marine au Centre National de Prévisions (CNP) de Météo-France à Toulouse. Il est actuellement utilisé une centaine de fois par an pour des déversements réels de pétrole. En cas d'accident maritime, le soutien météo-océanique apporté par Météo-France couvre, conformément aux missions d'Etat de l'Etablissement et aux engagements internationaux de la France, une grande partie des mers du globe. L'instruction Pollution Maritime (POLMAR) définit le rôle de Météo-France au niveau national ; le Système d'Intervention d'Urgence en

cas de Pollution de la Mer (SIUPM) coordonné par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et la Commission Océanographique Intergouvernementale (COI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) fixe le cadre d'intervention au niveau international.

Par ailleurs, le CEDRE et Météo-France ont mis en place une collaboration technique formalisée par une convention cadre signée en 1996. Cela permet au CEDRE de disposer dans les plus brefs délais des prévisions météorologiques sur la zone touchée et des cartes de dérive de nappes d'hydrocarbures. En retour, le CEDRE, par ses expérimentations et interventions sur pollutions réelles, contribue à l'amélioration et à la validation du modèle.

Le système MOTHY intègrera en 2009 les prévisions météorologiques de méso-échelle du modèle AROME (Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) opérationnel à Météo-France depuis fin 2008. Dans sa version opérationnelle, AROME couvre la France à une résolution de 2,5km environ et met en œuvre une assimilation de données observées à fine échelle.

## **2.2 PERLE**

Le système PERLE (Programme d'Evaluation des Rejets Locaux d'Effluents) a été développé pour simuler la dispersion dans l'atmosphère de polluants passifs émis à partir d'une source ponctuelle, de quelques kilomètres à quelques centaines de kilomètres du point de rejet ([Lac et al., 2004], [Bonnardot et al., 2005], [Lac et al., 2008]). Il est composé d'un modèle météorologique de méso-échelle Méso-NH ([Lafore et al., 1998]), développé conjointement par Météo-France et le Laboratoire d'Aérodynamique (LA), et d'un modèle de dispersion lagrangien particulaire.

Les modèles météorologiques actuellement opérationnels pouvant présenter une résolution insuffisante pour reproduire précisément la structure de la couche limite et les effets locaux (effets côtiers, brise marine...), qui sont des facteurs déterminants pour la dispersion d'un polluant émis en surface, le modèle Méso-NH est utilisé pour modéliser les champs météorologiques et turbulents à échelle fine, sur un domaine limité. Les conditions initiales et les conditions aux limites de ce domaine sont fournies par des modèles opérationnels : ALADIN, dont la résolution horizontale est de l'ordre de 10km, dans la configuration de PERLE actuellement opérationnelle à Météo-France, ou encore ARPEGE ou IFS dans des cas d'étude. Dans la version opérationnelle du système, Méso-NH est mis en œuvre sur 2 grilles imbriquées centrées sur le point de rejet, la première à 8km de résolution couvrant un domaine de 240\*240km<sup>2</sup> et la seconde à 2km de résolution couvrant un domaine de 60\*60km<sup>2</sup> ; 36 niveaux sont utilisés sur la verticale, jusqu'à 17km d'altitude.

Les champs dynamiques et turbulents de Méso-NH alimentent ensuite le modèle de dispersion lagrangien particulaire : SPRAY de Aria Technologies dans la configuration de PERLE actuellement opérationnelle à Météo-France, LPDM (Lagrangian Particles Dispersion Model) de la CSU (Colorado State University) pour les études telles que le projet GALERNE. Dans ce type de modèle, le rejet est discrétisé suivant un grand nombre de particules, dont chacune est soumise, en plus de l'advection et de la turbulence, à une composante stochastique ; il est généralement possible de prendre également en compte le dépôt sec, la

chute gravitationnelle, le dépôt humide et au besoin la décroissance radioactive. Dans le cas de GALERNE, la configuration de LPDM mise en œuvre reste simple (pas de prise en compte des processus de dépôts sec ou humide ou de chute gravitationnelle).

Une déclinaison cohérente du panache est ainsi produite par PERLE sur les deux domaines de simulation à partir des données météorologiques issues des deux grilles imbriquées de Méso-NH. Les champs météorologiques simulés à échelle fine (hauteurs de mélange, profils de vent...) sont également mis à disposition de l'utilisateur afin de mieux appréhender les caractéristiques de fine échelle de l'écoulement et d'estimer les erreurs produites par le modèle par comparaison aux observations disponibles.

PERLE a été évalué sur plusieurs campagnes de mesures : CAPITOU (Gimeno et al., 2008), KINCAID (Olesen, 1994). Ces évaluations ont permis de valider son utilisation pour les besoins de la Cellule Météorologique de Crise (CMC) mise en place à Météo-France notamment en cas de Plan Particulier d'Intervention (PPI) suite à un rejet accidentel de polluants dans l'atmosphère. PERLE est devenu opérationnel en février 2006 ; le système est activable 24h/24 par un prévisionniste du CNP. Au niveau national, en cas d'alerte nucléaire ou chimique, Météo-France fournit une assistance aux autorités dans le cadre de ses missions d'Etat. Des conventions existent en outre avec l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) et Electricité de France (EDF) en cas d'alerte nucléaire, ainsi qu'avec l'INERIS en cas d'alerte chimique. A noter qu'au niveau international, Météo-France Toulouse est Centre Météorologique Régional Spécialisé (CMRS) pour les éco-urgences de l'OMM et, à ce titre, est notifié en cas d'alerte radiologique par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) ; dans ce cadre, toutefois, les exercices ou alertes concernent des phénomènes d'échelle régionale à continentale, voire planétaire, et le CNP met alors en œuvre d'autres types d'outils de modélisation de la dispersion que PERLE (actuellement le modèle MEDIA (Modèle Eulérien de Diffusion Atmosphérique) qui sera remplacé prochainement par la version dédiée à l'accidentel du modèle MOCAGE (Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle)).

Le système PERLE intègrera en 2009 les prévisions météorologiques opérationnelles de méso-échelle du modèle AROME.



### 3 LE COUPLAGE MOTHY-PERLE

Une part importante du travail réalisé à Météo-France a été consacrée au développement du couplage entre les deux systèmes MOTHY et PERLE afin de pouvoir s'intéresser à la diffusion dans l'atmosphère d'un polluant émis à partir de nappes dérivantes. Le schéma fonctionnel du couplage est présenté dans le paragraphe 3.1. La manière de le réaliser techniquement est ensuite précisée ; deux aspects sont plus particulièrement décrits : la prise en compte de l'évaporation dans MOTHY (cf 3.2) et la reconstitution du terme source pour PERLE lié à cette évaporation (cf 3.3).

#### 3.1 Schéma fonctionnel du couplage

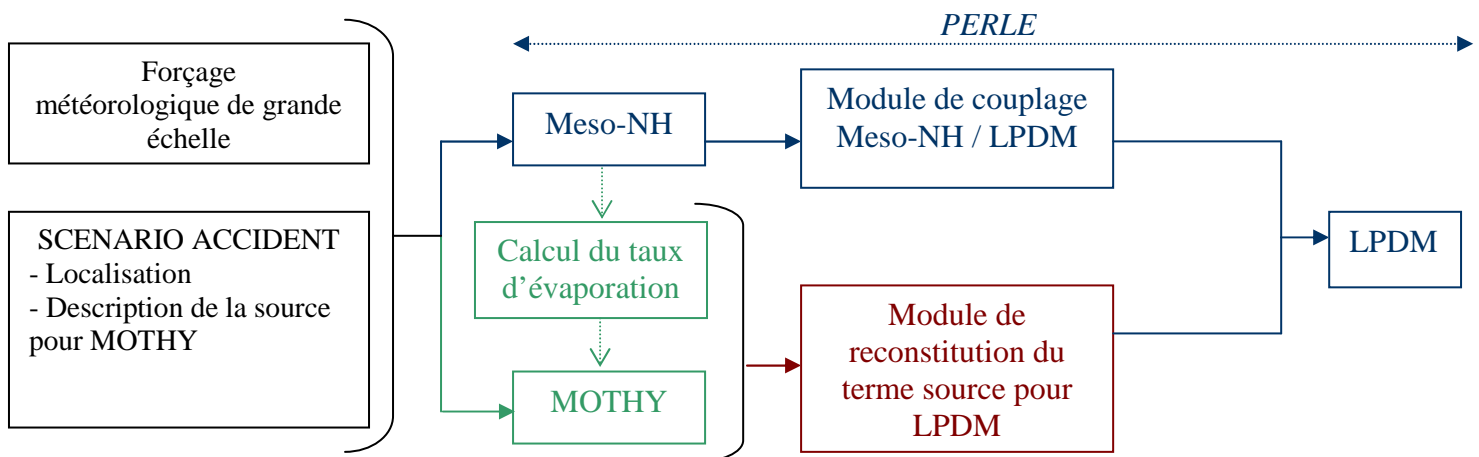


Figure 1 : Schéma fonctionnel du couplage MOTHY-PERLE.

L'essentiel du travail pour réaliser le couplage MOTHY-PERLE a consisté à :

- déterminer le taux d'évaporation au fur et à mesure de la dérive de la nappe en fonction des conditions météorologiques ;
- prendre en compte dans MOTHY cette évaporation qui a des répercussions sur la taille de la nappe et la masse totale dérivante ;
- calculer le terme source, surfacique et mobile, à prescrire à LPDM afin de simuler la dispersion du gaz évaporé dans l'atmosphère.

#### 3.2 Prise en compte de l'évaporation dans MOTHY

Dans sa version d'origine, MOTHY simule la dispersion en mer d'une nappe de polluant sans tenir compte de la possible évaporation de celui-ci. Pour prendre ce phénomène en compte, on commence par déterminer la surface de la ou des nappes de polluant (cf 3.2.1) et le taux d'évaporation (cf 3.2.2). On obtient ainsi la masse de produit émise dans l'atmosphère, et donc perdue à la surface de la mer ; cette masse émise constituera le terme source pour le modèle de dispersion atmosphérique LPDM (cf 3.3). Par ailleurs, on représente d'une manière simple la diminution de la superficie de la nappe de polluant liée à l'évaporation (cf 3.2.4).

### 3.2.1 Surface de la nappe de polluant en surface de la mer

MOTHY est un logiciel particulière qui donne une prévision des trajectoires suivies au cours du temps par les particules fictives représentant le produit dérivant. Il ne fournit donc pas directement la surface de la ou des nappes de polluant en surface de la mer à un moment donné.

Pour estimer cette surface, on définit une grille dont on ajuste les dimensions de manière à recouvrir l'ensemble des particules en surface de MOTHY (Figure 2). Précisément, on commence par définir le plus petit rectangle entourant toutes les particules de MOTHY, puis on « découpe » celui-ci de manière à former une grille de 11\*11 mailles (choix arbitraire). De cette grille on ne conserve ensuite que les mailles contenant effectivement au moins 1 particule MOTHY (Figure 3). Chacune de ces mailles constituera une maille dite « élémentaire » pour reconstituer le terme source global dans LPDM, correspondant au polluant « entrant » dans l'atmosphère.

Au final, connaissant la surface des mailles de cette grille, on a donc une estimation de la localisation et de la superficie de la ou des nappes de polluant en surface de la mer.

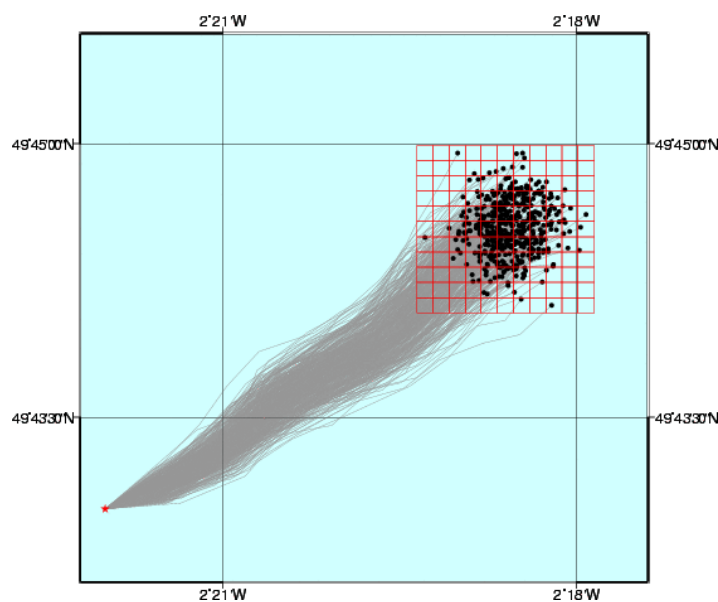


Fig 2 : Grille ajustée aux dimensions de la nappe de polluant simulée par MOTHY. En noir, les positions des particules ; en gris, les trajectoires de ces particules ; en rouge, la grille permettant de recouvrir la pollution.

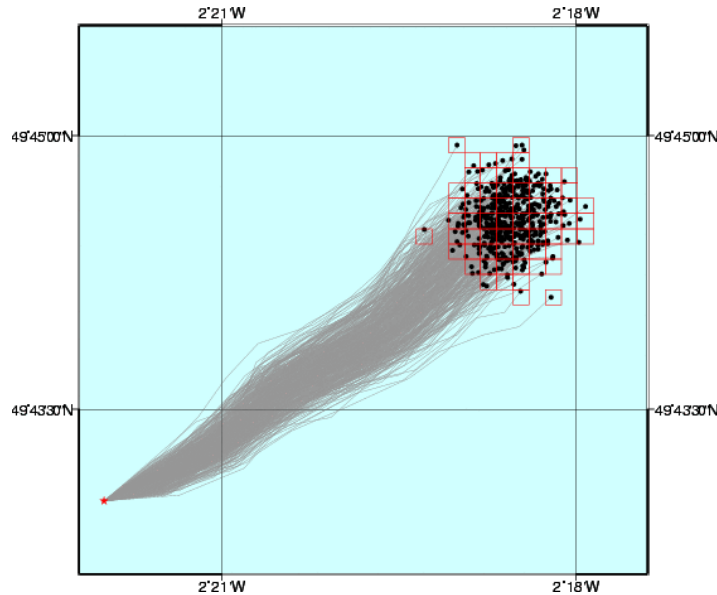


Fig 3 : Maillage retenu pour représenter la nappe de polluant pour une échéance donnée. En noir, les positions des particules, en rouge les mailles retenues.

### 3.2.2 Calcul du taux d'évaporation

Le taux d'évaporation est estimé à partir de la formule d'évaporation par transfert de masse de l'Organisation Néerlandaise pour la Recherche Appliquée TNO, recommandée par l'INERIS dans le cadre de ce projet. Cette formulation est celle de [MacKay and Matsugu, 1973] et convient pour des liquides non bouillonnants.

Son expression est la suivante :

$$Q = 0.00487 * (M * P / (R * T)) * V^{0.78} * X^{-0.11} * (v/D)^{-0.67}$$

avec :

Q : taux d'évaporation ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )

M : masse molaire du xylène ( $106 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )

P : pression de vapeur saturante du xylène (de l'ordre de 1000Pa à 20°C)

R : constante des gaz parfaits ( $8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )

T : température de la nappe (K)

V : vitesse du vent à 10 m ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

X : diamètre de la nappe de xylène (m)

v : viscosité cinématique de l'air ( $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  à 20°C et  $10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  à -20°C)

D : diffusivité de masse du xylène dans l'air ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Pour contourner le manque de données concernant D dans la littérature, on utilise la valeur constante de 0,8 indiquée par TNO pour le quotient v/D.

Par ailleurs, on assimile la température de la nappe à celle de la surface de la mer.



Le taux d'évaporation est ainsi calculé à partir des données météorologiques de vent et de température de la mer simulées par le modèle Méso-NH, et du diamètre de la nappe de polluant estimé par  $X=2*(S/\pi)^{1/2}$  où S est la surface de la nappe. Ce calcul est effectué à pas de temps horaire.

Les paramètres qui, dans notre étude, sont susceptibles de faire varier le taux d'évaporation sont donc la vitesse du vent, la température de la surface de la mer ainsi que la dimension de la nappe.

Les Figures 4 à 6 présentent les variations du taux d'évaporation en fonction d'un de ces paramètres, les deux autres étant fixés à une valeur moyenne. Comme attendu d'après la formule, le taux d'évaporation décroît lorsque la température de la surface de la mer augmente, de même que lorsque le diamètre de la nappe augmente. Au contraire, il croît avec la vitesse du vent.

Au-delà de ces considérations qualitatives, il est intéressant de comparer les variations impliquées par chacun de ces paramètres sur le taux d'évaporation. En effet on observe qu'une variation de 10°K de la surface de la mer fait varier le taux d'évaporation d'environ  $10^{-2} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , et qu'une variation de 1km du diamètre de la nappe entraîne une variation de l'ordre de  $4.10^{-2} \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  du taux d'évaporation. La vitesse du vent a elle un effet relatif plus important puisqu'une variation de  $10\text{m.s}^{-1}$  entraîne une variation de  $0.6 \text{ g.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  du taux d'évaporation. Ainsi, la vitesse du vent apparaît comme le facteur principal de la valeur du taux d'évaporation.

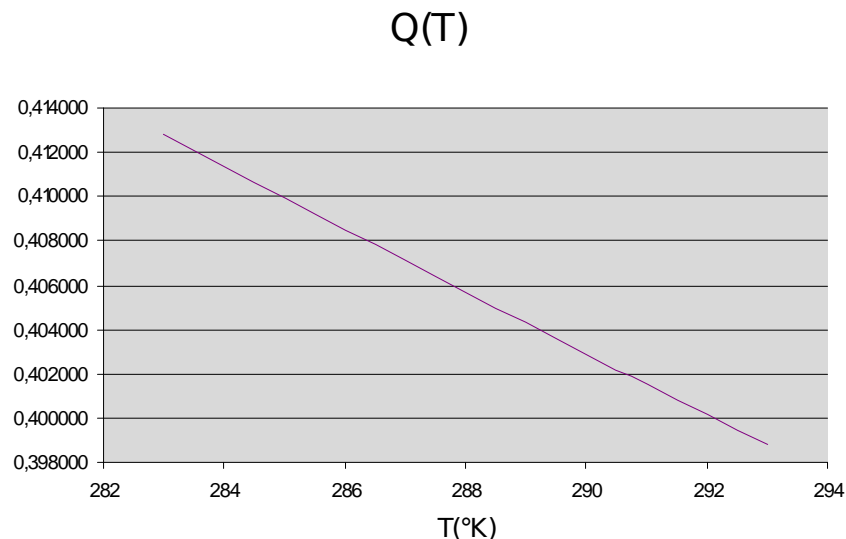


Figure 4 : Variation du taux d'évaporation en fonction de la température de surface de la mer (vitesse du vent fixée à  $5\text{m.s}^{-1}$  ; surface de la nappe fixée à  $1\text{km}^2$ ).



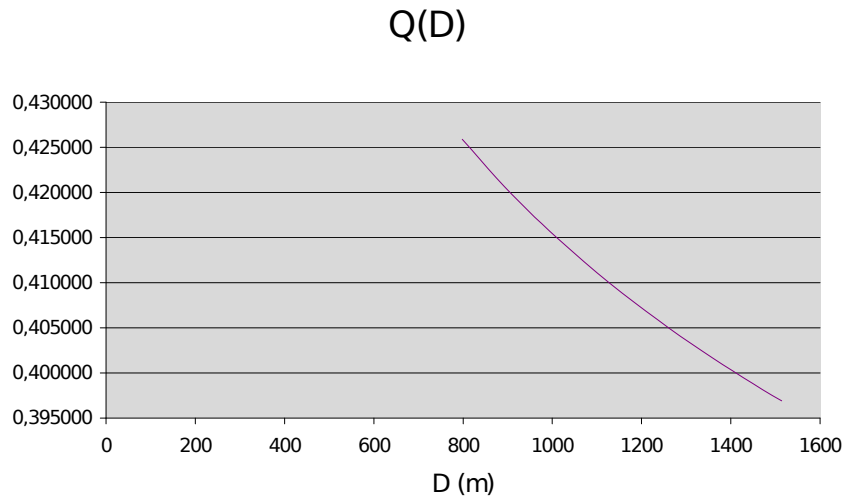


Figure 5 : Variation du taux d'évaporation en fonction du diamètre de la nappe (vitesse du vent fixée à  $5m.s^{-1}$  ; température de surface de la mer fixée à 285K).

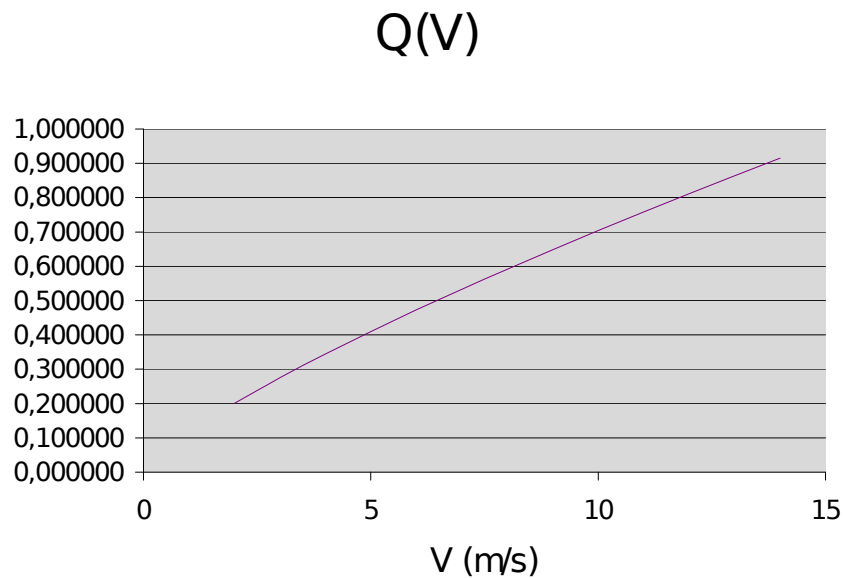


Figure 6 : Variation du taux d'évaporation en fonction de la vitesse du vent (température de surface de la mer fixée à 285K ; surface de la nappe fixée à  $1km^2$ ).

Toutefois, la surface de la nappe et donc son diamètre jouent un rôle important sur la masse émise dans l'atmosphère. En effet le débit massique, qui détermine la quantité de polluant effectivement émise dans l'atmosphère par unité de temps pour l'ensemble de la nappe, est le produit du taux d'évaporation par la surface de la nappe « émettrice ». Ainsi, plus la surface de la nappe est importante, plus le débit massique l'est aussi, et ce dans des proportions importantes (Figure 7).

Au final, le débit massique de polluant dans l'atmosphère dépend donc essentiellement de la dimension de la nappe et de la vitesse du vent.

### Debit massique en fonction du diamètre de la nappe (g/s)

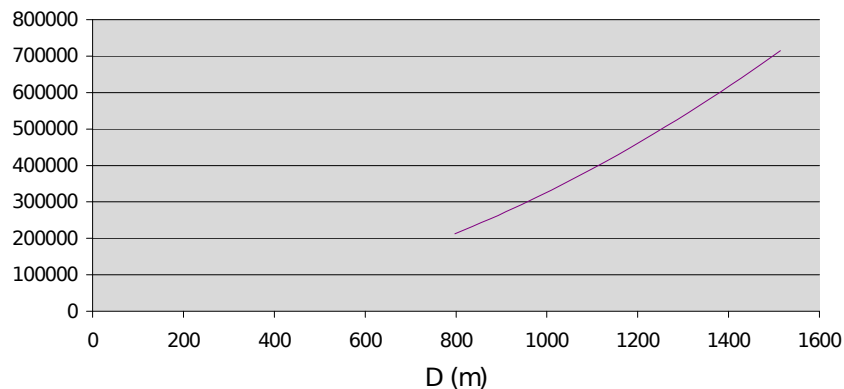


Figure 7 : Variation du débit massique en fonction du diamètre de la nappe.

### 3.2.3 Masse émise dans l'atmosphère et « perdue » en surface de la mer

On fait l'hypothèse simplificatrice que chaque maille de la grille retenue pour définir la nappe de polluant (cf 3.2.1) est totalement recouverte de produit. On déduit de la surface d'une maille et du taux d'évaporation le débit massique d'émission de cette maille :

$$\text{débit} = \text{surface évaporante} * \text{taux d'évaporation}$$

La masse de polluant émise à chaque pas de temps par cette maille est donc :

$$\text{masse} = \text{débit} * \text{pas de temps}$$

L'évaporation de ce produit en surface de la mer doit se traduire par une perte de masse dans MOTHY. En pratique, on impose une diminution de la masse des particules MOTHY en surface, à chaque pas de temps de sortie MOTHY. Cette perte de masse est la même pour toutes les particules au sein d'une maille donnée, la perte totale à un instant donné sur une maille étant égale à la masse émise dans l'atmosphère par cette maille à cet instant.

### 3.2.4 « Réduction » de la nappe de polluant

L'évaporation d'une nappe de polluant est accompagnée, dans la réalité, d'une diminution de la surface de cette nappe due aux phénomènes physico-chimiques (tension de surface...) non pris en compte dans MOTHY. Afin de représenter néanmoins ce phénomène, on a recours à l'« astuce numérique » suivante.

Pour des considérations numériques, on souhaite garder le nombre initial des particules MOTHY et conserver la distribution en taille initiale pour représenter correctement la dérive du produit restant encore en mer. Une particule dont la masse devient nulle ou négative au cours du processus d'évaporation (cf 3.2.3) est donc conservée mais avec des caractéristiques modifiées. D'une part, la particule est re-localisée dans une autre maille, choisie aléatoirement parmi les mailles contenant un nombre de particules MOTHY supérieur à la moyenne (on diminue ainsi la surface de la nappe) (Figure 8). D'autre part, la masse de toutes les particules au sein de cette maille sera ré-initialisée, de manière à conserver la masse totale représentée par les particules avant et après introduction de la particule déplacée au sein de la maille considérée.

### **3.3 Reconstitution du terme source pour PERLE lié à l'évaporation**

#### **3.3.1 Principe, généralités**

Contrairement à la version opérationnelle de PERLE qui considère une source unique, ponctuelle (spatialement) et non mouvante, la version de PERLE pour GALERNE doit gérer une ou plusieurs sources surfaciques qui évoluent dans le temps au fur et à mesure de la dérive des nappes. On s'intéresse aux émissions des nappes en surface uniquement.

La reconstitution du terme source consiste à identifier, à partir des données en sortie de MOTHY, un certain nombre de « sources élémentaires », chacune étant caractérisée par une période de temps correspondant au pas de temps de sortie du modèle MOTHY, et par sa position et son extension géographique. Le nombre de sources élémentaires est variable en fonction de la dispersion de la nappe à la surface de la mer. Puis, à partir de l'estimation des taux d'évaporation, on calcule pour chaque source élémentaire les quantités de produit émises dans l'atmosphère.

Afin de reconstituer le terme source au cours du temps, deux aspects sont donc à considérer :

- la localisation des sources élémentaires qui décrivent la (les) nappe(s) de polluant en surface, ainsi que leurs dimensions (cf 3.3.2) ;
- la quantité de polluant rejetée dans l'atmosphère, qui sera décrite en terme de nombre de particules fictives dans LPDM et de masse de ces particules (cf 3.3.3).

#### **3.3.2 Source élémentaire (localisation et taille)**

Pour des raisons de simplicité et de cohérence dans le couplage, on utilise le maillage défini pour décrire la nappe de polluant dans MOTHY (cf 3.2.1). Ces mailles constituent les sources élémentaires définissant la surface évaporante totale « vue » par PERLE (en rouge sur la Figure 3). On connaît leurs positions ainsi que leur dimensions.

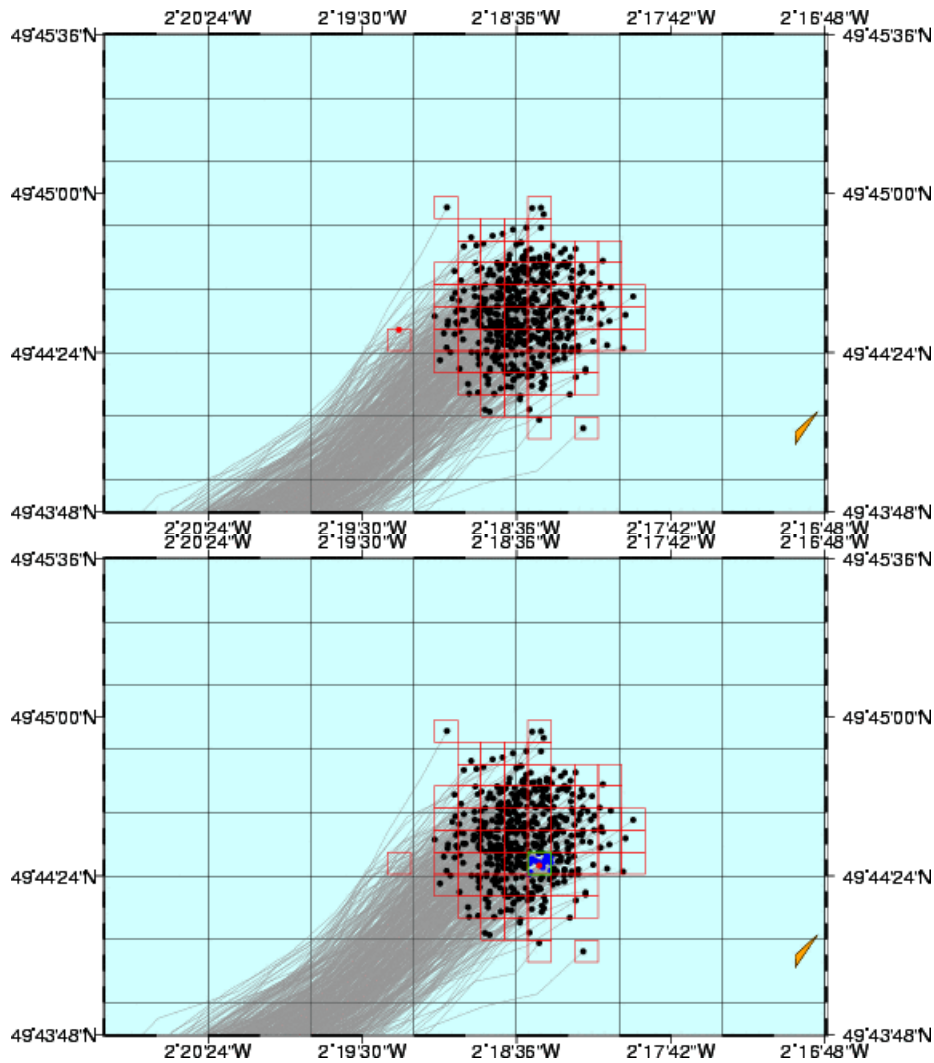


Figure 8 : Re-localisation d'une particule de masse nulle dans une maille choisie aléatoirement parmi les mailles contenant un nombre de particules MOTHY supérieur à la moyenne. En haut : en rouge, une particule de masse nulle à re-localiser. En bas : en bleu, les particules de la maille choisie ; en rouge, la particule re-localisée.

### 3.3.3 Nombre et masse des particules fictives émises par chaque source élémentaire

LPDM étant un modèle particulaire, il simule le rejet et la dispersion d'un polluant dans l'atmosphère au moyen d'un certain nombre de particules fictives soumises à l'advection et à la turbulence ; chaque particule représente une certaine quantité de polluant.

Le nombre total de particules émises dans l'atmosphère est fixé par l'utilisateur. Le choix, arbitraire, est fait de manière à permettre une bonne description du nuage de polluant, tout en conservant un coût raisonnable en terme de temps de calcul. Dans le cadre de GALERNE, il a été choisi d'émettre 3600 particules par heure de simulation.

Par ailleurs, il a été décidé que toutes les particules émises à un instant donné représentent chacune la même quantité de matière. Cette masse unique est déterminée à partir du nombre de particules et de la masse totale à émettre pour l'instant considéré, cette masse totale étant calculée dans le module d'évaporation implémenté dans MOTHY (cf 3.2.3).

Les particules à émettre par LPDM à un instant donné sont finalement réparties sur l'ensemble des sources élémentaires, proportionnellement à la masse émise dans l'atmosphère par chacune d'elles.



## **4 SIMULATIONS COUPLEES MOTHY-PERLE POUR LES SCENARIOS METTANT EN JEU DES PRODUITS FLOTTANTS EVAPORANTS**

### **4.1 Scénarios accidentels**

Deux scénarios d'accident ont été retenus pour étudier la dispersion de produits flottants évaporants :

- un déversement rapide (durée : 15 min) de 2500t de xylène ;
- un déversement longue durée (durée : 24 h) de la même quantité de polluant.

Le xylène est un produit classé comme flottant évaporant et est adapté au couplage mis en place. En effet, l'évaporation est suffisamment lente pour permettre une dérive de la nappe au-delà de quelques centaines de mètres du lieu de déversement.

L'accident est supposé se produire dans une zone à risques, au large de Cherbourg : les Casquets (précisément au point 49°43'N : -2°22'O).

### **4.2 Situations étudiées**

Afin d'évaluer la dispersion sous diverses conditions océanographiques et météorologiques, il a été décidé de simuler les scénarios d'accidents à différentes dates. Le choix de ces dates a été fait en utilisant une base de données issue de travaux antérieurs menés par CNRS/GAME Météo-France et constituée de 95 dates représentatives des différents types de temps sur l'Europe de l'Ouest. Six dates ont été sélectionnées pour illustrer des conditions contrastées en termes de :

- force du vent en surface, paramètre important à la fois pour le processus d'évaporation du xylène dérivant et la dispersion atmosphérique ;
- stabilité des basses couches, facteur jouant fortement sur la dispersion verticale du xylène évaporé ;
- coefficient de marée, paramètre pouvant influencer la dérive de la nappe de xylène.

Dans les critères de choix, on a également considéré la direction du vent : les dates retenues concernent des journées pour lesquelles le vent a une dominante de nord, ceci afin de pouvoir étudier le possible impact du rejet sur les zones côtières (côtes normandes).

Concernant la stabilité des basses couches de l'atmosphère, celle-ci est classiquement caractérisée par les classes de stabilité de [Pasquill, 1961]. Ces classes vont de la classe A pour les situations très instables à la classe G pour les situations très stables. En principe, elles sont définies en fonction de la force du vent en surface et du flux de chaleur sensible à la surface, le flux de chaleur sensible étant estimé par le rayonnement global le jour et la nébulosité la nuit. Toutefois, cette formulation des classes de Pasquill n'est pas adaptée sur

mer, comme expliqué par [Hasse and Weber, 1985]. En effet, sur terre, le flux de chaleur sensible est piloté par le cycle diurne caractérisé par un réchauffement du sol le jour et un refroidissement la nuit. En mer, les échanges thermiques entre la surface et la couche limite atmosphérique sont fortement influencés par la différence entre la température de surface de la mer et la température de l'air au contact de la surface de la mer. Ainsi, c'est le cycle saisonnier qui impose le plus souvent le degré de stabilité de la couche limite atmosphérique. Les conditions stables se retrouvent le plus souvent en été ou au printemps lorsque l'eau en surface tend à refroidir les masses d'air chaudes en contact avec la mer. Inversement, c'est à l'automne et en hiver que l'on rencontre le plus souvent des conditions instables car la mer tend à réchauffer les masses d'air plus froides. On note que de manière générale, le vent tend à modérer la stabilité ou l'instabilité. Au final, dans notre étude, nous avons considéré la formulation des classes de stabilité sur mer proposée par [Hasse and Weber, 1985] pour sélectionner les situations à étudier.

Le Tableau 1 résume les caractéristiques météorologiques et océanographiques pour chacune des six dates sélectionnées. Des figures et diagrammes complémentaires sont fournis en annexe.

Date	Coefficient de marée	Vitesse du vent (m.s <sup>-1</sup> )	Classe de stabilité (Pasquill)	Nébulosité	Température de surface (K)
24/04/1979	95	10,2	D	Peu nuageux à nuageux	282,9
18/10/1980	37	9,8	C	Très nuageux	287,5
04/07/1979	42	2,0	F	Ciel clair, brume possible	288,1
17/10/1985	89	4,5	B	Couvert	288,4
16/04/1984	112	6,6	C-D	Peu nuageux à nuageux	282,6
23/04/1991	50	5,6	E-D	Peu nuageux à nuageux	282,6

*Tableau 1 : Dates de simulation retenues avec leurs principales caractéristiques océanographiques et météorologiques.*

### **4.3 Forçage météorologique considéré**

Les simulations des scénarios accidentels présentés dans la section 4.1 ont été réalisées sur les dates retenues (cf 4.2) en utilisant, pour forçage météorologique de grande échelle, les données de ré-analyse ERA-40 du CEPMMT [Uppala et al., 2005]. Ces données de grande échelle, de couverture globale à la résolution de 1.5° (soit environ 150km), servent au forçage



de MOTHY et sont également utilisées pour initialiser et forcer, sur les bords de son domaine, le modèle de fine échelle Meso-NH dont les champs météorologiques sont ensuite utilisés pour simuler la dispersion atmosphérique avec LPDM.

Ainsi le forçage météorologique utilisé pour simuler la dérive de la nappe de polluant (champ de vent de grande échelle) diffère du forçage utilisé pour simuler la dispersion atmosphérique du produit évaporé (champs de vent et de turbulence de méso-échelle). Ceci pourrait conduire à des incohérences lorsque la contribution des effets locaux sur le champ de vent en surface en particulier (brises côtières, effet du relief...) est non négligeable par rapport à la contribution associée à la circulation de plus grande échelle. Pour les scénarios simulés, dont les résultats sont présentés dans le paragraphe 4.4, le lieu de l'accident se situe au large des côtes normandes, à plus de 40km de la côte ; l'influence de la présence de la côte reste donc limitée et les forçages de grande et de fine échelle demeurent relativement cohérents et ne sont pas de nature à fausser de façon significative les résultats obtenus.

Toutefois, cet aspect est à considérer de près en cas de rejet de polluant à proximité immédiate des côtes. La sensibilité des résultats au choix du forçage météorologique a été examinée sur le cas particulier d'un rejet à l'entrée de la baie de Marseille ; les résultats sont présentés dans la section 4.5.

## **4.4 Résultats**

Les résultats présentés sont dirigés sur les paramètres de sortie qui nous paraissent les plus pertinents pour l'aspect approche de l'équipe d'intervention ainsi que pour l'aspect impact potentiel sur les populations. Nous nous intéressons ainsi au taux d'évaporation et au débit massique, mais aussi à la nappe de polluant en surface, plus particulièrement à sa dimension moyenne, sa persistance et sa distance maximale au point de rejet. Nous considérons également les concentrations maximales simulées dans l'atmosphère pour la couche 0-10m.

Les résultats sont présentés d'abord pour le scénario de déversement rapide (section 4.4.1), puis pour le scénario de déversement sur une longue durée (section 4.4.2).

### **4.4.1 Rejet court (15 minutes)**

Le Tableau 2 fournit des résultats « chiffrés » pour les paramètres mentionnés précédemment. Les Figures 9 et 10 présentent quant à elles des cartes de concentrations dans l'atmosphère simulées pour illustration.

#### **– Persistance de la nappe :**

On observe que l'impact des conditions météorologiques ainsi que de la marée sur la persistance de la nappe est relativement faible. La nappe de polluant disparaît après 60 à 80 minutes pour 5 des 6 dates simulées, et persiste au-delà de 2 heures pour une seule simulation (04/07/1979).

Il semble que les effets combinés de différents paramètres (vitesse du vent, dimension de la nappe, débit massique) se « compensent » (rétro-actions) et qu'il s'établisse une sorte d'« équilibre », qui conduit à cette relative indépendance de la persistance de la nappe aux conditions météorologiques et océanographiques. Ainsi, plus le vent est fort, plus le taux d'évaporation et donc le débit massique est élevé ; mais une évaporation rapide dans l'atmosphère a pour effet de ne pas laisser la nappe s'étendre à la surface de la mer, ce qui joue dans le sens d'une limitation à l'augmentation du débit massique. Inversement, lorsque le vent est faible, le débit massique l'est lui aussi ; ainsi la nappe s'étend, et cette fois l'augmentation de la dimension de la nappe favorise une augmentation du débit massique, contrairement au vent faible. Au final, entre le vent, le débit massique et la surface de la nappe, un équilibre relatif s'établit, aboutissant à un débit massique de polluant vers l'atmosphère et donc à une persistance de la nappe assez similaires quelles que soient les conditions météorologiques et de marée.

Les résultats obtenus pour la simulation du 04/07/1979, à savoir un débit massique nettement plus faible et donc une persistance de la nappe plus importante, apparaissent comme une exception à cet « équilibre » pré-cité. Cela pourrait être dû à la vitesse particulièrement faible du vent moyen lors de cette simulation.

Au final, il semble possible néanmoins de conclure que pour un scénario d'accident impliquant un rejet court, la totalité du polluant devrait être entièrement évaporée dans l'atmosphère en un maximum de deux heures environ.

Date	Débit massique moyen (kg.s <sup>-1</sup> )	Taux moyen d'évaporation (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Concentration maximale (moyennée sur la couche 0-10m) (ppmv)	Persistance de la nappe (minute)	Surface moyenne (km <sup>2</sup> )	Distance maximale atteinte (km)
24/04/79	576,35	0,79	34,73	80	0,76	1,88
18/10/80	775,27	0,72	25,23	60	1,13	2,86
04/07/79	350,23	0,21	81,93	125	1,81	8,43
17/10/85	557,78	0,37	34,03	80	1,57	8,62
16/04/84	666,09	0,52	33,52	60	1,43	6,48
23/04/91	675,57	0,46	40,40	75	1,37	5,71

Tableau 2 : Résultats des simulations couplées MOTHY-PERLE dans le cas d'un accident avec déversement rapide.

#### – Distance parcourue par la nappe :

Comme déjà mentionné précédemment, le produit en mer dérive sur une plus grande distance en cas de vent faible qu'en cas de vent fort. Cependant, dans toutes les situations examinées, la nappe de polluant ne s'éloigne pas de plus de 10km du lieu de l'accident. Ceci constitue un point intéressant concernant une intervention sur zone ou l'impact potentiel sur des populations voisines d'un tel accident.

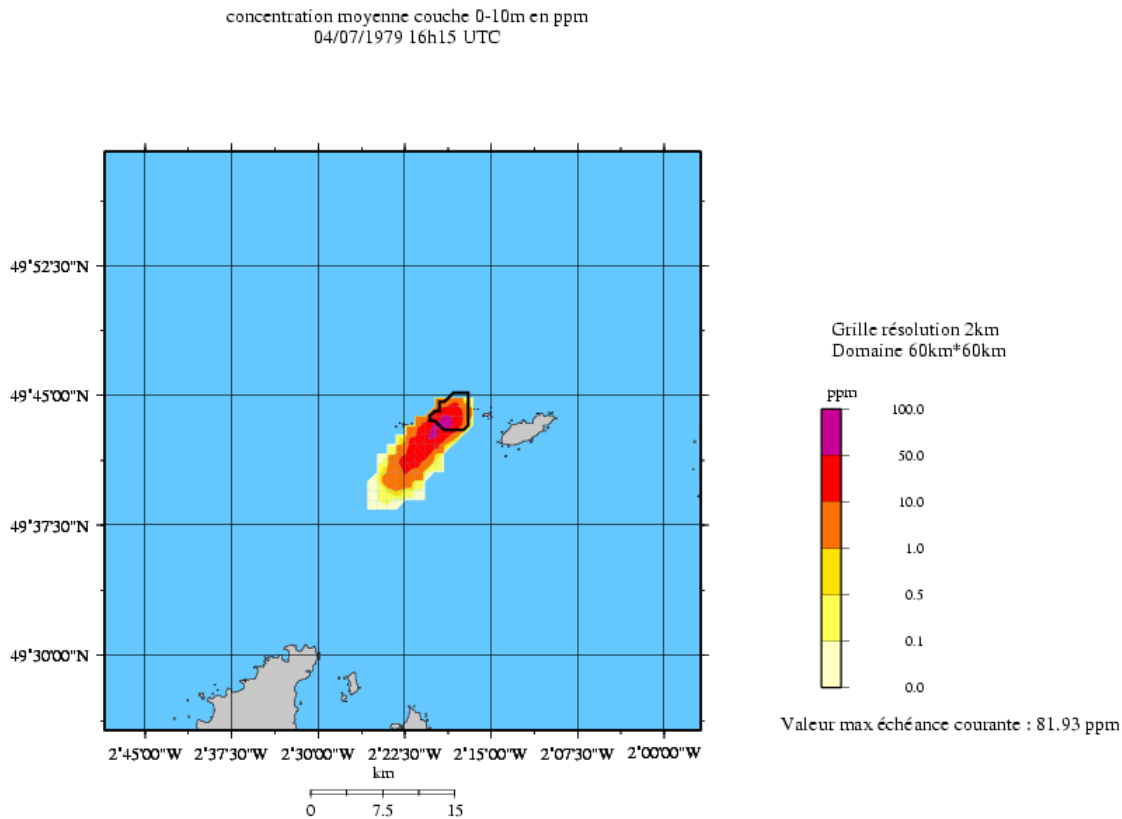


Figure 9 : Concentration moyenne de xylène entre 0 et 10m, à 16h15TU le 04/07/1979, pour un rejet court (15min) débutant à 15h TU aux Casquets. Le trait noir délimite la nappe de polluant à la surface de la mer.

– **Niveaux de concentration dans l'atmosphère :**

Une fois le polluant dans l'atmosphère, l'influence des conditions météorologiques, et tout particulièrement de la vitesse du vent et de la stabilité des basses couches, doit se faire tout particulièrement sentir. En effet, un nuage de polluant soumis à un vent fort (souvent associé à une atmosphère plus instable) se disperse plus rapidement, ce qui conduit à une limitation des niveaux de concentration, tandis que dans le cas d'un vent faible, la dispersion est plus lente, le polluant reste concentré dans une zone géographique moins étendue et les concentrations atteintes sont de ce fait plus élevées.

En fait, dans les simulations réalisées, on constate que les concentrations de polluant dans l'atmosphère ne varient pas de façon importante entre les différentes simulations, malgré des conditions météorologiques contrastées. Seule la journée du 04/07/1979 se distingue des autres avec un niveau maximal de concentration deux fois supérieur aux niveaux maximaux atteints sur les autres journées. Cette journée correspond à une situation sur les Casquets de vent faible et d'atmosphère stable, pour laquelle on aurait pu s'attendre a priori à des concentrations encore plus fortes (les conditions sont très défavorables en termes de

dispersion) ; il s'avère que le faible taux d'évaporation limite la quantité de polluant émise dans l'atmosphère, ce qui atténue le pic de concentration attendu.

Par ailleurs, dans tous les cas simulés par le système couplé MOTHY-PERLE, on note que les concentrations restent inférieures au Seuil d'Effet Réversible SER de 130 ppmv (donnée fournie par l'INERIS).

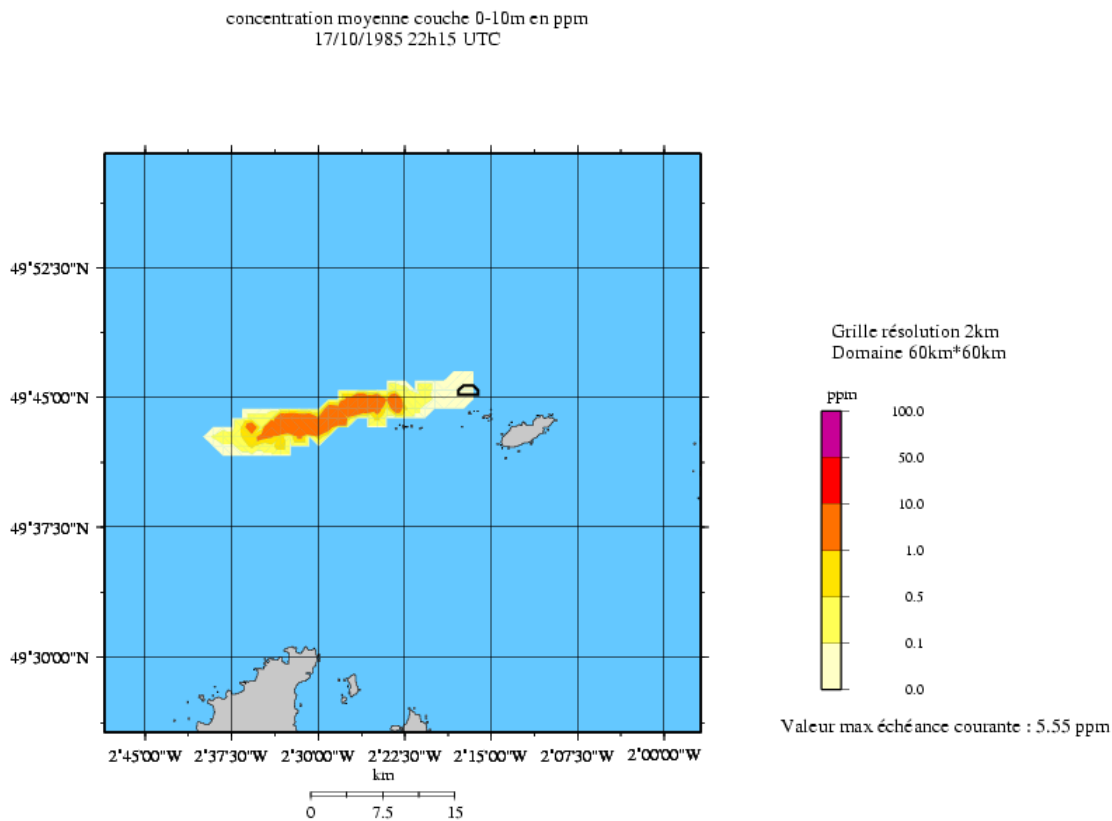


Figure 10 : Concentration moyenne de xylène entre 0 et 10m, à 22h15 TU le 17/10/1985, pour un rejet court (15min) débutant à 21h TU aux Casquets. Le trait noir délimite la nappe de polluant à la surface de la mer.

#### 4.4.2 Rejet long (24 heures)

Le Tableau 3 donne le même type d'information que le Tableau 2 ; toutefois, dans les simulations avec rejet long, la persistance de la nappe n'est pas analysée : le rejet étant continu, les nappes sont constamment alimentées pendant la durée des simulations.

– **Distance parcourue par la nappe :**

Les simulations montrent qu'un rejet long crée non plus une nappe mouvante comme c'est le cas avec un rejet court, mais une « langue » pendant toute la durée de simulation (Figure 11).

Dans toutes les situations étudiées, le produit dérive à une distance qui reste là encore toujours inférieure à 10 km du lieu de l'accident. Cependant, la distance maximale atteinte par le produit en mer s'avère cette fois relativement peu sensible aux conditions météorologiques et océanographiques. Elle varie entre 5,5 et 7,7km environ, alors que la plage de variation va de 1,8 à 8,6km pour les simulations avec déversement rapide.

Date	Débit massique moyen (kg.s <sup>-1</sup> )	Taux moyen d'évaporation (g.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Concentration maximale (moyennée sur la couche 0-10m) (ppmv)	Persistance de la nappe (minute)	Surface moyenne (km <sup>2</sup> )	Distance maximale atteinte (km)
24/04/79	364,18	0,71	30,60	-	0,51	7,73
18/10/80	297,88	0,62	26,20	-	0,53	5,63
04/07/79	169,56	0,18	69,53	-	0,96	6,23
17/10/85	293,37	0,33	38,41	-	0,91	6,62
16/04/84	249,58	0,33	21,98	-	1,02	7,28
23/04/91	240,92	0,34	37,29	-	0,75	5,77

Tableau 3 : Résultats des simulations couplées MOTHY-PERLE dans le cas d'un accident avec déversement lent.

#### – Niveaux de concentration dans l'atmosphère :

Le comportement du polluant dans l'atmosphère est similaire à celui des simulations de rejet court. Ainsi il se disperse plus rapidement lorsque le vent est fort et l'atmosphère instable.

Les concentrations sont plus faibles en moyenne qu'en cas de rejet court, le débit massique étant moindre du fait de la durée du rejet plus longue pour une quantité déversée au total équivalente. Toutefois, ceci n'est pas systématique. Ainsi, on observe des maxima de concentration modélisés légèrement supérieurs à ceux obtenus pour les rejets courts pour les cas des 18/10/1980 et 17/10/1985, qui correspondent aux situations de plus forte instabilité étudiées.

### 4.4.3 Synthèse

Les simulations réalisées indiquent que, quel que soit le scénario (déversement rapide ou sur 24h de 2500t de xylène), le polluant en mer ne devrait pas dériver à plus de 10km du lieu de l'accident. On note toutefois une différence entre les deux types de scénario : alors que la distance maximale parcourue par le produit en mer semble relativement peu sensible aux

conditions météorologiques et océanographiques en cas de rejet long, cette distance apparaît significativement plus grande par vent faible que par vent fort en cas de rejet court. Par ailleurs, les simulations effectuées montrent qu'en cas de déversement rapide, la totalité du polluant devrait disparaître du milieu marin par évaporation en un maximum de deux heures environ.

Les niveaux de concentration de polluant obtenus dans l'atmosphère devraient être sensiblement les mêmes, que le rejet soit court ou long, et que les conditions météorologiques soient plus ou moins propices à une bonne dispersion. Seule une situation de vent faible et d'atmosphère stable, particulièrement favorable à la stagnation du polluant, semble pouvoir conduire à des niveaux significativement plus importants, notamment en cas de déversement rapide. Ceci étant, les niveaux de concentration maximaux atteints dans l'atmosphère devraient rester inférieurs au SER. On rappelle qu'on parle ici de concentrations moyennées sur la couche 0-10m et sur une maille horizontale de 1km<sup>2</sup>.

Néanmoins, pour pouvoir avancer ces conclusions de manière plus affirmative, il serait utile de réaliser un plus grand nombre de simulations et de « qualifier » le système couplé développé sur une ou plusieurs campagnes de mesures.

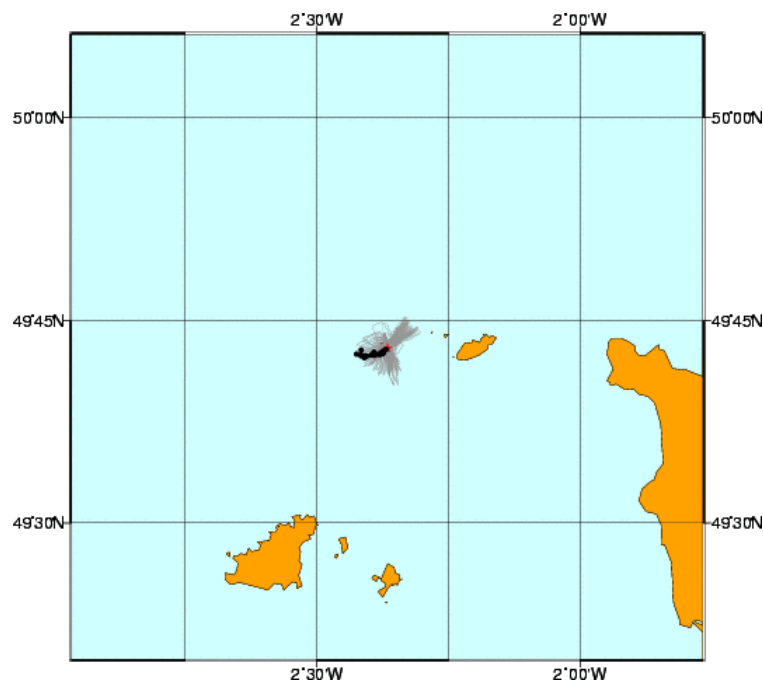


Figure 11 : « Langue » de polluant simulée par MOTHY 15h après le début d'un rejet long (24h) de xylène, le 16/04/1984 à 18h aux Casquets. En noir, les particules MOTHY ; en gris, les trajectoires de ces particules ; en rouge, le lieu de l'accident simulé.

#### **4.5 Sensibilité de la dérive de nappe au choix du forçage météorologique en zone côtière**



L'objet de ce chapitre est d'examiner l'impact de la résolution du forçage météorologique en cas de déversement accidentel à proximité immédiate des côtes. Pour cela, deux simulations mettant en jeu un déversement fictif de 2500t de xylène en 15 minutes à l'entrée de la baie de Marseille ont été réalisées avec le système couplé MOTHY-PERLE. Dans la première, le modèle MOTHY est forcé par les champs de vent de grande échelle fournies par le modèle de prévision IFS du CEPMMT, de résolution 25km environ. Dans la deuxième, MOTHY est forcé par les champs de vent de méso-échelle issus du modèle Mésos-NH, de résolution 2km. La journée choisie est le 2 septembre 2008, le rejet se situe à 12h TU. La Figure 12 présente les deux champs de vent à 10m utilisés pour le calcul de la dérive de nappe dans MOTHY.

Au large de la baie de Marseille, on voit que le vent simulé par les deux modèles est identique (5kt de sud-sud-ouest). Dans la baie de Marseille, les directions sont identiques mais Mésos-NH simule une accélération du vent pour atteindre 10kt. Cette accélération est provoquée par la topographie particulière de la baie de Marseille. La résolution des données de vent issues du modèle du CEPMMT ne permet pas de prendre en compte les effets liés à ce relief.

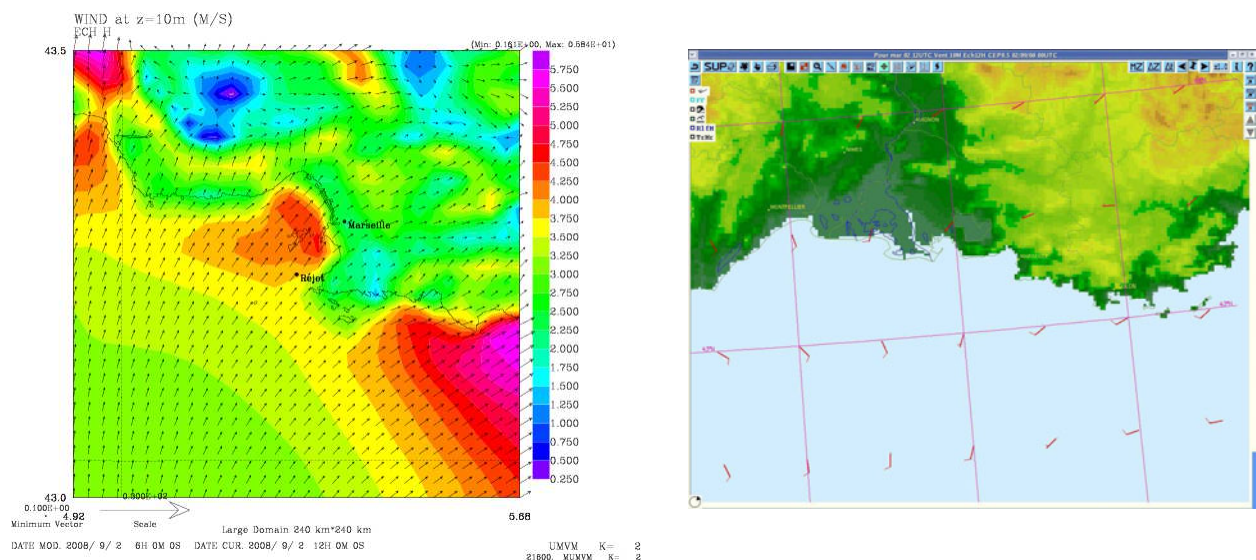


Figure 12 : Champ de vent prévu par Meso-NH (à gauche) et par IFS (à droite) le 02/09/2008 à 12h TU.

Avec le forçage de grande échelle (IFS), la nappe de xylène s'étale sans réellement dériver (Figure 13). Le xylène est totalement évaporé 1h30 après le début du déversement. Le panache issu de l'évaporation traverse le centre-ville de Marseille. Avec le forçage de petite échelle (Mésos-NH), la nappe de xylène se divise rapidement en deux. La plus grosse partie de la pollution dérive très vite vers l'est pour aller s'échouer sur la côte après 30 minutes. La surface évaporante est alors moindre et l'évaporation se fait plus lentement. L'axe principal du panache est décalé de quelques kilomètres vers l'est et la ville de Marseille reste en bordure des plus fortes valeurs de concentration.

La dérive de la nappe est sensible au forçage météorologique utilisé. D'un côté, la nappe reste en mer et s'évapore totalement ; de l'autre, la nappe vient s'échouer sur la côte. Pour ces deux simulations, même si les concentrations dans l'air restent faibles (inférieures à

50 ppmv), l'impact potentiel sur l'environnement et les zones touchées sont très différents, avec possiblement de fortes répercussions sur le travail des équipes d'intervention.

Cet exemple illustre donc l'intérêt a priori d'utiliser un forçage météorologique de fine échelle, susceptible d'appréhender la complexité de l'écoulement atmosphérique, pour simuler la dérive de la nappe lorsque le déversement se situe à proximité d'une zone côtière, et particulièrement si celle-ci présente une topographie complexe.

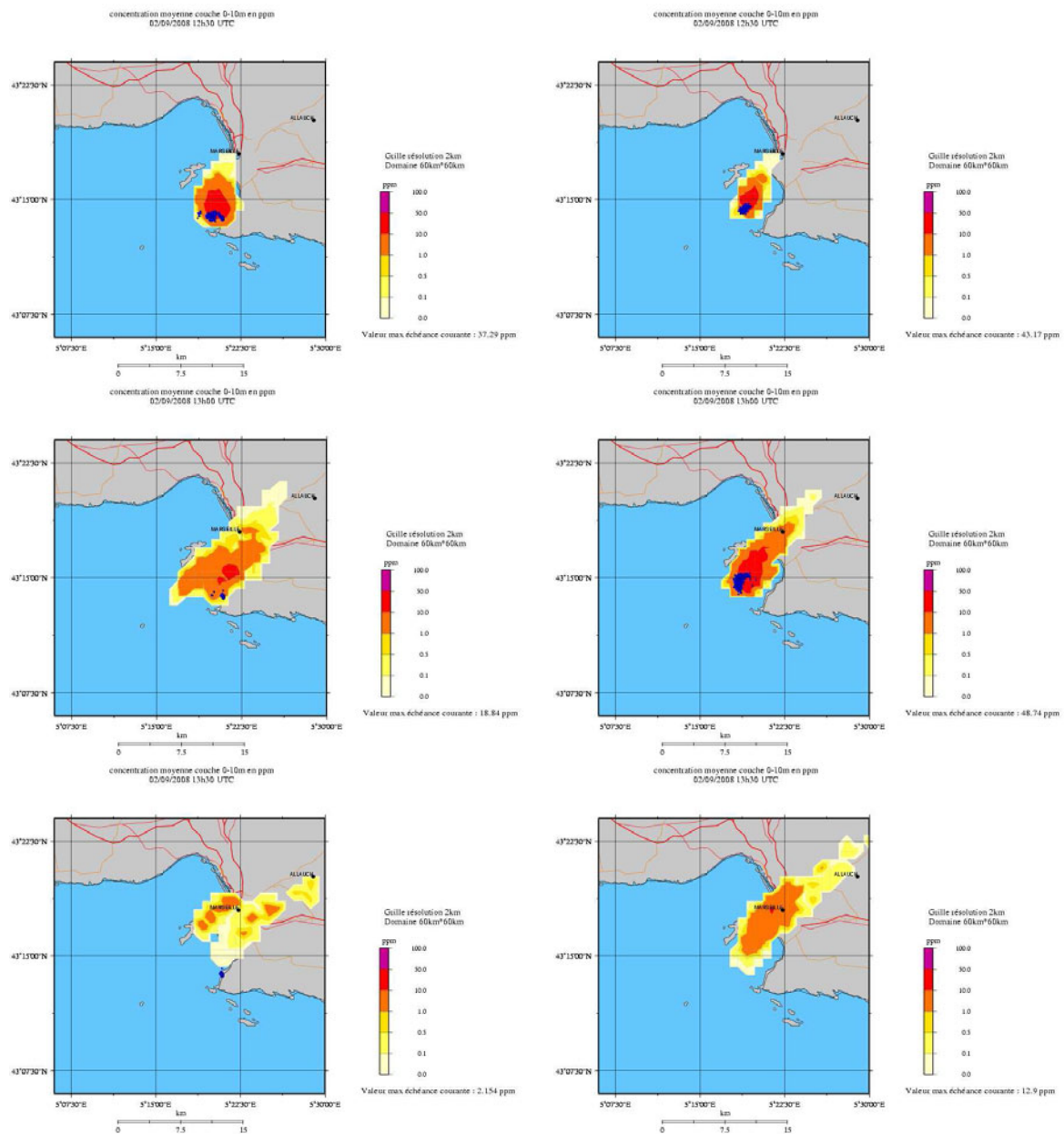


Figure 13 : Nappe en surface de la mer (en bleu) et panache de polluant, 30mn (en haut), 1h (au milieu) : 1h30 (en bas) après le début du rejet, simulé par le système couplé MOTHY-PERLE forcé par Méso-NH (à gauche) et forcé par IFS (à droite).



## **4.6 Activation du couplage MOTHY-PERLE**

La chaîne de calcul faisant intervenir les différents modèles du couplage (MOTHY, Méso-NH et LPDM) a été développée sur cluster de PC Linux. L'enchaînement des différentes étapes de calcul est géré à l'aide d'une interface web (Meso-NH application). Bien que non opérationnel, le système couplé peut être activé en mode étude ou post-accidentel lorsque le scénario accidentel met en jeu du xylène. L'activation se fait simplement en saisissant dans un fichier texte les caractéristiques de l'accident : position du navire, date et heure de début du déversement, durée du rejet, quantité rejetée. Le temps de réponse du système est assez variable.

Les sorties du système ont été adaptées et mises à différents formats SIG (shape de point et de ligne, arcinfo ASCII grid (asc), image Géotiff, KML (google earth)). Des fichiers tests de ces sorties ont été fournis au CEDRE dans le cadre du plan de transfert des informations numérisées (tâche 3.3 du projet GALERNE).



## 5 SIMULATIONS PERLE POUR LES SCENARIOS METTANT EN JEU DES GAZ LIQUEFIES

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la dispersion atmosphérique en champ lointain de rejets de gaz liquéfiés tels que l'ammoniac, le propane ou le chlorure de vinyle. Pour cela, on a effectué des simulations avec le système PERLE.

Dans sa configuration standard, PERLE simule la dispersion d'un gaz dans l'atmosphère en le considérant comme un traceur passif, c'est-à-dire en ne tenant pas compte des éventuels processus physico-chimiques pouvant se produire lors de la mise en contact du gaz avec l'atmosphère ; la dispersion du gaz est alors uniquement pilotée par les processus de transport dans l'atmosphère (advection de grande échelle, convection, mouvements turbulents). Pour un gaz non ou peu réactif, l'hypothèse d'un comportement proche de celui d'un traceur passif est en fait valable après un certain temps correspondant à la phase de mise à l'équilibre du gaz avec l'air environnant. La durée de cette mise à l'équilibre dépend de la nature du polluant considéré, de son conditionnement et du scénario de rejet envisagé (température du polluant, pression, vitesse d'éjection, effets de densité...), et va se produire sur une distance de quelques centaines de mètres voire quelques kilomètres du lieu accidentel.

Dans une première étape, nous avons examiné l'impact sur la dispersion en champ lointain de la représentation ou non de la phase de mise à l'équilibre du gaz avec l'atmosphère environnante (cf section 5.1). Ensuite, l'impact en champ lointain de rejets d'ammoniac a été examiné ; les résultats sont présentés dans la section 5.2.

### ***5.1 Impact de la représentation de la mise en équilibre du gaz avec l'atmosphère environnante***

#### **5.1.1 Méthodologie ; scénarios accidentels et situations météorologiques retenus**

Cette étude a été menée en collaboration avec l'INERIS. Pour représenter la phase de mise en équilibre du gaz avec l'environnement, nous avons pris en compte dans PERLE les résultats de simulation en champ proche réalisées par l'INERIS avec le logiciel PHAST ([Witlox, 2005]). PHAST permet de simuler la dispersion de gaz, liquides et gaz liquéfiés, non passifs, jusqu'à une distance de 10 km, en l'absence d'obstacles importants et de relief, et en considérant des conditions météorologiques constantes dans le temps et l'espace au cours de la simulation.

Comme PERLE traite la dispersion en champ lointain avec des conditions météorologiques évoluant au cours de la simulation, il était difficile, pour des raisons de cohérence, d'exploiter dans PERLE les résultats de PHAST obtenus pour les scénarios de rejet long (24h) (scénario A), qui correspondent à une brèche de faible section (quelques cm<sup>2</sup>) dans

la coque du navire accidenté. Pour cette étude, nous nous sommes donc limités à des scénarios de rejet très court quasi-instantané (sur 1 à 2 min) (scénario C) ou court (sur environ 1h) (scénario B), qui correspondent à des brèches de 2m<sup>2</sup> et 5dm<sup>2</sup> respectivement.

Le produit considéré est l'ammoniac. Pour la dispersion en champ lointain, il a été décidé de se focaliser sur ce produit en raison de ses faibles seuils de toxicité et de perception. Les autres substances envisageables comme le propane ou le chlorure de vinyle présentent des seuils bien plus élevés, qui ne seront en fait pas dépassés en champ lointain compte-tenu des quantités rejetées retenues dans les différents scénarios.

Parmi les 6 dates sélectionnées pour les simulations effectuées avec le système couplé MOTHY-PERLE, 3 situations ont été conservées pour les simulations par PERLE (en effet, le facteur « marée » considéré pour l'étude menée avec le système couplé n'intervient pas dans le cas où on s'intéresse uniquement à la dispersion atmosphérique) : il s'agit des 04/07/1979 (vent faible, conditions stables), 17/10/1985 (vent faible à moyen, conditions instables) et 23/04/1991 (vent moyen, conditions neutres).

Le Tableau 4 résume les caractéristiques des scénarios accidentels et situations météorologiques considérés (6 cas au total).

Date	Taille de la brèche	Quantité d'ammoniac rejeté	Durée du rejet	Intitulé du scénario
04/07/1979	5 dm <sup>2</sup>	3600t	1h10	B
04/07/1979	2 m <sup>2</sup>	3600t	103s	C
17/10/1985	5 dm <sup>2</sup>	3600t	1h10	B
17/10/1985	2 m <sup>2</sup>	3600t	103s	C
23/04/1991	5 dm <sup>2</sup>	3600t	1h10	B
23/04/1991	2 m <sup>2</sup>	3600t	103s	C

Tableau 4 : Caractéristiques des simulations réalisées.

Le principe du couplage des deux systèmes PHAST et PERLE consiste à « récupérer » en sortie de PHAST le panache de polluant une fois celui-ci devenu passif et à utiliser ce résultat comme terme source pour PERLE. Concrètement, les résultats de PHAST sont matérialisés par une ou plusieurs boîtes (parallépipèdes rectangles) déterminées en utilisant un ou plusieurs seuils de concentration dans l'air. La Figure 14 illustre la méthode ; pour plus de détails, se reporter à [Pénelon et Antoine, 2009]. A noter que lors du processus de représentation du panache en boîtes, la conservation de la masse de polluant n'est pas garantie ; par exemple, pour le cas présenté dans la Figure 14, seules 3200t d'ammoniac sont contenues dans les boîtes retenues sur les 3600t émises. On procède donc à un ré-ajustement en ajoutant dans chaque boîte une quantité de polluant de manière à obtenir au final les 3600t souhaitées.

Pour chacune des dates et chacun des scénarios retenus, deux simulations ont été réalisées. L'une dite de contrôle consiste à réaliser la simulation PERLE « standard », sans tenir compte de la phase de mise en équilibre : l'ammoniac est considéré comme un gaz passif dès son éjection dans l'atmosphère. La seconde représente la mise en équilibre, par le couplage PHAST-PERLE décrit précédemment. La comparaison de ces deux types de simulations dans différentes conditions nous permet d'estimer la sensibilité du système

PERLE à la prise en compte ou non des transformations physico-chimiques du polluant considéré.

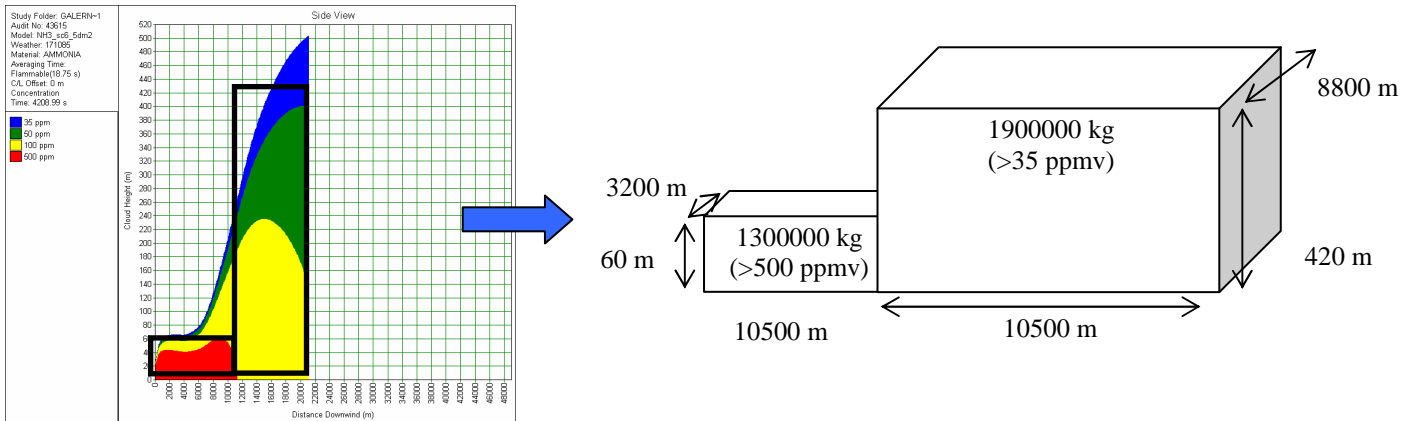


Figure 14 : Exemple de représentation du panache en sortie de PHAST (schéma de gauche) à l'aide de deux parallélépipèdes rectangles (schéma de droite) pour un rejet correspondant au scénario B.

### 5.1.2 Remarques sur le couplage PHAST-PERLE

Le couplage mis en oeuvre entre les deux modèles présente quelques limites qu'il convient de préciser.

Tout d'abord, le couplage est très sensible aux différents critères choisis pour traduire le panache issu de PHAST en une ou plusieurs boîtes contenant tout ou partie du polluant. Une simplification trop importante de la géométrie du panache en sortie de PHAST mène inévitablement à un lissage artificiel des valeurs de concentration et peut masquer le dépassement de certains seuils critiques. Ce lissage se répercute alors dans la diffusion en champ lointain. Lorsque la répartition spatiale du polluant au sein du nuage simulé par PHAST présente de fortes inhomogénéités, il convient de décrire ces discontinuités en discrétisant le nuage en plusieurs zones correspondant à des seuils de concentration présentant un intérêt en terme d'impact sur l'homme ou l'environnement. Cependant, la multiplication du nombre de boîtes nécessiterait la mise en place d'un algorithme spécifique, ce qui n'est pas l'objet de cette étude. Des tests de sensibilité au choix des critères appliqués ont été menés. De façon générale, la discrétisation en 2 boîtes permet une description suffisante du panache pour la dispersion en champ lointain du fait du lissage opéré ensuite par PERLE lors du calcul de concentration sur un maillage de 2km de résolution. Dans certains cas, l'ajout d'une boîte supplémentaire s'est toutefois avéré nécessaire en raison de la forte extension horizontale du panache.

Par ailleurs, dans la mesure du possible, la transition entre la diffusion en champ proche et la diffusion en champ lointain s'opère lorsque le polluant est considéré comme passif par le logiciel PHAST, mais cela n'a pas toujours pu être réalisé. Le caractère passif du gaz est en

effet déterminé selon des critères de différences de densité et de vitesse de déplacement entre le nuage de polluant et l'air environnant. Or ce critère de passivité du transport est parfois atteint à des distances supérieures à celles considérées en principe comme limites d'utilisation de PHAST et qui sont de l'ordre de 10km. Par exemple, pour le scénario C sur le 17/10/1985, le critère n'est vérifié qu'à plus de 18km du navire accidenté. Nous avons donc été amenés, dans certains cas, à effectuer le couplage PHAST-PERLE avant la mise en équilibre totale du nuage avec l'atmosphère ambiante. Ceci a tendance à diminuer les différences obtenues entre les simulations de contrôle et celles mettant en œuvre le couplage PHAST-PERLE.

### 5.1.3 Résultats

On compare ici les résultats issus de la simulation de contrôle (PERLE seul) avec les résultats issus de la simulation réalisée en utilisant les boîtes fournies par l'INERIS comme termes sources pour PERLE (PHAST-PERLE). Les comparaisons portent sur l'extension horizontale du panache (représentée par la surface qu'il recouvre), la dispersion verticale (appréhendée par les valeurs de concentrations maximales obtenues sur 3 niveaux verticaux) et ces valeurs de concentrations maximales. Ces paramètres sont considérés deux heures après le début du rejet (première échéance disponible après le couplage PHAST-PERLE). Les résultats sont synthétisés dans le Tableau 5 pour chacune des dates et chacun des scénarios retenus.

Date	Polluant	Scénario	Surface (km <sup>2</sup> )			Concentration maximale (ppmv)		
			10m	100m	500m	10m	100m	500m
04/07/79	Ammoniac	B	288	147	0	900	222	0
		B contrôle	64	66	0	2675	771	0
		C	384	276	0	752	208	0
		C contrôle	30	55	0	10423	2572	0
17/10/85	Ammoniac	B	336	443	22	227	172	64
		B contrôle	144	129	7	726	434	40
		C	375	355	77	190	205	83
		C contrôle	37	44	44	423	1222	486
23/04/91	Ammoniac	B	332	332	0	366	236	0
		B contrôle	188	118	0	469	366	0
		C	258	266	0	189	175	0
		C contrôle	88	78	0	1228	1526	0

Tableau 5 : Surface du panache de polluant et concentration maximale atteinte, deux heures après le début du rejet, à différentes altitudes, pour les différentes simulations.

Les Figures 15 et 16 présentent les panaches modélisés en surface deux heures après le début du rejet, pour 4 des 12 simulations. Dans ces Figures, l'échelle de représentation du nuage de polluant se base sur les seuils Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) de niveau 1, 2 et 3 définis par l'American Industrial Hygienist Association (AIHA) pour l'ammoniac. Le seuil ERPG-1, établi à 25 ppmv, correspond à la concentration maximale en-deçà de laquelle on considère que pratiquement tout individu peut être exposé jusqu'à 1h sans



éprouver d'effets sanitaires autres que transitoires ou bénins ou sans ressentir une gêne olfactive importante. Le seuil ERPG-2, fixé à 150 ppmv, est la concentration maximale en-deçà de laquelle on considère que pratiquement tout individu peut être exposé jusqu'à 1h sans ressentir ou développer des effets sanitaires ou symptômes irréversibles ou graves qui pourraient amoindrir leurs capacités de réaction. Enfin, le seuil ERPG-3, de 750 ppmv, est la concentration maximale en-deçà de laquelle on considère que pratiquement tout individu peut être exposé jusqu'à 1h sans ressentir ou développer des effets sanitaires pouvant être mortels. Les seuils ERPG, destinés à être utilisés pour les situations d'urgence, ont été retenus pour l'étude car ils ont été jugés plus adaptés au contexte d'intervention des secours en mer que les valeurs de toxicité aiguë, typiquement plus élevées, déterminées au niveau français pour la maîtrise de l'urbanisation.

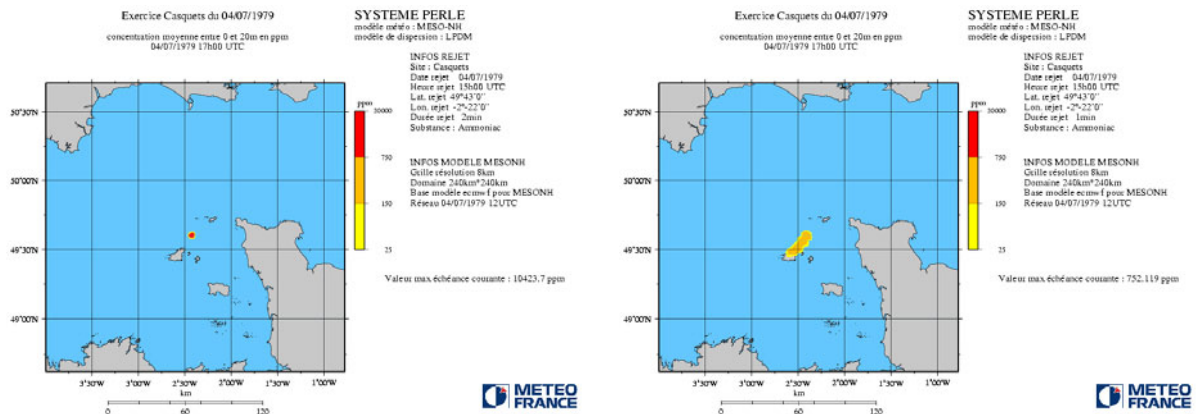


Figure 15 : Nuage simulé dans le scénario C contrôle (à gauche) et dans le scénario C (à droite), le 04/07/1979 à 17h TU, deux heures après le rejet. Vent faible, conditions stables.

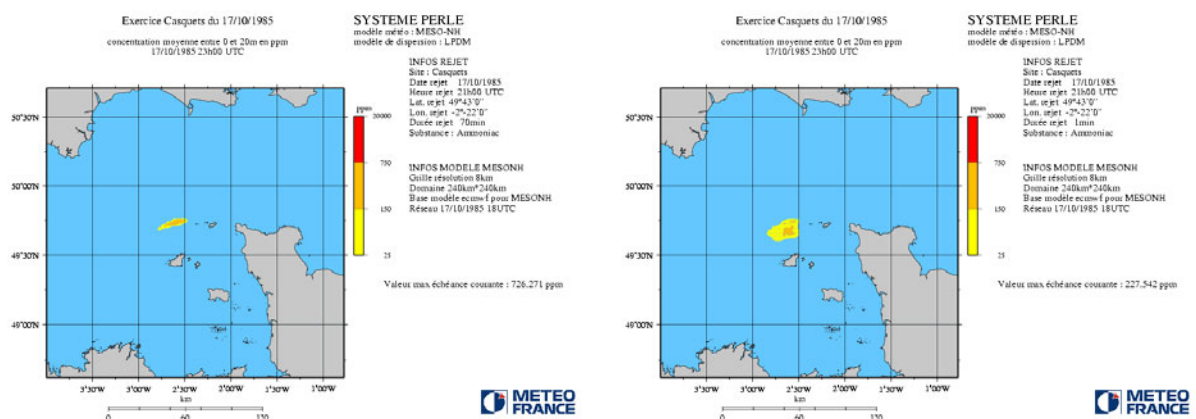


Figure 16 : Nuage simulé dans le scénario B contrôle (à gauche) et dans le scénario B (à droite), le 17/10/1979 à 23h TU, deux heures après le rejet. Vent faible à moyen, conditions instables.

– **Extension horizontale :**

Quelles que soient la date et la durée du rejet, on observe des différences de comportement similaires entre les simulations de contrôle et les simulations PHAST-PERLE.

Les nuages simulés par PERLE seul sont systématiquement moins étendus sur l'horizontale, d'un facteur 3 à 4 en moyenne si on exclut les cas extrêmes pour lesquels on observe jusqu'à un ordre de grandeur dans les surfaces des panaches simulés (voir pour exemple les Figures 15 et 16). Par conséquent, les concentrations maximales sont généralement plus élevées dans les simulations de contrôle ; on relève même ponctuellement des concentrations plus de 10 fois supérieures.

Plus en détail, on note des différences selon le type de scénarios envisagés (B ou C), ceci quelles que soient les conditions de stabilité atmosphérique. On observe en effet que si le nuage est dans tous les cas sous-dimensionné horizontalement dans les simulations de contrôle, cette sous-estimation est beaucoup plus marquée dans le cas d'un rejet très court (environ 1min). La surestimation des concentrations dans ces simulations est, pour ce type de scénarios, très importante (d'un ordre de grandeur environ). L'incidence de la non prise en compte des interactions entre le gaz et l'atmosphère sur la dispersion du polluant semble donc être beaucoup plus forte dans le cas d'une mise en contact brutale du produit avec l'environnement.

– **Extension verticale :**

En ce qui concerne l'extension verticale des panaches, on note que bien que les rejets des simulations de contrôle soient effectués dans un parallélépipède rectangle de  $1\text{m}^3$  seulement, les nuages simulés atteignent des altitudes comparables à celles des nuages obtenus par les simulations PHAST-PERLE. Après 1 à 2 heures, le mélange vertical, principalement piloté par la diffusion turbulente dans la couche limite atmosphérique, a « fait son effet » et tend à gommer les différences de conditions initiales liées à l'absence ou non de prise en compte des effets de la densité du gaz rejeté.

– **Synthèse :**

Les résultats obtenus montrent que l'hypothèse de « traceur passif » retenue dans les simulations de contrôle conduisent à une sous-estimation systématique de l'étendue du nuage de polluant et par conséquent à une surestimation des concentrations dans l'air. En ce qui concerne l'extension verticale, il semble que l'absence de prise en compte des caractéristiques du polluant et de son conditionnement n'ait plus ou peu d'impact après 1 à 2 heures, les effets du mélange turbulent devenant prédominants sur ceux développés au cours de la phase de mise en équilibre du polluant avec l'air environnant.

## ***5.2 Evaluation de l'impact possible en champ lointain pour les scénarios mettant en jeu un rejet de « gaz liquéfié »***

Dans cette partie comme dans la section 5.1, on se focalise sur les rejets d'ammoniac. On s'intéresse d'abord à des cas de rejets courts (5.2.1) puis à des rejets longs (5.2.2).

Pour les autres produits envisagés (propane, chlorure de vinyle), les valeurs de concentrations obtenues dans le champ lointain au-delà de 10km s'avèrent, quelles que soient



les conditions météorologiques envisagées, nettement inférieures aux seuils de dangerosité pour l'homme et dans tous les cas inférieures au seuil olfactif. Les résultats obtenus pour ces produits ne sont donc pas détaillés.

### 5.2.1 Scénarios « rejets courts » (scénarios B et C)

Le Tableau 6 présente les maxima de concentration d'ammoniac obtenus pour chacun des deux scénarios (B et C) de rejet d'ammoniac décrits dans le paragraphe 5.1.1 et pour les trois dates retenues pour représenter différentes conditions météorologiques. Ces résultats sont issus des simulations réalisées à partir du couplage PHAST-PERLE.

Date	Scénario	Rejet + 2h		Rejet + 4h		Rejet + 6h	
		Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)	Concentration maximale (ppmv)	Distance au rejet (km)
04/07/79	B	900	20	577	40	428	75
	C	752	20	614	40	318	75
17/10/85	B	227	20	146	50	88	70
	C	190	30	254	60	169	80
23/04/91	B	366	20	149	60	144	100
	C	189	40	144	75	116	100

Tableau 6 : Concentration maximale et distance du centre du panache au point de rejet, à différentes échéances, pour les différentes simulations.

En termes de dépassement des seuils de concentration d'intérêt pour la santé des équipes d'intervention ou des populations, on note une sensibilité importante aux conditions météorologiques. Ainsi, la concentration maximale 2h après le début du rejet est près de 4 fois supérieure dans la situation du 04/07/1979 particulièrement propice à la stagnation du polluant (vent faible, basses couches de l'atmosphère stables) par rapport aux autres cas étudiés. Pour la journée du 04/07/1979, le seuil ERPG-3 de 750 ppmv est en fait dépassé durant 3h jusqu'à une distance de 30km du site accidentel. Dans les simulations réalisées, seules les conditions de cette journée permettent un dépassement de ce seuil critique en dispersion champ lointain. Le seuil de 150 ppmv (ERPG-2) est quant à lui atteint et/ou dépassé quelles que soient les conditions météorologiques jusqu'à 4h après le rejet, entre 40 et 75km de la source.

Inversement, on note une faible sensibilité de l'impact en champ lointain au scénario de rejet choisi (B ou C). Alors qu'on aurait pu s'attendre a priori à des concentrations supérieures pour le scénario C (rejet plus rapide d'une quantité de polluant identique), on constate en effet que les niveaux de concentrations sont relativement comparables pour les deux scénarios. Ceci peut s'expliquer par le fait que les simulations réalisées par l'INERIS avec le logiciel PHAST montrent un

étalement horizontal du produit plus important lors d'un rejet très rapide que lors d'un rejet moins brutal (sur 1h environ).

## 5.2.2 Scénario « rejet long » (scénario A)

Le scénario A concerne un rejet long (sur 24h environ) correspondant à une brèche d'une surface de 20 cm<sup>2</sup>. Pour les raisons indiquées au paragraphe 5.1.1, ce scénario n'a pas fait l'objet d'un couplage entre PHAST et PERLE. Les résultats présentés ici sont donc issus de simulations PERLE seul. Néanmoins, dans le scénario A, l'ammoniac est rejeté lentement ; l'hypothèse de traceur passif utilisée dans PERLE est donc sans aucun doute moins pénalisante que pour les scénarios de rejet plus rapide dans l'atmosphère, même si on peut s'attendre à une légère surestimation des niveaux de concentration obtenus. Les dates considérées pour le scénario A sont les mêmes que pour les rejets courts (04/07/1979, 23/04/1991 et 17/10/1985).

Comme attendu, les niveaux de concentration atteints en champ lointain (au-delà de 10km) pour le scénario A sont inférieurs à ceux obtenus pour les scénarios B et C, du fait d'un déversement plus lent permettant une dispersion en continu du produit sur une plus grande période mais pour une quantité totale d'ammoniac restant au final identique. Ainsi, le seuil ERPG-3 de 750 ppmv n'est jamais atteint au-delà de 10km du lieu du sinistre pour les trois dates considérées (Tableau 7). Le seuil ERPG-2 est atteint avec une durée d'exposition de 1 à 2 heures uniquement pour la journée du 04/07/1979 qui est la plus défavorable en terme de dispersion atmosphérique (voir aussi la Figure 17). Enfin, le seuil ERPG-1 de 25 ppmv est dépassé dans un rayon de 40km autour du site accidentel pour la journée du 04/07/1979, avec de possibles durées d'exposition allant jusqu'à 6 heures. Pour la date du 17/10/1985 correspondant à des conditions propices à la dispersion, le seuil de 25 ppmv n'est dépassé que dans un rayon de 20km autour du site accidentel, avec une durée d'exposition comprise entre 1 et 2 heures (Figure 18).

Date	Seuil (ppmv)	Durée d'exposition maximale (en h) au-dessus du seuil de concentration, en fonction de la distance au point de rejet			
		10-20km	20-40km	40-80km	80-120km
04/07/79	25	6	2	0	0
	150	2	1	0	0
	750	0	0	0	0
23/04/91	25	2	1	0	0
	150	0	0	0	0
	750	0	0	0	0
17/10/85	25	1	0	0	0
	150	0	0	0	0
	750	0	0	0	0

Tableau 7 : Durée d'exposition maximale au-dessus des trois seuils ERPG en fonction de la distance au point de rejet, pour les différentes simulations.

Il convient de noter que les durées d'exposition obtenues sur ces trois cas sont données à titre uniquement indicatif mais qu'il ne s'agit pas de valeurs que l'on pourra généraliser. Les durées d'exposition sont en effet fortement dépendantes des changements de direction du vent pendant la période de rejet. Si le vent est stationnaire, la durée d'exposition va avoir tendance à augmenter sur la zone sous le vent, mais la région impactée par la pollution accidentelle sera plus limitée géographiquement.

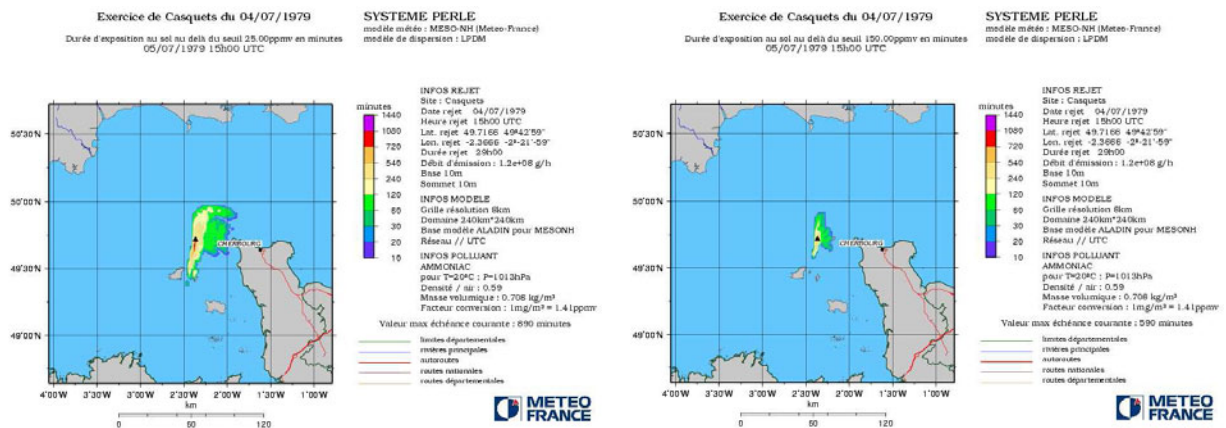


Figure 17 : Durées d'exposition au-delà du seuil ERPG-1 de 25 ppmv (à gauche) et du seuil ERPG-2 de 150 ppmv (à droite) pour un rejet durant environ 24h et débutant le 04/07/1979 à 15hUTC.

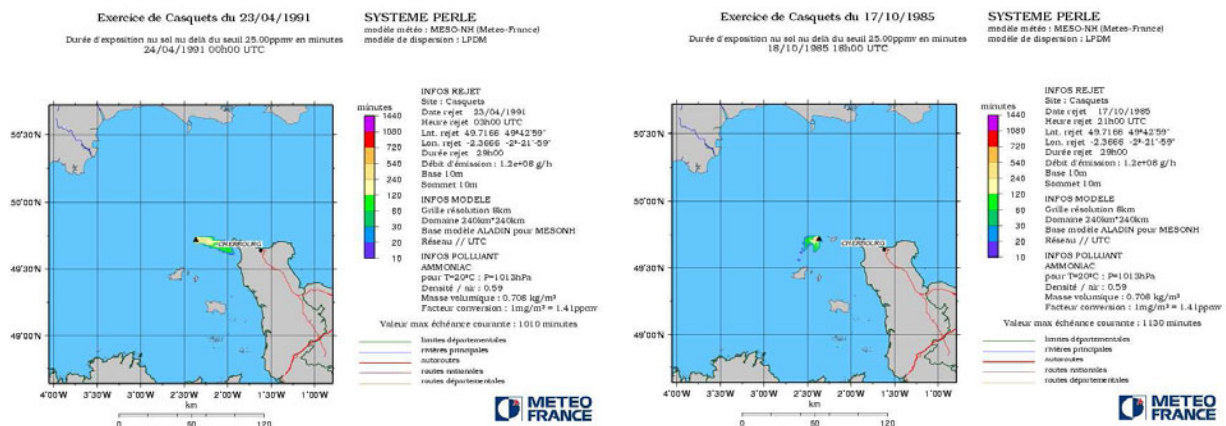


Figure 18 : Durées d'exposition au-delà du seuil ERPG-1 de 25 ppmv pour un rejet durant environ 24h et débutant le 23/04/1991 à 03hUTC (à gauche) et le 17/10/1985 à 21hUTC (à droite).



## 6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans le cadre du projet GALERNE, nous nous sommes intéressés à la dispersion en champ lointain (au-delà de quelques kilomètres et jusqu'à une centaine de kilomètres) des gaz potentiellement émis à partir d'un navire accidenté ou par les nappes flottantes d'un produit déversé en mer au cours du sinistre.

Les modèles de dérive de nappes en mer MOTHY et de dispersion atmosphérique PERLE ont tout d'abord été couplés pour examiner la dispersion des gaz s'évaporant de nappes flottantes dérivantes.

Les simulations réalisées à l'aide du système obtenu ont permis d'évaluer l'impact potentiel d'un accident fictif « réaliste » provoquant le déversement de 2500t de xylène en Manche. Deux rejets ont été envisagés, un rapide sur 15mn et un long sur 24h, dans des conditions météorologiques et océanographiques variées. Les simulations indiquent que le polluant en mer ne devrait pas dériver sur plus de 10km avant sa disparition du milieu marin par évaporation ; dans le cas d'un déversement rapide, cette disparition devrait intervenir en un maximum de deux heures environ. Les simulations montrent également que les niveaux de concentration induits dans l'atmosphère devraient rester inférieurs au seuil d'effet réversible indiqué par l'INERIS, même dans le cas d'une situation météorologique propice à la stagnation du polluant.

Par ailleurs, une étude de sensibilité supposant un déversement de xylène dans la baie de Marseille a illustré l'intérêt a priori, lorsque le déversement se situe à proximité d'une zone côtière, de considérer en entrée de MOTHY des données météorologiques de fine échelle susceptibles d'appréhender la complexité de l'écoulement atmosphérique. Ceci incite à la mise en œuvre d'un forçage de MOTHY par des modèles météorologiques de méso-échelle comme AROME ou Méso-NH.

Enfin, bien que non opérationnel, le système couplé MOTHY-PERLE développé dans GALERNE peut désormais être activé en mode étude ou post-accidentel pour un sinistre mettant en jeu du xylène. Il sera intéressant à l'avenir d'étendre l'utilisation du système à d'autres produits flottants évaporants comme le styrène. Egalement, la prise en compte dans la version opérationnelle de MOTHY du module d'évaporation développé dans GALERNE pour le cas du xylène va être étudiée ; ceci pourrait permettre d'améliorer le réalisme des simulations de dérive de xylène par MOTHY.

Concernant la dispersion de gaz émis directement à partir d'un navire accidenté, nous nous sommes intéressés tout particulièrement au cas de l'ammoniac, avec des simulations PERLE. Dans une première étape, les sorties du modèle de dispersion à courte distance PHAST ont été utilisées comme termes sources de PERLE afin d'évaluer l'impact de l'hypothèse de traceur passif faite dans PERLE (PHAST s'affranchit de cette hypothèse simplificatrice). L'étude a montré que le fait de supposer le traceur passif conduit à une sous-estimation systématique de l'extension horizontale du panache et à une surestimation des niveaux de concentration. Ces défauts seront à prendre en compte lors de l'interprétation des

sorties de PERLE en cas d'utilisation du système pour estimer la dispersion en champ lointain de gaz liquéfiés rejetés brutalement dans l'atmosphère.

Des simulations PERLE réalisées à partir de sorties PHAST ont ensuite été effectuées pour estimer les conséquences d'un rejet direct depuis le navire dans l'atmosphère, et sur moins d'1 heure, de 3600t d'ammoniac. Des effets potentiellement graves ont été mis en évidence en terme d'impact sanitaire. Ainsi, sur une situation météorologique propice à la stagnation du polluant, le seuil ERPG de niveau 3 est dépassé durant 3h jusqu'à 30km du navire.

Dans le cas d'un rejet de la même quantité d'ammoniac mais sur une durée plus longue d'environ 24 heures, les simulations PERLE effectuées (cette fois sans prise en compte en entrée de résultats issus de PHAST) indiquent un risque sanitaire moindre que dans le cas d'un rejet rapide. Cependant, des impacts possiblement dangereux pour la santé ne sont pas à exclure, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres du lieu du sinistre.

Il est à noter que, d'une manière générale, il serait utile de compléter les simulations réalisées par un plus grand nombre de cas, afin de pouvoir avancer les conclusions présentées ici de manière plus affirmative, et éventuellement les affiner.

La principale limitation de l'étude effectuée réside sans doute dans l'absence d'observations auxquelles confronter les résultats des simulations. La réalisation d'une campagne de mesures constituerait une étape décisive pour qualifier les modèles numériques utilisés, et en particulier le système couplé MOTHY-PERLE.

Les travaux réalisés par CNRS/GAME-Météo-France dans le cadre de GALERNE ont fait l'objet d'une communication à la conférence HARMO12 d'octobre 2008 ([Bonnardot et al., 2008]) et seront aussi présentés au 4ème forum R&D de l'Organisation Maritime Internationale sur les Substances Nocives et Potentiellement Dangereuses en Environnement Marin qui se tiendra à Marseille en mai 2009 ([Bonnardot et al., 2009]).



## 7 Annexe

On présente dans cette annexe, pour chacune des 6 dates simulées par le système couplé MOTHY-PERLE, une figure illustrant le type de temps conditionnant la dérive de la nappe et la dispersion atmosphérique (Figures 17 à 22).

Dans chacune, les deux premiers graphes (en haut) correspondent au champ de vent à 10m simulé par le modèle Méso-NH au moment de l'accident sur les deux grilles de calcul utilisées : le domaine régional à la résolution de 8km (à gauche) et le domaine local à la résolution de 2km (à droite) ; pour rappel, le site accidentel se trouve au centre des deux domaines de calcul.

On présente ensuite le profil vertical de la force du vent horizontal (au milieu à gauche), le radio-sondage (au milieu à droite), le profil vertical d'humidité relative qui permet de « visualiser » les couches nuageuses (en bas à gauche), et enfin le profil vertical de température potentielle (en bas à droite) ; ces différents profils sont issus de Méso-NH.

On rappelle que le Tableau 1 (section 4.2) synthétise le type de temps de chaque simulation.

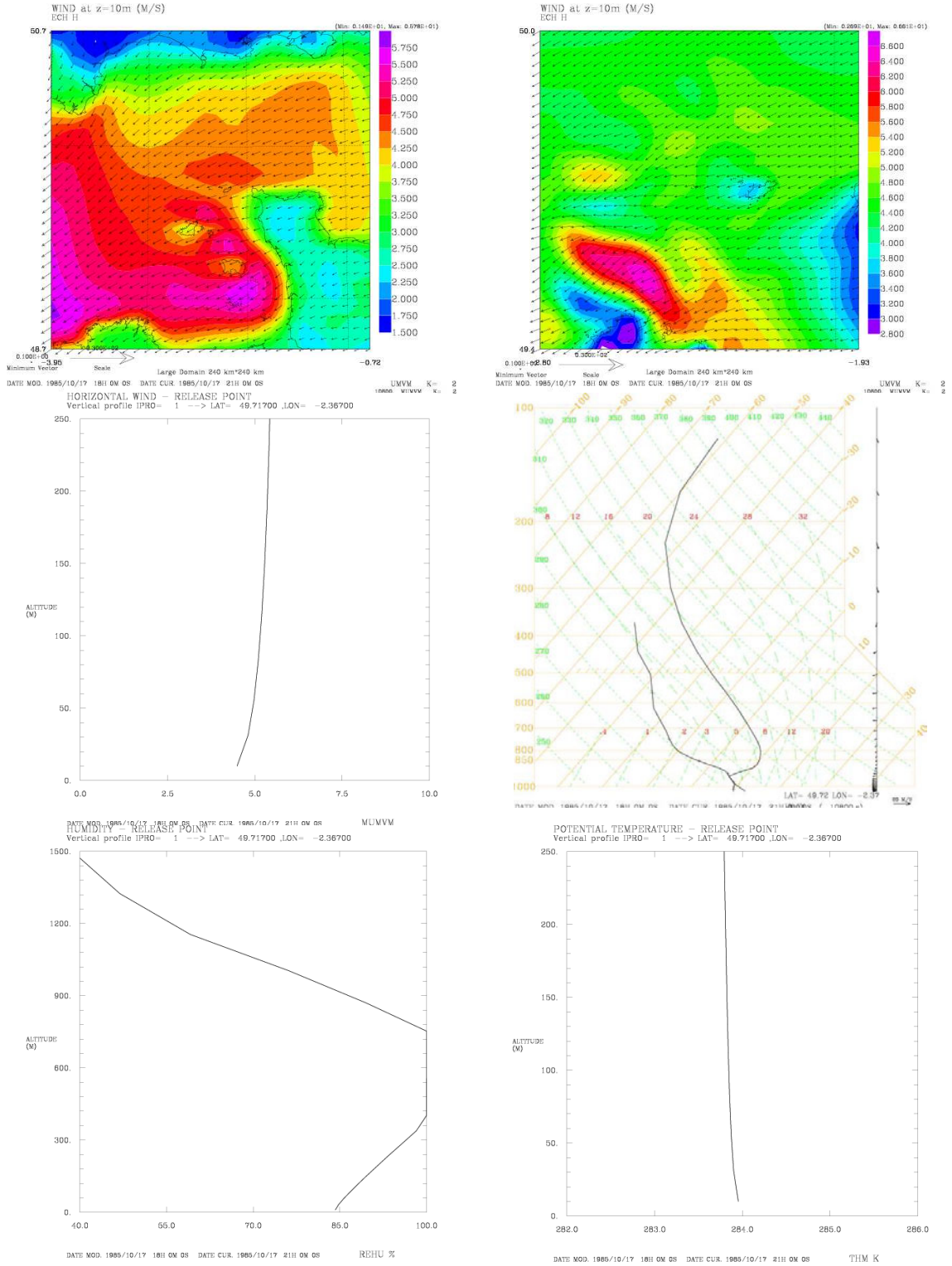


Figure 17 : Type de temps dans la région des Casquets le 17/10/1985.



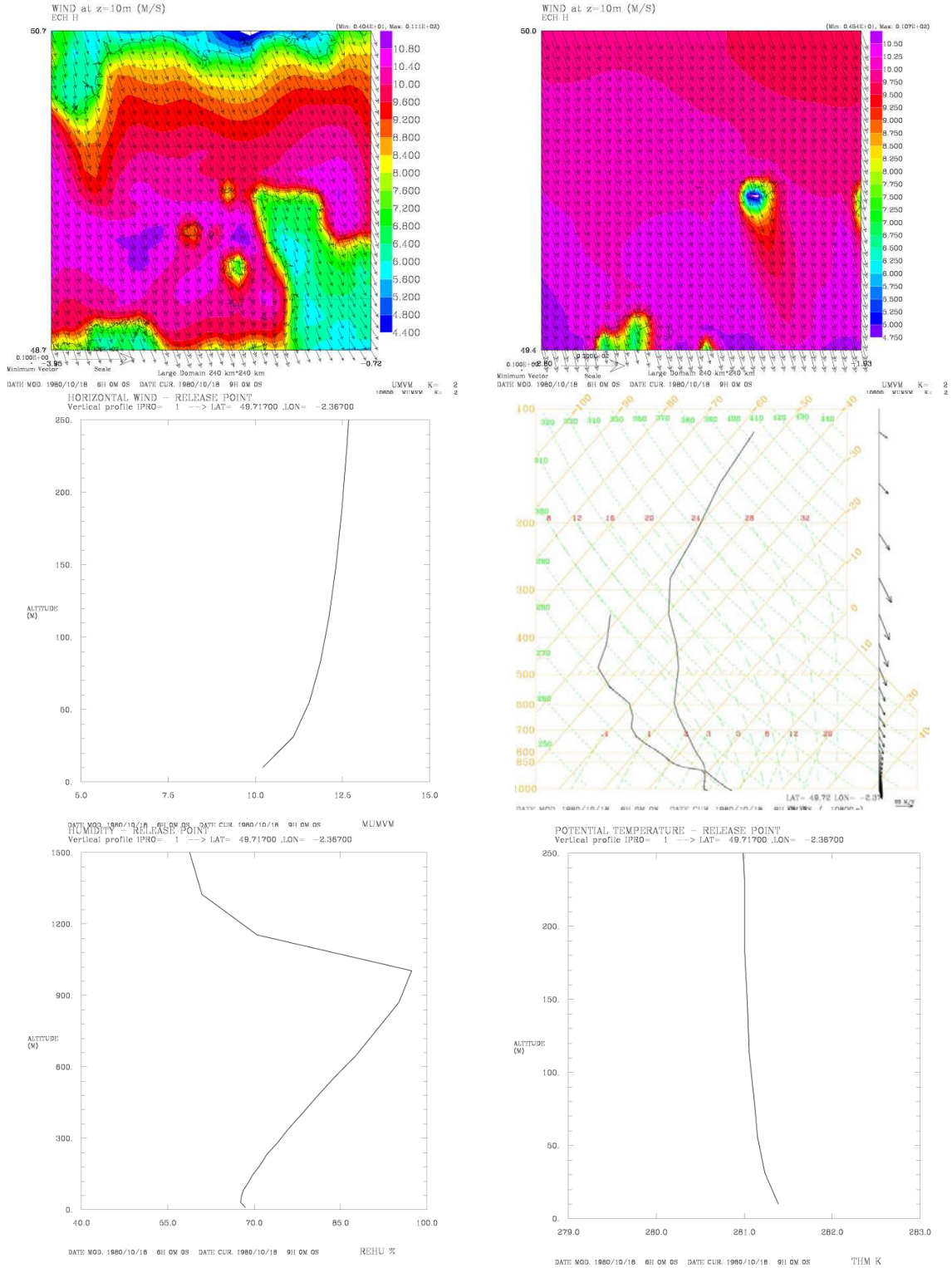


Figure 18 : Type de temps dans la région des Casquets le 18/10/1980.

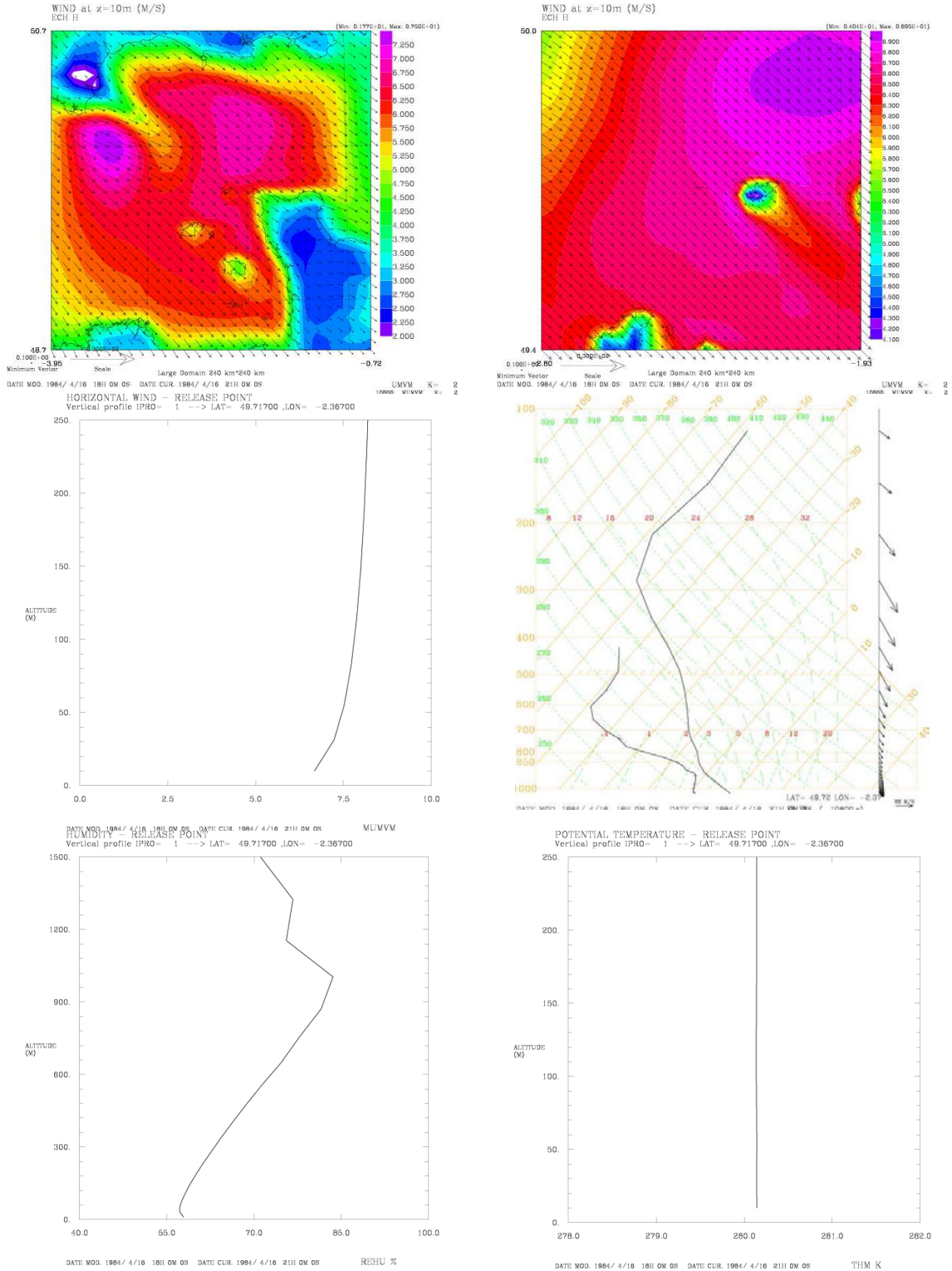


Figure 19 : Type de temps dans la région des Casquets le 16/04/1984.

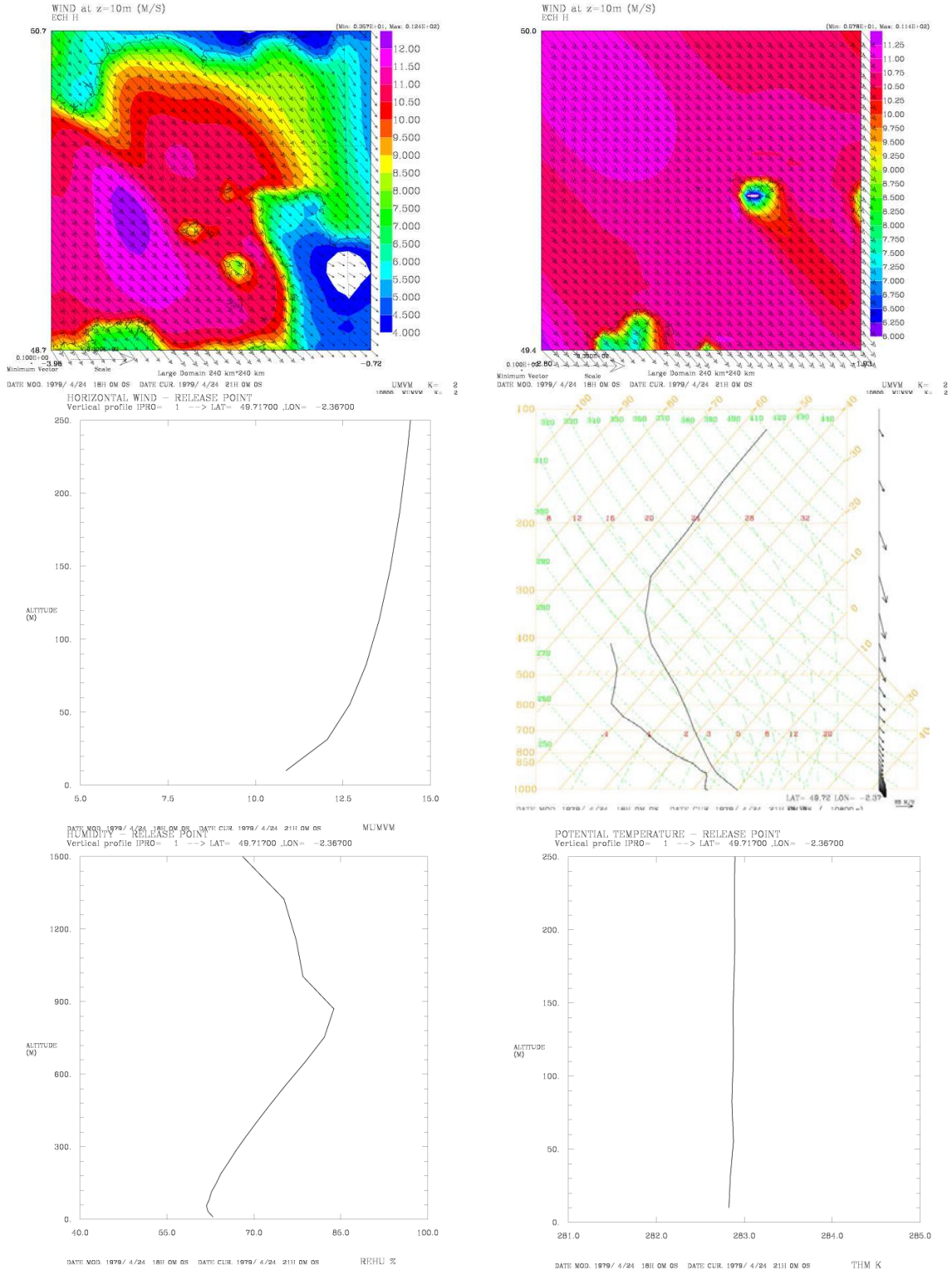


Figure 20 : Type de temps dans la région des Casquets le 24/04/1979.



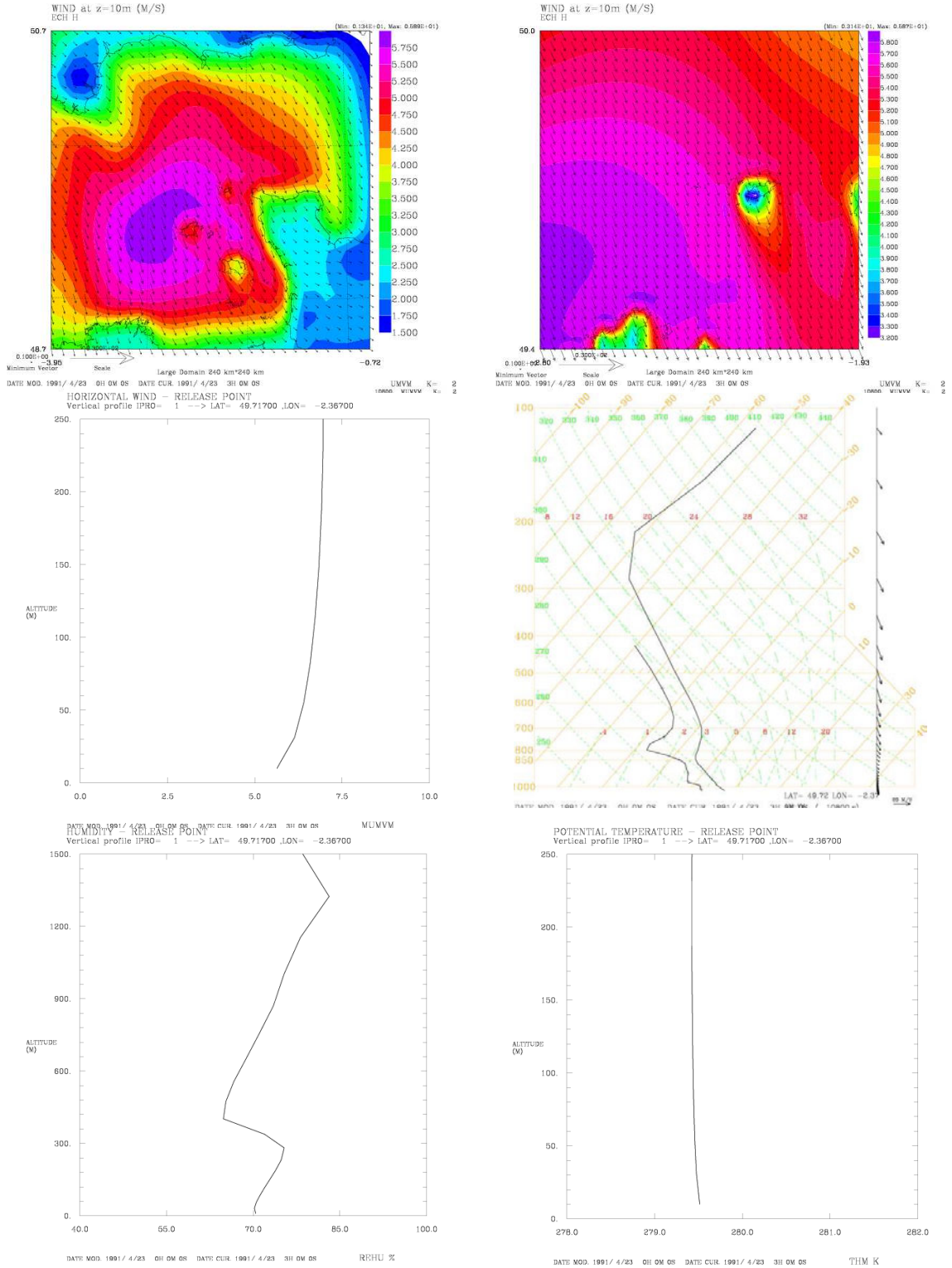


Figure 21 : Type de temps dans la région des Casquets le 23/04/1991.

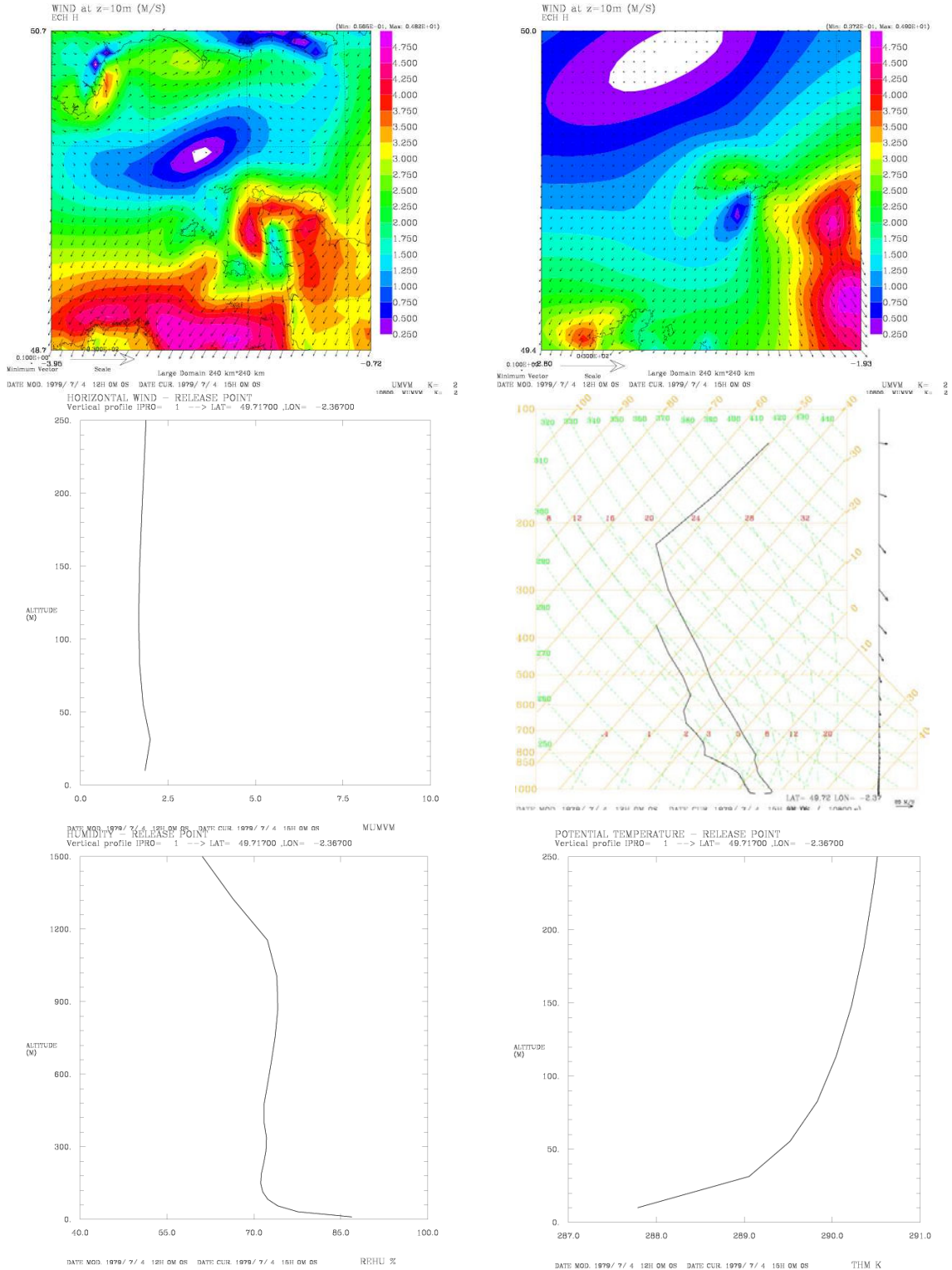


Figure 22 : Type de temps dans la région des Casquets le 04/07/1979.



## 8 Références bibliographiques

Bonnardot F., Lac C., Camail C., Connan O., Maro D., Hébert D. and Rozet M., 2005. PERLE : an operational meso-scale dispersion modelling system for accidental release. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Sissi, Greece, 177-181.

Bonnardot F., Paul J., Peuch A. and Daniel P., 2008. Dispersion in the atmosphere of a pollutant drifting at the sea surface; Galerne project. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Cavtat, Croatia, 491-494.

Bonnardot F., Paul J., Peuch A. and Daniel P., 2009. Atmospheric dispersion of Xylene evaporating from a drifting slick. *Proceedings of the Interspill 2009 Conference*, Marseille, France.

Daniel P., 1996. Operational forecasting of oil spill drift at Météo-France. *Spill Science & Technology Bulletin*, 3, 1/2, 53-64.

Daniel P., Josse P., Dandin P., Gouriou V., Marchand M. and Tiercelin C., 2001. Forecasting the Erika oil spills. *Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference*, Washington, D.C, 649-655.

Daniel P., Josse P., Dandin P., Lefèvre J.-M., Lery G., Cabioch F. and Gouriou V., 2004. Forecasting the Prestige oil spills. *Proceedings of the Interspill 2004 Conference*, Trondheim, Norway.

Gimeno L., Masson V. and Arnfield A.J., 2008. Special Issue on CAPITOUL Experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 131-323.

Hasse L. and Weber H., 1985. On the conversion of Pasquill categories for use over sea. *Boundary-layer meteorology*, 31, 177-185.

Lac C., Bonnardot F., Sandu I., Bouzom M. and Bompay F., 2004. Evaluation of meso-scale dispersion modelling for accidental release. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Modelling, Monitoring and Management of Air Pollution*, Rhodes, Greece, 341-351.

Lac C., Bonnardot F., Connan O., Camail C., Maro D., Hébert D. and Rozet M., 2008. Evaluation of a mesoscale dispersion modelling tool during the CAPITOUL Experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102, 263-287.

Lafore J.-P., Stein J., Asencio N., Bougeault P., Ducrocq V., Duron J., Fischer C., Hérel P., Mascart P., Masson V., Pinty J.-P., Redelsperger J.-L., Richard E. and Vilá-Guerau de Arellano J., 1998. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophysicae*, 16, 90-109.

MacKay D. and Matsugu R. S., 1973. Evaporation rates of hydrocarbon spills on water and land. *Can. J. Chem. Eng.*, 5, 434-439.

Olesen H. R., 1994. Model validation kit for the workshop on operational short-range atmospheric dispersion models for environmental impact assessments in Europe (Mol, Nov. 21-24 1994), National Environmental Research Institute, Denmark.

Pasquill F., 1961. The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteor. Mag.*, 90, 33-49.

Pénélon T. et Antoine F., 2009. GALERNE - Tâche 2 Modélisations des scénarios de fuite de substances toxiques en mer - Champ proche. Livrable du projet ANR GALERNE.

Uppala S. M., Kallberg P. W., Simmons A. J., Andrae U., Bechtold V. D., Fiorino M., Gibson J. K., Haseler J., Hernandez A., Kelly G. A., Li X., Onogi K., Saarinen S., Sokka N., Allan R. P., Andersson E., Arpe K., Balmaseda M. A., Beljaars A. C. M., Van De Berg L., Bidlot J., Bormann N., Caires S., Chevallier F., Dethof A., Dragosavac M., Fisher M., Fuentes M., Hagemann S., Holm E., Hoskins B. J., Isaksen L., Janssen P. A. E. M., Jenne R., McNally A. P., Mahfouf J. F., Morcrette J. J., Rayner N. A., Saunders R. W., Simon P., Sterl A., Trenberth K. E. Untch A., Vasiljevic D., Viterbo P. and Woolen J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.

Witlox H. W. M., 2005. Unified Dispersion Model - Technical Reference Manual, Det Norske Veritas, London.



## 9 Liste des acronymes

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
**AIEA** : Agence Internationale de l'Energie Atomique  
**AIHA** : American Industrial Hygienist Association  
**ALADIN** : Aire Limitée, Adaptation dynamique, Développement International ; système d'assimilation et de prévision à aire limitée de Météo-France  
**ANR** : Agence Nationale de la Recherche  
**AROME** : Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Mésos-Echelle ; système d'assimilation et de prévision à méso-échelle de Météo-France  
**ARPEGE** : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle ; système d'assimilation et de prévision global de Météo-France  
**CEDRE** : Centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux  
**CEPMET** : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme  
**CMC** : Cellule Météorologique de Crise  
**CMRS** : Centre Météorologique Régional Spécialisé  
**CNP** : Centre National de Prévisions  
**CNRS** : Centre National de la Recherche Scientifique  
**COI** : Commission Océanographique Intergouvernementale  
**CSU** : Colorado State University  
**EDF** : Electricité de France  
**ERPG** : Emergency Response Planning Guidelines  
**GALERNE** : Gaz et Liquides Evaporants et Risques des Nuisances Environnementales et humaines  
**GAME** : Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique  
**IFS** : Integrated Forecasting System ; système d'assimilation et de prévision global du CEPMMT  
**INERIS** : Institut National de l'Environnement industriel et des Risques  
**IRSN** : Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire  
**LA** : Laboratoire d'Aérodynamique  
**LPDM** : Lagrangian Particles Dispersion Model  
**MEDIA** : Modèle Eulérien de Diffusion Atmosphérique  
**Mésos-NH** : Modèle météorologique à méso-échelle développé par Météo-France et le LA  
**MOCAGE** : Modèle de Chimie Atmosphérique de Grande Echelle  
**MOTHY** : Modèle Océanique de Transport d'Hydrocarbures  
**OMM** : Organisation Météorologique Mondiale  
**PERLE** : Programme d'Evaluation des Rejets Locaux d'Effluents  
**POLMAR** : Pollution Maritime  
**PPI** : Plan Particulier d'Intervention  
**PRECODD** : Programme Ecotechnologies et Développement Durable  
**SER** : Seuil d'Effet Réversible

**SIUPM** : Système d'Intervention d'Urgence en cas de Pollution de la Mer

**SPRAY** : Modèle de dispersion atmosphérique lagrangien particulaire de la société Aria Technologies

**TNO** : Organisation Néerlandaise pour la Recherche Appliquée

**UNESCO** : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

# CHAPITRE 3

RAPPORT D'ÉTUDE

30/09/2009

N°- DRA-09-74701-09324B -

**PROJET ANR GALERNE**

**REJET DE LIQUIDES CRYOGENIQUES  
ET DE LIQUIDES EVAPORANTS EN  
BASSIN**

# PROJET ANR GALERNE

## REJET DE LIQUIDES CRYOGENIQUES ET DE LIQUIDES EVAPORANTS EN BASSIN

### Rapport d'essais

Verneuil-en-Halatte (Oise)

Client : ANR PRECODD

Liste des personnes ayant participé à l'étude expérimentale : D.JAMOIS, Ch. PROUST, J.  
M. CHARPENTIER, P. MEUNIER

## PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	<b>Rédaction</b>	<b>Vérification</b>	<b>Approbation</b>
<b>NOM</b>	D. JAMOIS – C. PROUST	R. BOUET	B. PIQUETTE
<b>Qualité</b>	Ingénieurs Unité Explosion– Dispersion Direction des Risques Accidentels	Responsable Unité Explosion– Dispersion Direction des Risques Accidentels	Responsable du Pôle PHDS Direction des Risques Accidentels
<b>Visa</b>			

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS .....</b>	<b>5</b>
<b>2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF D'ESSAIS .....</b>	<b>7</b>
2.1 Installation .....	7
2.2 Métrologie .....	8
2.2.1 Débit de liquides.....	8
2.2.2 Evaporation sur l'eau et dans l'eau .....	8
2.2.3 Formation et dispersion du panache .....	9
2.2.3.1 Détermination de la concentration de gaz.....	9
2.2.3.2 Mesure de la température.....	9
2.2.3.3 Champ de vitesse et de turbulence .....	9
2.3 Plan d'expérience .....	10
2.3.1 Choix des fluides.....	10
2.3.2 Conditions de rejet (cf. annexe 1) .....	11
2.3.3 Essais réalisés .....	11
<b>3. OBSERVATIONS ET ANALYSE .....</b>	<b>13</b>
3.1 Interaction eau-liquide évaporant.....	13
3.1.1 Localisation de la zone d'évaporation .....	13
3.1.2 Mécanisme d'évaporation .....	15
3.1.3 Cas particuliers .....	20
3.1.3.1 Rejet sous la surface de l'eau.....	20
3.1.3.2 Cas du pentane .....	20
3.1.3.3 Effet des vagues .....	21
3.2 Dispersion des vapeurs dans l'atmosphère .....	22
3.2.1 Régime thermique dans le panache.....	22
3.2.2 Concentration de gaz et densité dans le panache .....	24
3.2.3 Mécanisme de dispersion .....	28
<b>4. CONCLUSIONS.....</b>	<b>31</b>
<b>5. LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>33</b>
A1.1 - Dispositif de rejet.....	1
A1.2 - Instrumentation du bassin.....	3

A1.3 - Instrumentation à l'atmosphère .....	4
Description .....	11
Performances .....	12
<u>Exemple de courbe d'étalonnage</u> .....	12
<u>Incidence de l'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement</u> .....	12
Incidence de la géométrie de la sonde .....	13
Temps de réponse et précision de la mesure .....	13
Application à la mesure de la turbulence.....	14
<u>Limitations possibles</u> .....	14
<u>Vérifications</u> .....	14



## **1. CONTEXTE ET OBJECTIFS**

Cette campagne d'essais s'inscrit dans le cadre du programme ANR GALERNE, dont l'un des objectifs est de prévoir les zones de risque autour d'une fuite accidentelle de liquides – inflammables et/ou toxiques – en mer. Bien que des outils existent pour estimer les conséquences d'une fuite, la modélisation butte sur l'effet d'une grande nappe d'eau sur la vaporisation au point de rejet et la dispersion dans l'air de nuages massivement denses.

Pour ce projet, l'INERIS a mis en place à échelle réduite une technique expérimentale d'essai pour observer et caractériser la zone d'interaction entre des liquides - cryogéniques et évaporants - et la surface de l'eau, et pour mettre au point un dispositif de mesure de la concentration en gaz dans le champ proche.

Un liquide cryogénique bien connu (azote liquide) a été employé pour simuler des épandages d'hydrocarbures cryogéniques, des GPL transportés sous pression à température ambiante et un hydrocarbure évaporant pour les transports classiques.



## 2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF D'ESSAIS

### 2.1 INSTALLATION

Les détails du dispositif d'essais sont fournis en annexe 1. Un bassin a été constitué pour former une surface d'eau de 100 m<sup>2</sup> (10x10m) et de 1 m de profondeur (Figure 1). Le choix des dimensions résulte d'une analyse préliminaire rapide qui indique que les phénomènes d'évaporation peuvent être très différents si la taille de la nappe évaporante est plus petite que 1m et si la profondeur du puits thermique qui l'alimente est inférieure à quelques dizaines de cm. Dans le même registre, les effets éventuels macroscopiques sur la dispersion du nuage (effet de pesanteur par exemple) ne peuvent se manifester que si le nuage est suffisamment grand, c'est à dire si le débit d'évaporation est suffisant. L'eau a été additionnée de 2 tonnes de sel de mer, soit environ 20g de sel par litre d'eau (rappel : l'eau de mer contient 35g/l de sels). L'eau est pompée et filtrée en permanence.

Le point de rejet est situé au milieu du bassin. Il est relié aux réservoirs contenant les liquides d'essais par un flexible de 8m de long et 20 mm de diamètre interne sans restriction (vanne pilotée à passage intégral pour la commande du rejet).

Le bassin et le point de rejet sont placés de telle sorte que le panache se dirige vers une zone suffisamment dégagée du site. La jonction entre le bassin et le sol, en aval de la surface d'eau, est aplanie de façon à réaliser une continuité de surface.

Cependant, les conditions « idéales » d'épandage (direction et vitesse du vent selon l'axe des capteurs) sont rares. On a choisi de forcer le vent au moyen de deux ventilateurs gros débit de façon à créer en permanence un écoulement d'air au-dessus de la surface d'eau et jusqu'à une dizaine de mètres en aval du bassin dans la bonne direction. Les caractéristiques de ces ventilateurs et du champ de vent produit sont rassemblées en annexe 2.

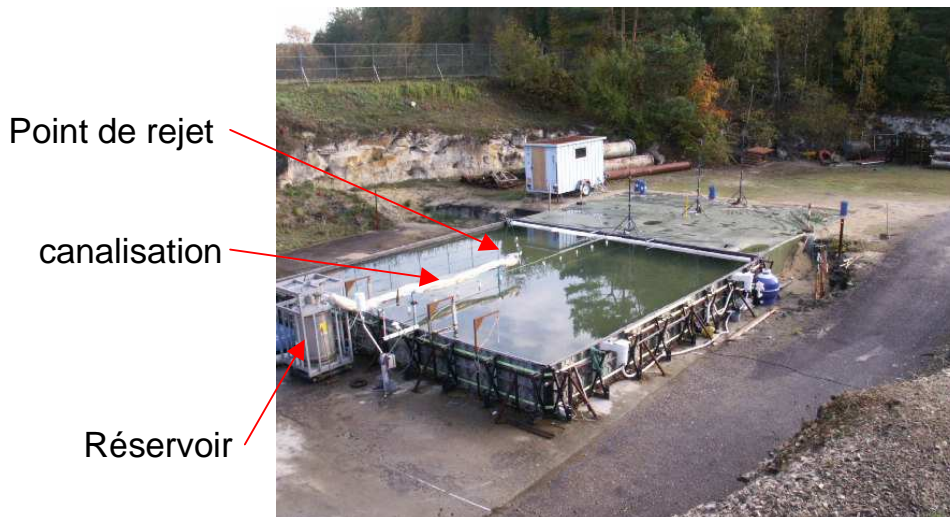


Figure 1 : bassin d'essais

Un dispositif a été calculé et construit afin de produire des vagues sur le bassin (annexe 3). Ce système permet de créer une onde dirigée dans le sens du vent, avec une amplitude maximale de 10 cm et avec une fréquence comprise entre 1 et 2Hz. Une plaque immergée sur le bord aval du bassin permet de neutraliser l'onde et d'éviter les réflexions parasites.



Figure 2 : bassin d'essai avec le système à vague en fonctionnement

## 2.2 METROLOGIE

### 2.2.1 DEBIT DE LIQUIDES

Les différents réservoirs utilisés sont posés sur un plateau balance (1000 Kg). Le débit moyen est calculé par la mesure de la différence de masse entre le début et la fin du rejet. On peut considérer que le débit est constant durant le rejet si la pression appliquée aux liquides dans les réservoirs est constante. Pour ce qui concerne l'azote liquide, la pression interne est produite par l'évaporation de l'azote dans le ciel du réservoir et est limitée par une soupape de sécurité tarée à 4 bar. Pour de gros débits de vidange (plus de 800 g/s) l'équilibre liquide/vapeur ne compense pas instantanément la chute de pression due à la baisse de niveau de liquide dans le réservoir et la pression dans le réservoir baisse au cours du rejet (jusqu'à 2,2 bar pour des rejets de plus de 3 minutes). Pour ces situations le débit mesuré est un débit moyen dont on peut estimer qu'il varie de 30% entre le début et la fin de la fuite.

### 2.2.2 EVAPORATION SUR L'EAU ET DANS L'EAU

L'objectif est de détecter l'interface entre les deux fluides (liquide rejeté/eau) afin de déterminer le processus d'évaporation. Si on fait l'hypothèse qu'une nappe se forme à la surface, on peut espérer la détecter à l'aide d'une mesure de température en surface. A cette fin, une ligne de 10 thermocouples est disposée à la surface du bassin suivant l'axe principal (direction du vent). Ces thermocouples sont fixés sur des flotteurs de façon à être immergés en permanence de 1 à 3 mm sous la surface de l'eau. Chaque essai est également filmé à l'aide d'une caméra thermique de façon à mettre en évidence le flux thermique absorbé par cette nappe éventuelle (annexe 1, § A1-2). Il est possible aussi

qu'une partie de l'évaporation se produise sous l'eau près du point d'impact. Des caméras grand angle ont été immergées pour examiner cette possibilité, tandis que quelques thermocouples ont été installés selon la profondeur à proximité du rejet (annexe 1 - §A1-2).

### **2.2.3 FORMATION ET DISPERSION DU PANACHE**

Pour un gaz dense, par exemple issu de la vaporisation d'un cryogène, on s'attend à ce que sa densité ait une incidence significative sur la dispersion. C'est pourquoi on mesure simultanément la température et la concentration dans le panache. A cet effet, des points de mesures sont installés en aval du point de rejet dans le champ proche, de 5 à 15 m du point de rejet. Ces points de mesures sont placés sur trois mâts alignés sur l'axe du rejet et jusqu'à 3 m de hauteur (annexe 1, § A1-3).

La température ambiante et le taux d'hygrométrie sont mesurés au niveau du bassin avant et après chaque essai.

#### **2.2.3.1 DETERMINATION DE LA CONCENTRATION DE GAZ**

On a choisi de déterminer la concentration de gaz au moyen d'analyseurs d'oxygène à effet paramagnétique (annexe 1 - §A1-3). On déduit ainsi la concentration de gaz à partir de la mesure de la concentration en oxygène. On met à profit la spécificité paramagnétique de l'oxygène pour détecter n'importe quel gaz mélangé à l'air. La technique est extrêmement robuste et fiable. Trois lignes de prélèvement sont disposées sur chaque mât (1, 2 et 3 m de hauteur). Chaque ligne est analysée durant 20 secondes et une fois par minute. On estime que la précision est de 0,1% v/v de gaz.

#### **2.2.3.2 MESURE DE LA TEMPERATURE**

Six thermocouples (type K, retraits 0,5mm) sont répartis sur chaque mât (à 0,2 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 et 3 m de hauteur). La précision de la mesure est de +/-0,3°C et le temps de réponse de 0,1 seconde.

Pour chaque essai, la zone de rejet est filmée en vidéo classique. En fonction du taux d'hygrométrie de l'atmosphère et de la température des vapeurs émises au point de rejet, une partie du panache est visible lorsque l'eau de l'atmosphère s'y condense. De cette façon on peut contrôler que le panache est correctement aligné dans l'axe des mâts et valider les mesures de concentration obtenues.

#### **2.2.3.3 CHAMP DE VITESSE ET DE TURBULENCE**

On pense que les effets de densité peuvent, s'ils sont très importants – soit sous l'effet de la masse propre du gaz, soit sous l'effet de la condensation de l'eau –, modifier la turbulence de l'atmosphère et même le champ de vent, donc avoir une influence sur la dispersion.

On a tenté d'estimer ces paramètres à l'aide d'un matériel particulièrement robuste conçu à l'INERIS (annexe 4). Il s'agit d'une sonde de type Pitot capable de détecter d'infimes variations de pression. Elles peuvent être utilisées sans difficultés dans des conditions « dures » (flamme, poussière, humidité...). L'appareil comporte une sonde placée dans l'écoulement, constituée d'une tête reliée par deux tubes à une cellule de mesure capacitive (photographie de la figure 3). On estime que l'appareil peut mesurer une vitesse moyenne jusqu'à 10m/s et peut détecter des fluctuations de 0,1 m/s (composante dans l'axe du tube de Pitot) et jusqu'à une fréquence de 100 Hz.



Figure 3 : photographie de la sonde de turbulence

La mesure de turbulence est obtenue en traitant statistiquement le signal de vitesse de l'écoulement d'air. Les fluctuations de vitesse (écart-type) autour de la vitesse moyenne, en fonction du temps, sont représentatives du niveau de turbulence local.

2 sondes de turbulence sont placées à 800 et 1500 mm du sol sur les mâts 1 et 2 (1 seule sonde à 1500mm sur le mât 3).

## 2.3 PLAN D'EXPERIENCE

### 2.3.1 CHOIX DES FLUIDES

Sur mer les fluides sont transportés dans des conditions très variables qu'on a tenté de reproduire avec cependant les limitations suivantes :

- Impossibilité d'utiliser sur le site expérimental des effluents très toxiques comme l'ammoniac ;
- Préférence pour des fluides non miscibles avec l'eau afin de ne pas polluer définitivement le bassin ;
- Non disponibilité de certains types de fluide comme le GNL.

Par voie marine, le transport peut se faire dans des conditions cryogénique sous faible surpression comme c'est le cas pour le GNL ( $T_{eb} = -162^{\circ}\text{C}$ ), l'éthylène ( $T_{eb} = -104^{\circ}\text{C}$ ), les GPL ( $T_{eb} = -45^{\circ}\text{C}$ ) et l'ammoniac ( $T_{eb} = -34^{\circ}\text{C}$ ). En plus petites quantités, les GPL et l'ammoniac peuvent aussi être transportés liquide à température ambiante mais sous pression. Les hydrocarbures et autres produits dont le point d'ébullition est comparable ou au dessus des conditions ambiantes peuvent être transportés à pression atmosphérique (cas des essences).

On a choisi de représenter la classe des cryogènes par de l'azote liquide ( $T_{eb} = -196^{\circ}\text{C}$ ) dont la température d'ébullition est assez voisine de celle du GNL. Les GPL sont aussi transportés par voie maritime, soit sous forme cryogénique, soit sous forme semi-réfrigérée, soit encore sous forme pressurisée à température ambiante. Il a été possible d'utiliser du propane ( $T_{eb} : -42^{\circ}\text{C}$ ) et du butane ( $T_{eb} : -1^{\circ}\text{C}$ ) purs (99,5%), que l'on a introduit liquide dans le bassin à partir d'un récipient à température ambiante et sous pression. Enfin, pour représenter les autres hydrocarbures moins volatils, on a choisi le

pentane ( $T_{eb} = 36^{\circ}\text{C}$ ), qui reste suffisamment volatil pour que des expériences soient possibles.

### **2.3.2 CONDITIONS DE REJET (CF. ANNEXE 1)**

Les essais ont été réalisés avec le point de rejet placé au centre du bassin à 20 cm au-dessus de la surface de l'eau, l'orifice dirigé vers le bas (à l'exception de l'essai 8 – voir tableau I ci-dessous). Le débit dépend du diamètre de l'orifice au point de rejet et des conditions de pression dans le réservoir. Pour l'azote, la pressurisation est assurée par un évaporateur associé au réservoir commercial, utilisé tel quel, si bien que la pression est fixée à 4 bar (non réglable). Pour le propane et le butane, un réservoir tampon a été utilisé, rempli avant chaque expérience à l'aide de bouteilles commerciales. Pour le propane, la pression de vapeur saturante dans le réservoir est approximativement de 8 bar, ce qui n'a pas nécessité de pressurisation supplémentaire. Pour le butane, dont la pression de vapeur saturante est trop basse à la température ambiante, une légère suppression à l'azote est nécessaire (entre 2 et 4 bar). Le pentane a été introduit directement au moyen d'une pompe à liquide.

Pour les liquides à point d'ébullition inférieur à la température ambiante, les pertes de charges peuvent occasionner une vaporisation (un flash) dans la canalisation entre le réservoir et le point de rejet, ce qui modifie les conditions d'impact sur l'eau mais aussi diminue nettement le débit. Pour limiter cet effet, un flexible de fort diamètre (25 mm interne) fortement calorifugé relie le réservoir à la buse de rejet. La plus petite section de passage est celle de l'orifice de rejet (orifice calibré), si bien que partout ailleurs le fluide est pratiquement au repos et adiabatique, c'est-à-dire dans des conditions très voisines du liquide dans un réservoir.

Dans le cas spécifique du pentane, la canalisation calorifugée n'a pas été utilisée, mais simplement un tube de 4 mm interne fixé sur la structure supportant la canalisation.

### **2.3.3 ESSAIS REALISES**

Le tableau I rassemble les conditions expérimentales obtenues. L'essai 8 a été réalisé en prolongeant la partie verticale de la canalisation de façon à placer le point de rejet sous la surface de l'eau (10 cm). Les essais 9 et 20 ont été réalisés avec le système à vagues en fonctionnement (amplitude : 10 cm, longueur d'onde : 75 cm, fréquence : 1 Hz).

Essai n°	Liquide	T°C eau	T°C air	HR-%-	Pt de rosée °C	Pression initiale de rejet (bar)	Masse rejetée (Kg)	diamètre rejet (mm)	durée de l'essai (s)	débit moyen (Kg/s)
5	N2	10.0	10.8	96	10.2	4	111.5	16	124	0.90
6	N2	10.5	11.3	98	10.9	4	172	20	215	0.80
7	N2	10.5	12.1	84	10.3	4	103	20	115	0.90
8*	N2	11.0	12	94.2	11.1	4	89.5	20	184	0.49
9**	N2	10.0	12.1	93.1	11	4	100	16	213	0.47
12	C3H8	6.5	11.1	54.1	2.3	10	57.4	10	140	0.41
13	C3H8	5.0	7.4	81.4	4.2	7	58.9	9	121	0.49
14	C4H10	5.5	1.2	87.6	-0.5	4	39.4	9	58	0.68
15	C4H10	4.5	4.6	83.2	1.8	2	46.4	9	74	0.63
16	C4H10	4.5	4.6	82.8	2.4	2	22	9	32	0.69
17	C5H12	3.0	1.6	92.1	0.6	-	0.824	2.5	360	2.5g/s
18	C5H12	3.0	1.5	95.5	0.7	-	1.516	2.5	194	8.5g/s
19	C5H12	3.0	1	99.9	1.1	-	1.671	2.5	205	8.5g/s
20**	C5H12	3.0	1	99.9	1.1	-	1.183	2.5	140	8.5g/s

*Tableau I : liste des essais réalisés. \* : Rejet sous l'eau ; \*\* : présence de vagues. Les valeurs contenues dans la colonne « pression initiale de rejet » sont indicatives*

Afin d'estimer le taux de « flash » (titre de vapeur) à l'orifice, on a utilisé des lois classiques de pertes de charge (écoulement incompressible quasi liquide). Bien que la valeur de la pression soit relativement indicative (c'est un ordre de grandeur), on s'aperçoit néanmoins que l'azote et le propane s'écoulaient avec un titre de vapeur de l'ordre de 10% en masse. La masse volumique du fluide (vapeur + liquide) est significativement réduite – de l'ordre de 150 kg/m<sup>3</sup> pour le propane et de 250 kg/m<sup>3</sup> pour l'azote.



### 3. OBSERVATIONS ET ANALYSE

Les résultats des mesures pour l'ensemble des essais sont regroupés dans les annexes 5 à 7. Une analyse de ces résultats est proposée sur la base de l'essai n°7 (rejet d'azote liquide avec un débit de 0,9 kg/s) .

#### 3.1 INTERACTION EAU-LIQUIDE EVAPORANT

##### 3.1.1 LOCALISATION DE LA ZONE D'EVAPORATION

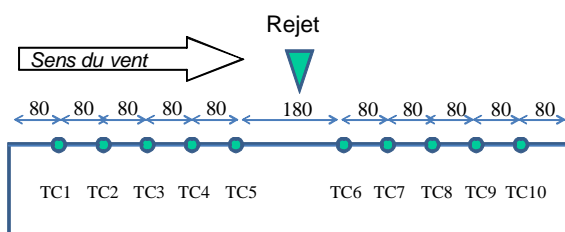
Les résultats des mesures de température de surface de l'essai n°7 sont présentés sur la figure 4 (résultats complets en annexe 5). Ces mesures sont exprimées en variations (écart entre la température mesurée durant le rejet et la température initiale juste avant le rejet) et décalées les unes par rapport aux autres suivant l'axe des ordonnées pour en faciliter l'interprétation (avant le début du rejet, toutes les température mesurées par les thermocouples TC1 à TC9 sont égales à la température ambiante initiale de l'eau).

On observe une baisse significative de la température de l'eau en surface à 90 cm du point d'impact du rejet (environ 8°C, TC n°6). Les autres thermocouples ne mesurent pas de variations supérieures à 1°C. Ces écarts sont négligeables pour un point d'ébullition de l'azote liquide de -190°C, ce qui signifie que l'évaporation n'a pas lieu sur l'eau mais dans l'eau.

Par observation directe en vidéo classique (photographie extraite du film sur la figure 5), on voit un panache produit à la surface de l'eau à l'intérieur d'un cercle d'environ 1 m à 1m50 de diamètre.

L'image extraite de la vidéo thermique (figure 5) a été traitée en choisissant un coefficient d'émissivité global tel que l'environnement de la fuite corresponde à la température ambiante, alors de 10°C. On remarque quand même que l'ordre de grandeur de la « température » déduite de cette vidéo pour les vapeurs qui sortent de l'eau est de -50°C et que celle du nuage qui atteint le premier mât est peut être entre 0 et 10°C. Ces valeurs sont finalement assez proches de celles que l'on tire de l'analyse des signaux des thermocouples (cf. ci-après). Il est donc possible que le coefficient d'émissivité du nuage, finalement constitué d'air et d'eau, soit assez proche de celui de l'environnement. Cependant ce traitement des images thermiques est parfois rendu difficile par les conditions d'éclairage locales, notamment lorsque le ciel se reflète dans l'eau.

En tenant compte de ces spécificités, on voit aussi qu'en dehors du cercle d'émission du panache visible en vidéo normale, la température de l'eau varie très peu, ce qui confirme les mesures de température de surface.



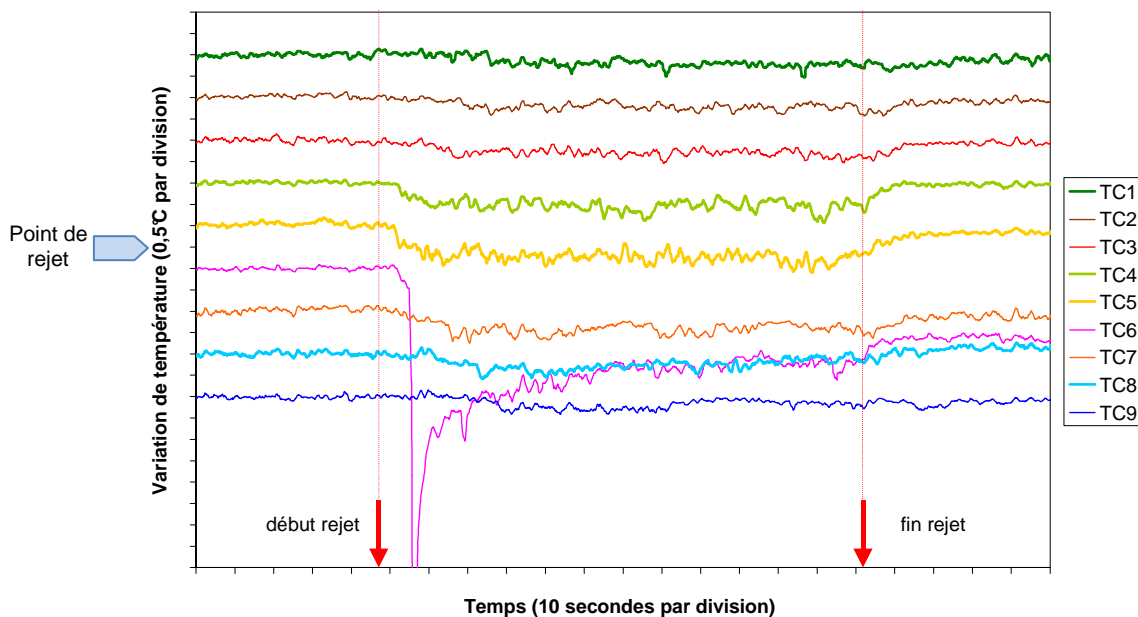


Figure 4 : Variations de température de surface mesurées durant le rejet n°7 (les mesures du TC10 ne sont pas valides).

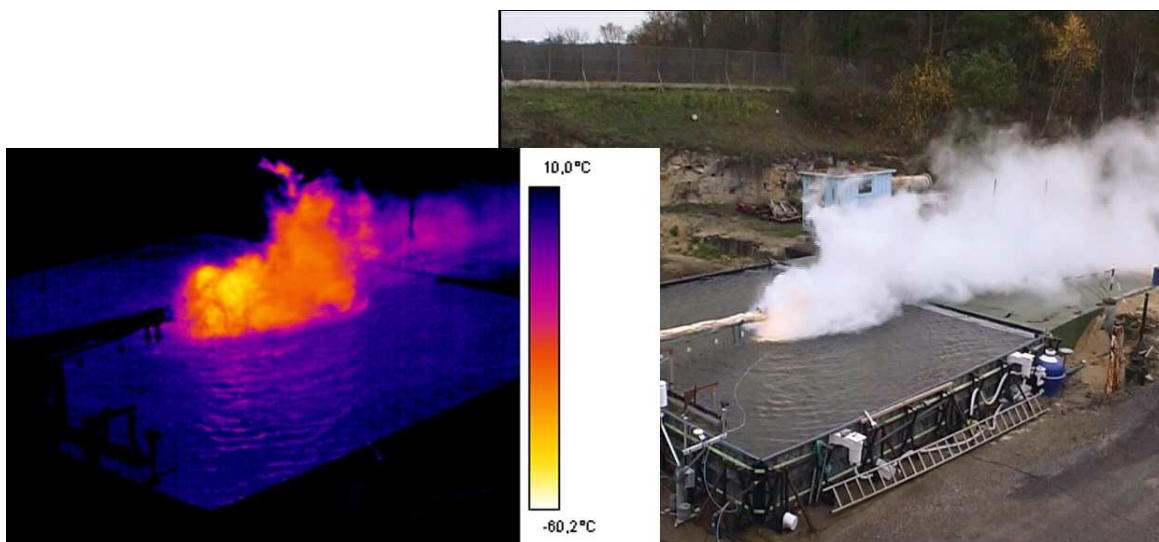


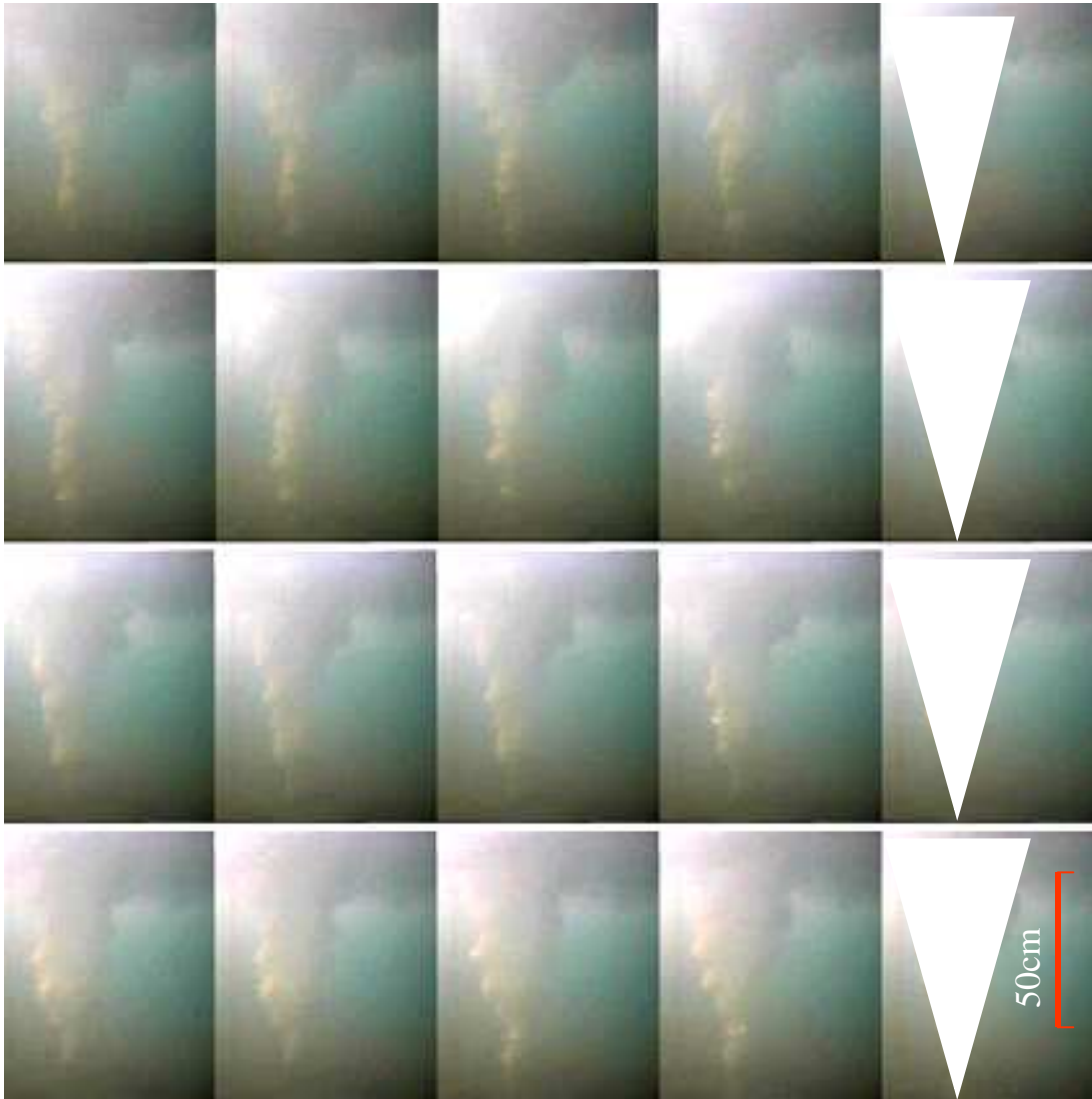
Figure 5 : photographies extraites des vidéos thermique et normale pour l'essai n°7

Enfin, les caméras sous-marines ne permettent pas de mettre en évidence la présence d'une nappe d'azote sur la surface du bassin à plus de 1m du point de rejet. On distingue cependant sur ces films sous-marins une circulation d'eau en surface du point de rejet vers l'extérieur. On peut penser que ce courant est refroidi au contact de l'azote et induit une variation de température de la surface. On constate effectivement que la légère baisse de température observée est bien corrélée avec le début du rejet.

### 3.1.2 MECANISME D'EVAPORATION

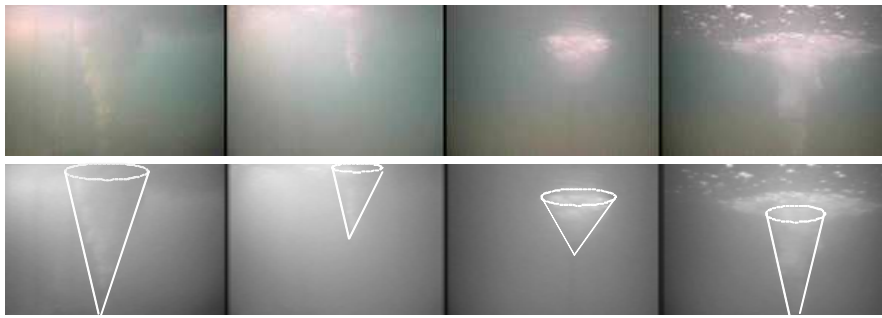
On s'intéresse en premier lieu à la situation d'un jet impactant à la surface de l'eau et capable d'y pénétrer.

On a observé dans un plan vertical la pénétration du jet dans l'eau (figure 6). Le jet d'azote liquide crée un cône de mélange d'environ 75cm de profondeur pour 40 à 50cm de diamètre en surface. L'analyse du film montre par ailleurs que le bouillonnement provoque des mouvements dans la masse d'eau. Ces mouvements, orientés du bas vers le haut à proximité du cône, seraient responsables de la circulation d'eau en surface.



*Figure 6 : photographies extraites de la vidéo sous-marine. Caméra placée à 50cm sous la surface de l'eau qui visualise la pénétration du jet (de haut en bas)*

Ces phénomènes ont également été observés pour le propane et le butane (figure 7).



Azote – 20mm	Azote – 16mm	C3H8 – 9mm	C4H10 – 9mm
H : 75cm	H : 30cm	H : 25cm	H : 50cm
Q : 0,9 Kg/s	Q : 0,5 Kg/s	Q : 0,5 Kg/s	Q : 0,7 Kg/s

*Figure 7 : comparaison des cônes de mélanges sous l'eau pour différents cas étudiés. H : hauteur du cône – images extraites des essais n°7, 9, 13 et 16 respectivement.*

On peut tenter une interprétation en reprenant les travaux disponibles dans la littérature relatifs à la pénétration d'un jet de liquide dans un autre liquide<sup>1</sup>. Il est précisé notamment qu'il se produit un intense transfert de quantité de mouvement à l'interface de la colonne de liquide pénétrante. Ce transfert de quantité de mouvement serait responsable de l'arrêt du jet et la modélisation que l'on peut en faire peut très bien suivre la théorie des jets libres habituellement mis en œuvre pour les gaz, puisqu'une des hypothèses centrales est que les fluides sont incompressibles. Le jet devrait être complètement dispersé à la profondeur où toute sa quantité de mouvement a été transférée à l'eau. Comme le paramètre d'échelle de ce transfert est le « diamètre fictif » ( $D_{buse} \times [Masse\ volumique\ jet / masse\ volumique\ eau]^{1/2}$ ), on peut facilement admettre que la profondeur de pénétration varie linéairement avec ce paramètre. On constate effectivement (figure 8) un accord raisonnable avec l'expérience.

<sup>1</sup> Cummings / Chanson

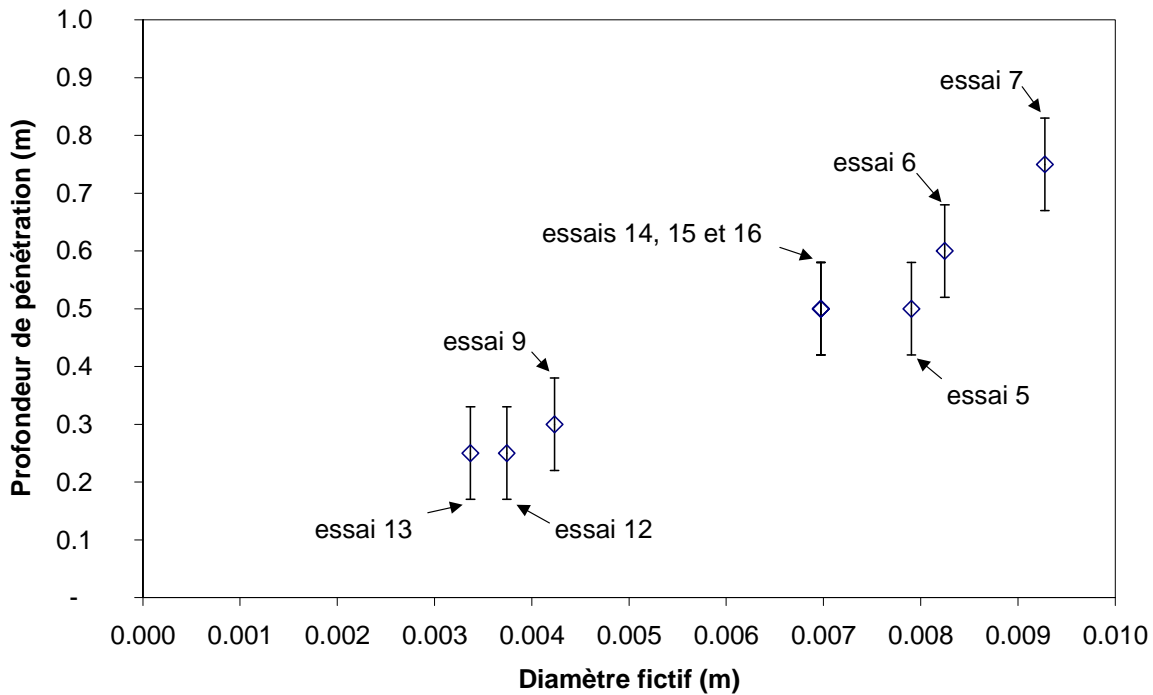


Figure 8 : corrélation entre le diamètre fictif et la profondeur de pénétration des jets

Il serait possible de déduire le débit d'eau entraîné par le jet. L'aspect essentiel est de retenir que ce mode de transfert de masse produit un mélange très intime entre les fluides qui est sans doute responsable de la vaporisation intense observée, avec une remontée de bulles vers la surface, mais aussi d'une certaine surchauffe des vapeurs et d'une remontée de l'eau refroidie par l'évaporation, sous l'effet de la poussée d'Archimède des bulles. C'est sans doute ce courant d'eau froide qui est observé par les caméras à la surface de l'eau et détecté par les thermocouples de surface (figure 4).

Une schématisation de ce processus est proposée sur la figure 9.

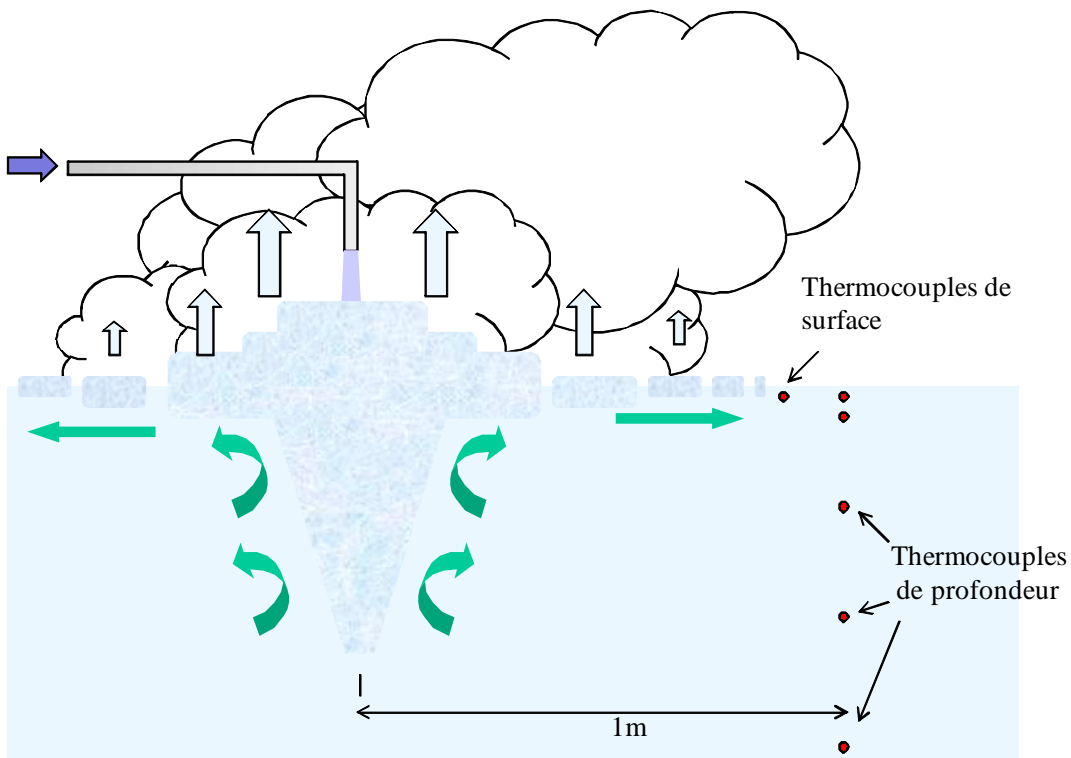


Figure 9 : Schéma interprétatif du phénomène de rejet de liquide cryogénique dans l'eau

On constate (figures 10 et 11) que la base du nuage que l'on observe au-dessus du bassin a une dimension très comparable à celle de la base du cône d'évaporation sous l'eau. Il semble donc acquis que l'essentiel du processus d'évaporation et d'échanges thermiques se produit dans le cône d'évaporation sous l'eau.



Azote – 20mm – 0,9 Kg/s

Azote – 16mm – 0,5 Kg/s

C3H8 – 9mm – 0,5 Kg/s

C4H10 – 9mm – 0,7 Kg/s

Figure 10 : comparaison de la taille des panaches à l'émission pour 4 cas étudiés. Images extraites des essais n°7, 9, 13 et 14





Figure 11 : Photographies extraites des vidéos de l'essai n°16 (butane – 9mm – 0,7 Kg/s)

Il n'est donc guère étonnant que les thermocouples disposés à 1m de l'axe du jet selon la profondeur du bassin n'aient presque rien détecté (figure 12), à part tout près de la surface où circule le courant d'eau froide. Incidemment, cela confirme que le bassin se comporte bien comme un puits thermique.

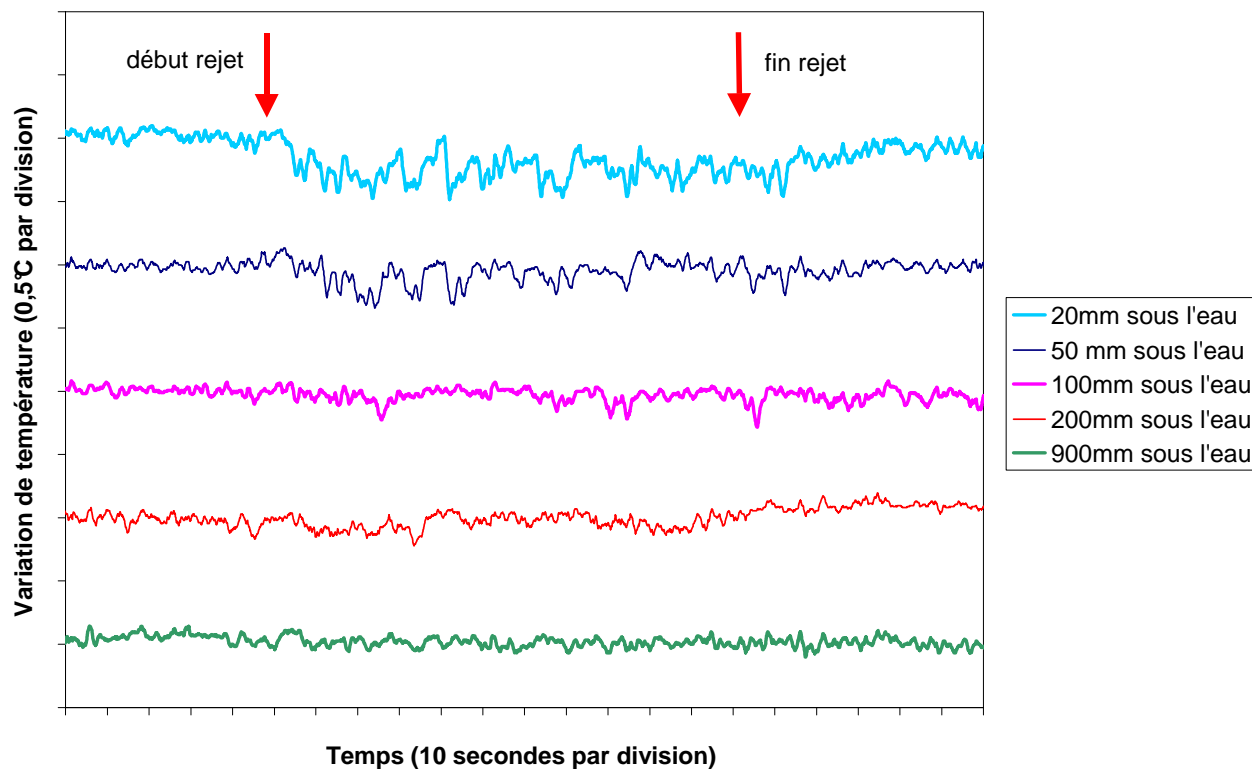


Figure 12 : Variation de température sous l'eau à différentes profondeurs et à 1m du point de rejet

### 3.1.3 CAS PARTICULIERS

#### 3.1.3.1 REJET SOUS LA SURFACE DE L'EAU

L'essai n°8 a été réalisé dans les conditions de l'essai n°7, mais avec l'orifice de fuite immergé sous 10cm d'eau. Bien que les conditions de fuites soient quasiment identiques, on observe un débit deux fois plus faible. Il est possible qu'une évaporation plus importante d'azote se produise dans la partie de canalisation immergée ce qui diminuerait le débit (l'effet du titre de vapeur est sensible).

A débit équivalent (essai 9 par exemple), la profondeur de pénétration est plus grande de la longueur du tube immergé. En dehors de cela les autres aspects de la dispersion sont identiques.

#### 3.1.3.2 CAS DU PENTANE

Dans le but de produire une zone d'évaporation plus petite que la taille du bassin, le débit de pentane a été réduit. Ainsi, le jet n'a pas la quantité de mouvement suffisante pour pénétrer dans l'eau. On note cependant que la vitesse d'impact du pentane est de quelques mètres par seconde, ce qui devrait correspondre aux situations pratiques visées. Dans ces conditions le pentane plus léger que l'eau s'écoule sur la surface et forme une nappe circulaire qui atteint rapidement une taille fixe comme on le détaille ci-après.

On rappelle que le pentane est un liquide évaporant (son point d'ébullition est plus élevé que la température de l'eau). En raison de la diffusion naturelle (moléculaire, turbulente) associée au renouvellement d'air au-dessus de la nappe, il se crée un flux permanent de pentane entre la nappe et l'air : le pentane s'évapore. Le phénomène d'évaporation, endothermique, génère une baisse de température au sein de la nappe, créant un gradient de température avec la masse d'eau.

Il n'est donc pas surprenant que la nappe devienne visible sur les images de la caméra thermique, sachant qu'elles ont été traitées comme expliqué auparavant. Il semblerait effectivement que la température de la nappe soit en dessous de la température de l'eau de quelques degrés (figure 13).



Figure 13 : photographie extraite de la vidéo thermique de l'essai n°18

Apparemment, la surface de cette nappe, obtenue pour un débit de 8,5 g/s, s'est stabilisée autour de 10 m<sup>2</sup>. On calcule un taux d'évaporation de 0,85 g/s/m<sup>2</sup>, soit une vitesse



moyenne de régression de la nappe de l'ordre de  $1,3 \mu\text{m/s}$ . On observe qu'après la fin de l'épandage, la nappe disparaît en 2 minutes. On en déduit que l'épaisseur de la nappe pendant l'épandage est de l'ordre de  $1,3 \times 120 = 160 \mu\text{m}$ . La quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation est essentiellement puisée dans la nappe de pentane elle-même et dans l'eau. Cette quantité de chaleur prélevée peut être estimée à environ  $300 \text{ W/m}^2$  [ $Q_{\text{evap}} \times \Delta H_{\text{pentane}}(T)$ ].

. Avec l'hypothèse que l'écart de température entre le pentane évaporant et l'eau est de 3 à 5°C d'après les mesures à la caméra thermique et que l'eau est la principale source de chaleur, on calcule que l'épaisseur de la couche limite thermique dans l'eau serait de l'ordre de 5 à 10 mm. Or les thermocouples de surface, dont la tête des thermocouples est immergée entre 1 et 3 mm, n'ont rien détecté. Cela tend à confirmer qu'une grande partie de la chaleur de la chaleur nécessaire à l'évaporation du pentane provient en fait de la nappe de pentane elle-même.

### 3.1.3.3 EFFET DES VAGUES

La figure 14<sup>2</sup> a été obtenue pour un épandage de pentane identique au précédent mais en présence de vagues. On estime que la surface de la nappe est de l'ordre de  $4 \text{ m}^2$  en tenant compte de l'effet de plissement des vagues. Par rapport à la situation précédente, la surface est réduite de plus 50%, mais sa géométrie évolue également : approximativement circulaire dans l'essai n°18 (sans vagues), elle a pris une forme d'ellipse allongée dans le sens de propagation des vagues. Le taux d'évaporation est significativement accru ( $2 \text{ g/s/m}^2$ , soit une vitesse de régression de  $3 \mu\text{m/s}$ ). Après l'épandage, la nappe disparaît en une minute, ce qui suggère que l'épaisseur moyenne de la nappe n'est pas différente de la situation sans vagues.

Dans la mesure où les conditions ambiantes sont strictement identiques à celle de l'essai 18, l'effet constaté sur la vitesse d'évaporation de la nappe provient nécessairement des vagues. Comme les vagues ne brisent pas la cohérence de la nappe liquide ni apparemment son épaisseur, il est probable que le phénomène affecte la couche limite de diffusion dans l'atmosphère immédiatement au-dessus de la nappe. Il existe toujours au-dessus d'un liquide évaporant une sous couche laminaire à travers laquelle diffusent les espèces chimiques. L'augmentation du taux d'évaporation surfacique observée lors des essais avec vagues conduit à penser que l'épaisseur de cette sous-couche laminaire serait réduite en moyenne en présence de vagues - le flux moléculaire étant inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche limite, d'après la loi de Fick. . Il est possible que le soulèvement du liquide étire la couche limite depuis le sommet de la vague vers les creux, ce qui aurait pour effet d'en diminuer localement l'épaisseur et donc d'augmenter le flux de matière. A contrario, dans les creux, l'épaisseur de la couche limite peut se trouver augmenté, si bien que l'effet d'augmentation moyen de la vitesse d'évaporation sur les bosses doit être plus important que la diminution dans les creux. On peut aussi avancer une autre interprétation plus globale et plus intuitive, qui consiste à considérer simplement que la perturbation de l'écoulement d'air juste au-dessus de la nappe, consécutive à la présence des vagues, a pour effet d'augmenter le niveau de turbulence local, donc le flux de masse entre la nappe et l'atmosphère. En termes de couches limites, on pourrait traduire cela par un accroissement par les vagues de

---

<sup>2</sup> Les échelles de couleur des vidéos thermiques doivent être interprétées avec précaution. Dans cet essai la surface de l'eau reflète le ciel relativement lumineux à ce moment là. Pourtant, les essais 18, 19 et 20 ont été réalisées le même jour sur une période de 4 heures avec la même température d'eau et d'air.

l'épaisseur de la couche limite turbulente au-dessus de la nappe, induisant la diminution de l'épaisseur moyenne de la couche laminaire, augmentant ainsi le flux de matière moyen de la nappe vers l'atmosphère.

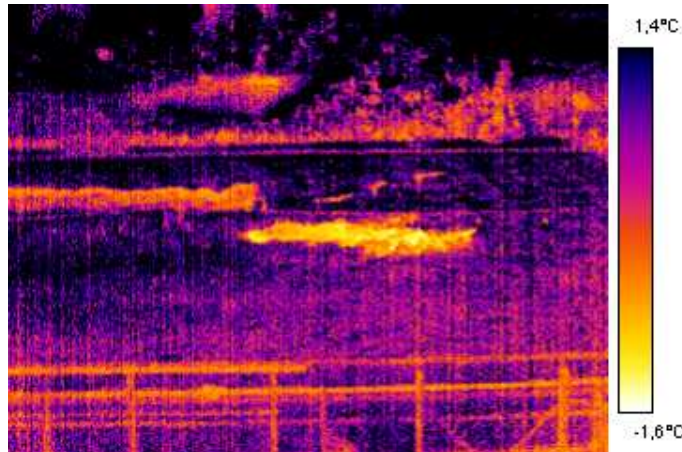


Figure 14 : photographie extraite de la vidéo thermique de l'essai n°20.

## 3.2 DISPERSION DES VAPEURS DANS L'ATMOSPHERE

### 3.2.1 REGIME THERMIQUE DANS LE PANACHE

On s'intéresse à la température de l'atmosphère dans le panache d'une part pour évaluer la densité locale d'où on peut tirer l'incidence des forces de pesanteur dans le processus de dispersion, et d'autre part pour examiner la nature du mélange (adiabatique ou non) entre les vapeurs issues du bassin et l'atmosphère.

Dans un précédent projet<sup>3</sup> le degré d'adiabaticité d'un panache qui se forme au-dessus d'une nappe évaporante a été étudié. Il apparaît que les évolutions de température dans le panache sont très majoritairement induites par les transferts de masse entre les vapeurs et l'atmosphère. Dans le cas présent, pour des nuages de 10 m de long environ, des vents de quelques m/s, on peut montrer que la cinétique d'évolution de la température due aux échanges de masse (dispersion par le vent) est 100 fois plus rapide que les échanges de chaleur entre le sol et le nuage. Il est donc tout à fait légitime de dire que le mélange vapeur/air ambiant s'opère de façon adiabatique, c'est-à-dire que l'enthalpie se conserve. Un développement mathématique simple permet alors d'obtenir une formulation de la concentration C dans le panache en fonction des températures mesurées et du taux d'humidité dans l'air :

$$C \approx \frac{C_{p\text{-air}} (T_{\text{ambient}} - T_m) + L_{\text{H}_2\text{O}} \times f_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{p\text{-g}} (T_m - T_{\text{Ge}})}$$

avec :

<sup>3</sup> C. Proust - Mécanisme de dispersion et d'explosion lors de fuites d'hydrogène liquide - 1999

$C_{p\text{-air}}$ ,  $C_{p\text{-g}}$  : capacité calorifique des gaz en présence

$T_{\text{ambient}}$  : température de l'air ambiant avant le rejet

$T_m$  : température mesurée au point où est calculée la concentration

$T_{Ge}$  : température du gaz test à l'émission

$L_{H_2O}$  : chaleur latente de condensation de l'eau (de l'atmosphère)

$f_{H_2O}$  : fraction condensable de l'eau sous forme vapeur dans l'ambiante

Pour utiliser cette relation de façon prédictive, il faut connaître  $T_{Ge}$ . Pour déterminer ce paramètre avec une précision raisonnable<sup>4</sup>, on a fait la moyenne des mesures de température sur le premier mât et comparé à la moyenne des mesures de concentration réalisée sur ce mât en choisissant une valeur de  $T_{Ge}$  qui permette un accord parfait, puis cette valeur de  $T_{Ge}$  a été appliquée sur les autres mesures de température (les autres mâts) et les concentrations déduites ont été comparées de la même manière (c'est-à-dire par moyenne) aux concentrations mesurées. On constate sur la figure 15 une bonne cohérence des mesures lorsqu'une valeur unique pour  $T_{Ge}$  a été choisie.

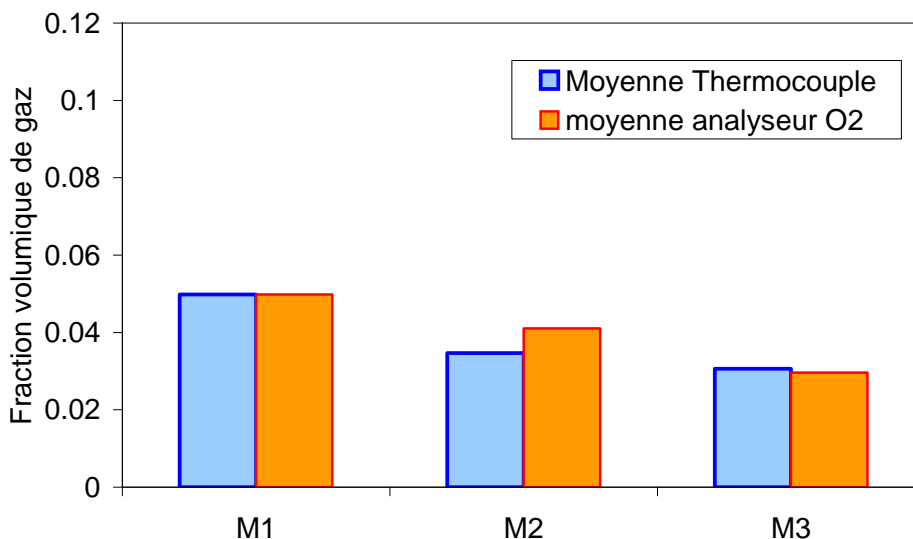


Figure 15 : comparaison des moyennes de concentrations mesurées et déduites (des mesures de température) pour l'essai n°7

Tous les essais ont été traités de cette façon et les valeurs de  $T_{Ge}$  obtenues sont présentées dans le tableau II.

<sup>4</sup> Les thermocouples réalisent une mesure ponctuelle et « instantanée » à l'échelle de la durée des prélèvements pour analyse. La mesure du taux d'oxygène par prélèvement correspond à une moyenne dans l'espace puisqu'on absorbe un volume de l'atmosphère, et une moyenne dans le temps compte tenu du temps de réponse de la chaîne de mesure. Si on veut comparer les deux types de mesure, on est amené à faire une moyenne dans l'espace et dans le temps des mesures de température. Pour faire cela on a choisi d'assimiler la moyenne d'espace pour les températures à la moyenne instantanée sur la hauteur du mât, puis une seconde moyenne sur la durée des prélèvements a été opérée.

Essai	Liquide	T°C eau	T°C air	Pt de rosée °C	diamètre rejet (mm)	débit moyen (Kg/s)	Température des gaz à l'émission
5	N2	10.0	10.8	10.2	16	0.90	-80
6	N2	10.5	11.3	10.9	20	0.80	-45
7	N2	10.5	12.1	10.3	20	0.90	-45
8	N2	11.0	12	11.1	20	0.49	-15
9*	N2	10.0	12.1	11	16	0.47	-70
12	C3H8	6.5	11.1	2.3	10	0.41	-16
13	C3H8	5.0	7.4	4.2	9	0.49	-23
14	C4H10	5.5	1.2	-0.5	9	0.68	0
15	C4H10	4.5	4.6	1.8	9	0.63	0
16	C4H10	4.5	4.6	2.4	9	0.69	0

Tableau II : valeurs des températures des gaz à l'émission ( $T_{Ge}$ ) pour les essais du tableau I (\*essai 8 : sous l'eau – essai 9 : sur l'eau, avec vagues)

On constate que  $T_{Ge}$  peut être très différent de la température d'ébullition, ce qui s'explique par le régime d'évaporation sous l'eau tel que décrit auparavant. On peut en particulier s'attendre à ce que l'écart au point d'ébullition s'accroisse à mesure que les échanges avec l'eau sont plus violents. Il n'est pas surprenant de s'apercevoir par exemple que le rejet sous l'eau se traduise par des vapeurs plus chaudes, puisque les échanges commencent avant la sortie de la canalisation, et puisque la profondeur ultime du jet est plus importante. Il est cependant difficile, faute d'avoir à ce jour un modèle de mélange disponible, d'interpréter plus précisément ces données. Tout au plus peut on remarquer que la température des vapeurs estimée pour l'essai n°7 correspond assez précisément à l'image thermique de la zone d'émission du panache (figure 5). Pour le butane, on trouve une température proche du point d'ébullition, mais différente quand même.

### 3.2.2 CONCENTRATION DE GAZ ET DENSITE DANS LE PANACHE

La connaissance des valeurs de  $T_{Ge}$  permet ensuite de transformer les écarts de température mesurés (figure 16) en concentration de gaz (figure 17).

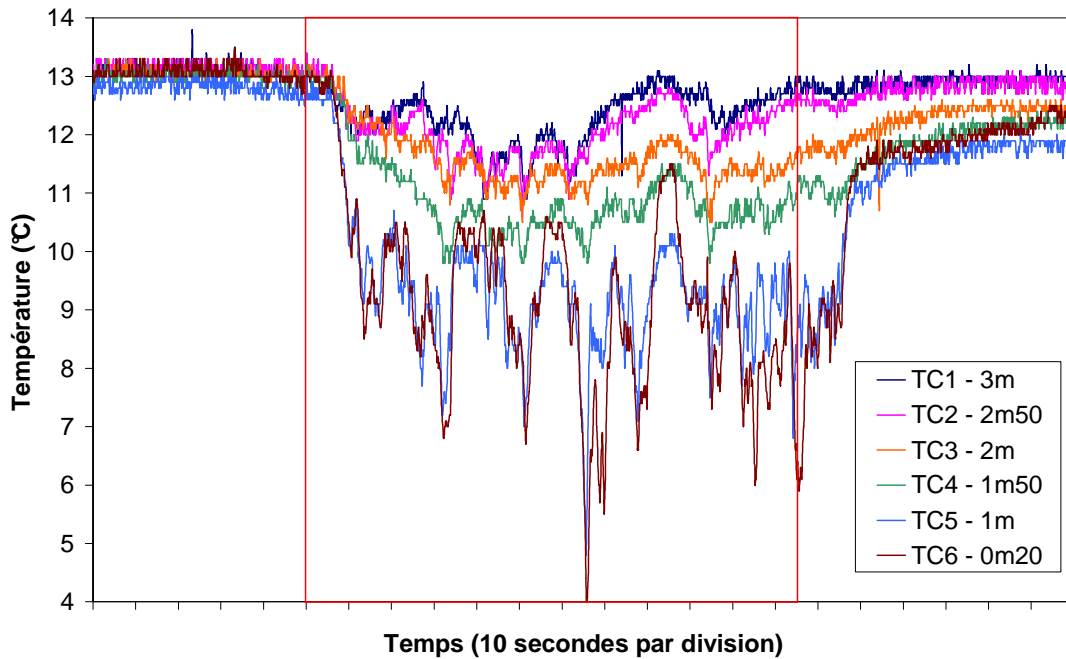


Figure 16 : Mesures de température sur le mât M1 pour l'essai n°7 – cadre rouge : moment du rejet

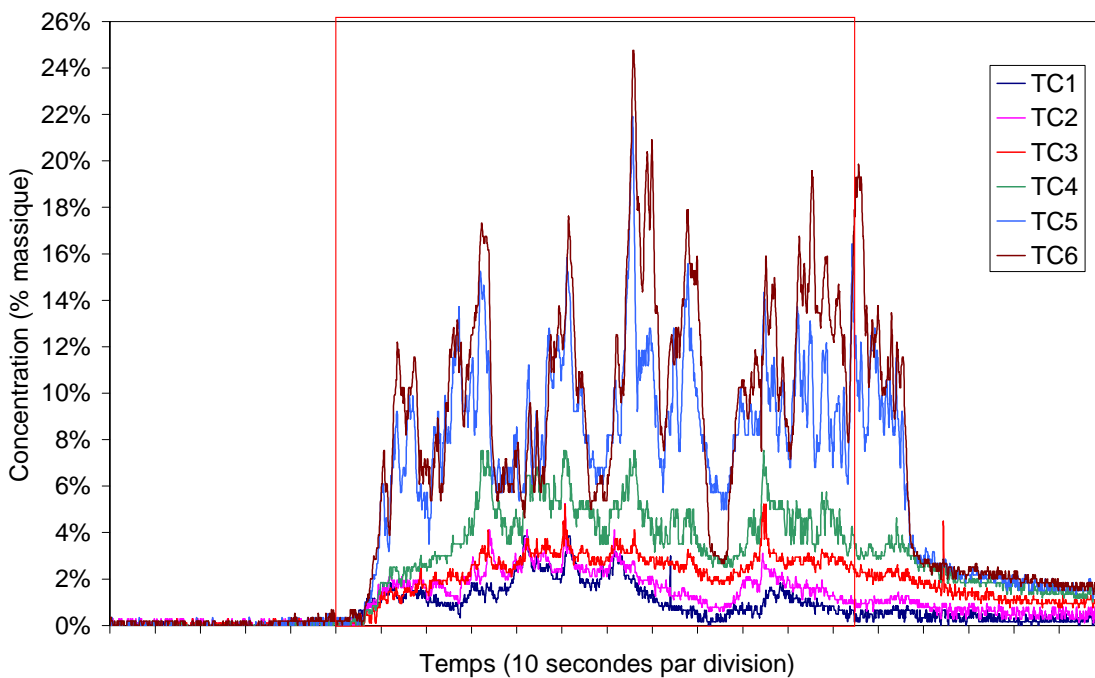


Figure 17 : Concentrations en gaz obtenues à partir des mesures de température sur le mât M1 pour l'essai n°7 – cadre rouge : moment du rejet

Pour le mât M1, on constate que la concentration de gaz semble très proche pour les capteurs situés le plus près du sol (à 0,2 et 1 m) et qu'au-delà, la concentration diminue fortement en fonction de l'altitude. En revanche, pour le mât M3 (Figure 18), on observe une décroissance régulière de la concentration depuis le sol. Le mât M2 est une situation

intermédiaire. C'est vrai pour l'ensemble des cas traités (annexe 7). On remarque que le taux de décroissance est typiquement de l'ordre de 1 m (distance qui permet d'observer une diminution de moitié de la concentration) pour le mât M1, de 1m50 pour le mât M2 et de 2m pour le mât M3. Il semble bien que ces longueurs caractéristiques soient du même ordre que la demi-largeur des jets produits par les ventilateurs (Cf. annexe 2) : 1,2m à 12m (M1), 1,5m à 15m (M2) et 1,8m à 18m (M3). Cela signifierait que la turbulence induite par les ventilateurs interviendrait de façon très significative dans le processus de dispersion. Mais on pourrait montrer que du point de vue de la répartition dans l'espace de la concentration du gaz, la théorie des jets associée à l'écoulement produit par les ventilateurs ne reproduirait correctement les observations qu'au-delà du mât M2. Pour le mât M1, les mesures effectuées près du sol sont en désaccord avec cette théorie. De ce point de vue on remarque également (figure 17) que la dynamique des signaux est très différente au-dessous et au-dessus de 1m. On observe d'amples fluctuations de températures et de concentrations dans la couche près du sol, qui disparaissent presque totalement au-dessus de 1m50. L'amplitude des fluctuations près du sol (à moins de 1m) n'est pas compatible avec la théorie des jets.

Il est donc très vraisemblable que le comportement du nuage dans cette zone près du sol reflète l'effet du processus d'évaporation dans le bassin. On note par exemple sept « pics » de concentration pendant la durée de la fuite. Lorsqu'on observe le processus d'évaporation sous l'eau (caméra sous-marine) on constate également, à peu près à cette même fréquence, que le jet s'enfonce plus profondément, ce qui se traduit par une vaporisation plus intense.

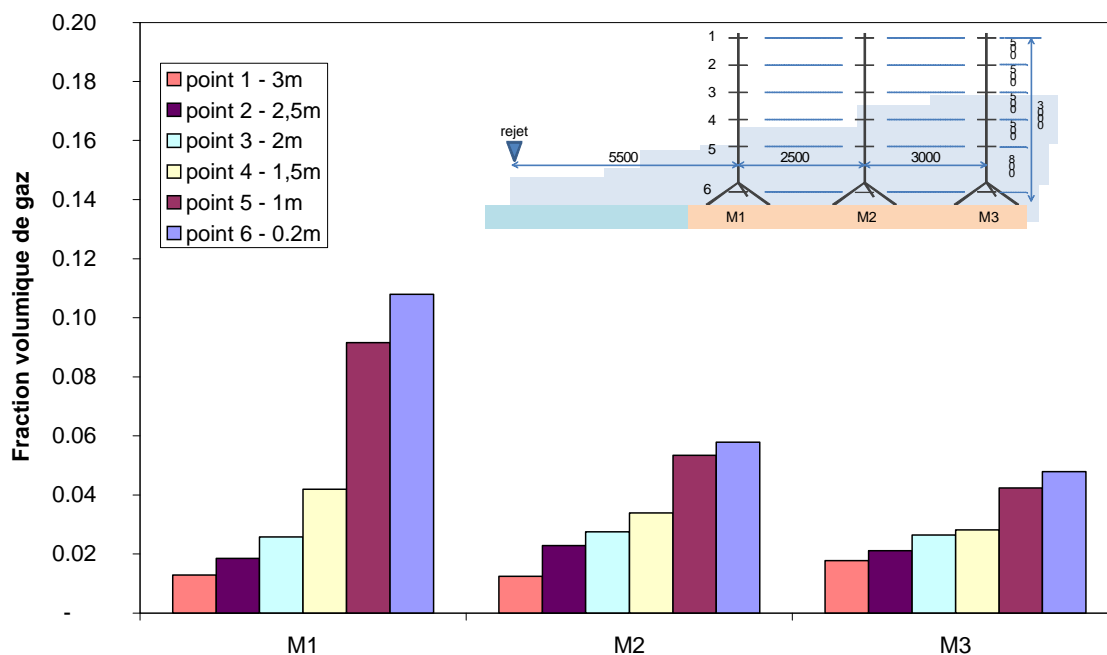


Figure 18 : Concentrations calculées pour les trois mâts pour l'essai n°7

Il se trouve que dans les conditions d'essai (avec ventilation forcée), on pourrait prédire les dimensions et le volume du nuage explosif sur la base de la théorie des jets puisque, pour les faibles concentrations (typiquement 1% pour la LIE de la plupart des hydrocarbures), c'est la turbulence de l'écoulement qui domine. Rien n'indique qu'il en irait

de même dans une situation plus réaliste avec des débits beaucoup plus important et une turbulence atmosphérique beaucoup plus faible (Cf. section suivante).

Enfin, l'examen de la figure 10 et la comparaison des effets visuels de la dispersion avec les estimations des concentrations de gaz (annexe 7), démontre qu'on ne peut d'aucune manière faire l'hypothèse que le panache visible englobe la zone dangereuse. Il est en particulier des situations où il n'y a aucun panache (exemple : essai n°16 au butane), alors que la zone dangereuse s'étend en aval du point de rejet jusqu'à une distance de plus de 15 m...

Pour comparer les effets de turbulence respectifs de l'écoulement de l'atmosphère et de la vaporisation, il faut estimer la masse volumique du nuage. Pour calculer la densité on a utilisé l'expression suivante :

$$\frac{1}{\rho} = \left[ V_{\text{mol}} \cdot \frac{T_i}{T_0} \cdot \left[ \frac{f_{\text{gaz}}}{M_{\text{mol}_{\text{gaz}}}} + \frac{f_{\text{H}_2\text{O}_{\text{gaz}}}}{M_{\text{mol}_{\text{H}_2\text{O}}}} + \frac{f_{\text{air}}}{M_{\text{mol}_{\text{air}}}} \right] + \frac{f_{\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}}} \right]$$

Avec :

f : fraction massique des espèces présentes dans l'atmosphère (air, H<sub>2</sub>O vapeur, H<sub>2</sub>O liquide, gaz d'essai)

Mmol : masse molaire des gaz présents

Vmol : volume molaire dans les conditions standards (22,4 l/mol)

ρ<sub>H<sub>2</sub>O<sub>liq</sub></sub> : masse volumique de l'eau liquide

Pour l'essai n°7 les résultats sont présentés sur la figure 19. On remarque que cette formule est établie en considérant que l'eau provient uniquement de l'atmosphère. Il n'est pas interdit de penser que le rejet lui-même mette en suspension de fines gouttelettes d'eau. Il pourrait ainsi se produire une augmentation de la densité du nuage selon un phénomène spécifique à l'épandage sur l'eau.

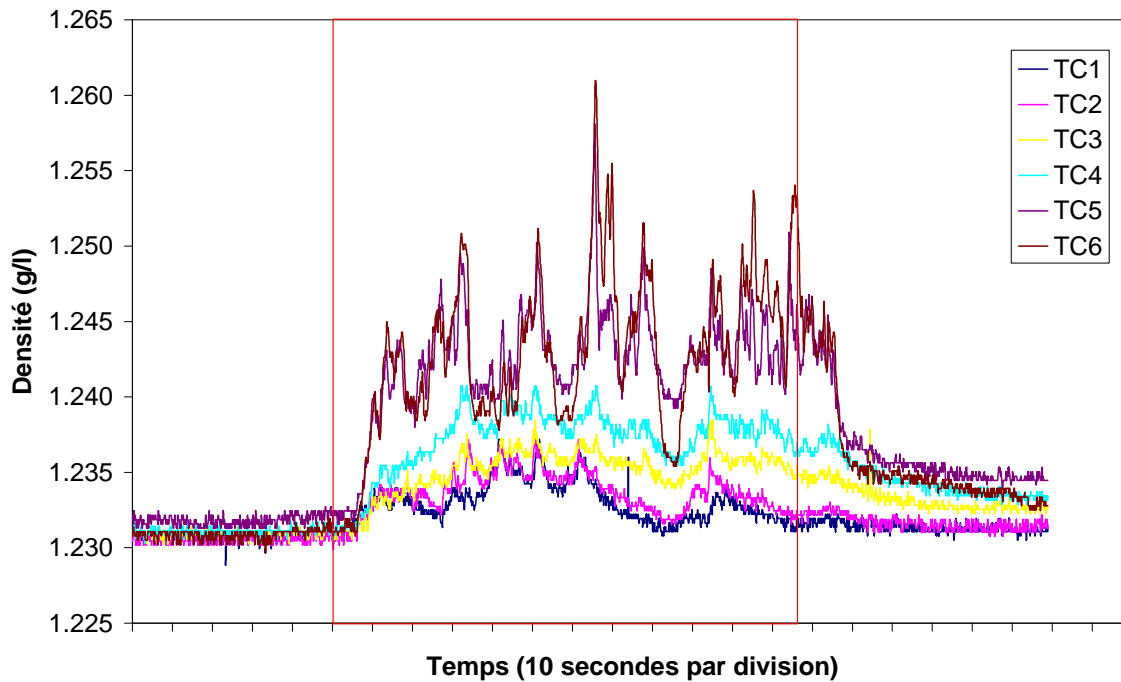


Figure 19 : Densités dans le panache calculées à partir des mesures de température sur le mât M1 pour l'essai n°7 – cadre rouge : moment d u rejet

### 3.2.3 MECANISME DE DISPERSION

On présente sur les figures 20 et 21 les vitesses d'écoulement instantanées, moyennes et les fluctuations autour de cette moyenne. On constate que la vitesse a une moyenne de l'ordre de 3m/s avec des fluctuations autour de cette moyenne de l'ordre de 1m/s. C'est tout à fait caractéristique de l'écoulement dans un jet et correspond assez bien aux estimations présentées dans l'annexe 2<sup>5</sup>. Le « trou » observé au milieu du rejet semble dû à une rafale de vent de travers comme on l'a constaté sur le film. Il n'a pas été mis en évidence d'effet significatif de la présence du nuage sur ce schéma aéraulique. Il faut reconnaître cependant que la mesure de turbulence n'a pas été effectuée au-dessous de 80cm c'est-à-dire dans la zone où devrait se manifester l'effet de l'évaporation.

<sup>5</sup> Le « jet » en question correspond à l'écoulement d'air généré artificiellement par les ventilateurs



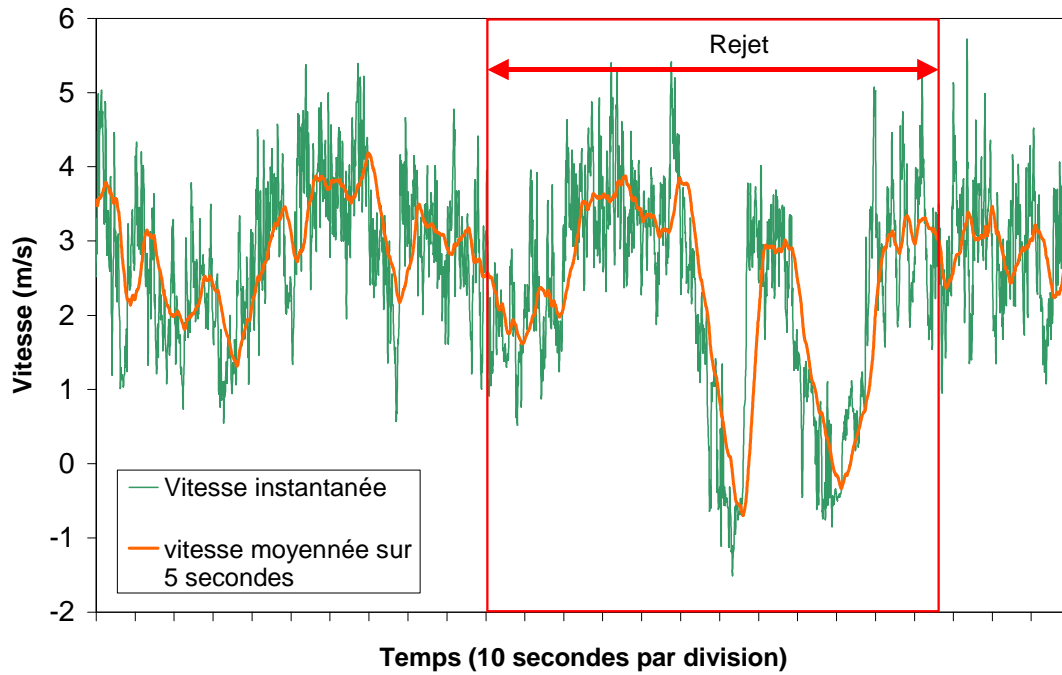


Figure 20 : Vitesse instantanée mesurée sur le Mât M2 à 80cm du sol pour l'essai n<sup>o</sup>7. Superposition de la vitesse moyenne (moyenne glissante sur 2 secondes)

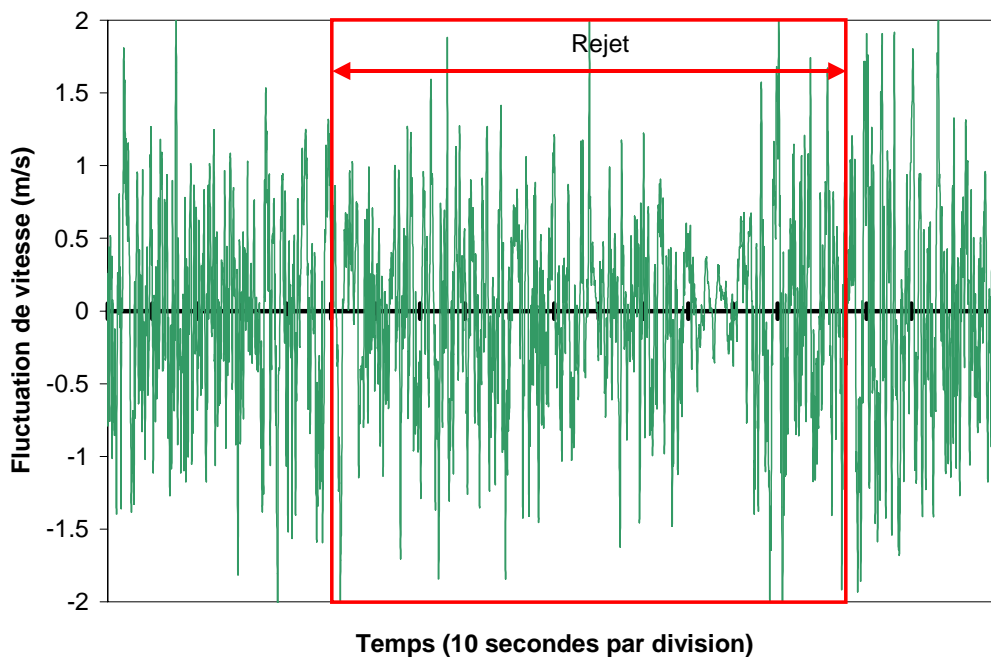


Figure 21 : signal de vitesse traité (mât M2 à 80cm du sol) de façon à faire apparaître les fréquences supérieures à 1 Hz – cas de l'essai n<sup>o</sup>7.

Si on s'intéresse au temps caractéristique des fluctuations, on mesure sur la figure 21 une période de l'ordre de 0,5 seconde, soit une longueur d'onde de  $3 \times 0,5 = 1,5$  m (vitesse moyenne  $\times$  période), en bon accord avec les estimations de la théorie des jets (la demi-

largeur du jet). Il en résulte que l'ordre de grandeur du coefficient de diffusion turbulente<sup>4</sup> est  $1 \times 1,5 = 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$  (fluctuation moyenne  $\times$  longueur d'onde).

On peut tenter d'estimer l'intensité des effets de mélange qui seraient induits par les forces de pesanteur qui agissent sur le nuage.

Si on suppose que la nappe de gaz issue de la vaporisation a une épaisseur de 1 m au niveau des mâts de mesures, comme le suggèrent les mesures, alors on peut estimer la vitesse naturelle d'écoulement ( $U_{\text{pesanteur}}$ ) de cette nappe dense en utilisant l'équation de Bernoulli :

$$U_{\text{pesanteur}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot H}{\rho_o}}$$

avec :

$\Delta\rho$  : différentiel de masse volumique entre le nuage et l'atmosphère environnante ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$g$  : accélération de la pesanteur ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

$H$  : hauteur du nuage (m)

$\rho_o$  : masse volumique de l'atmosphère environnante ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

La masse volumique est déduite directement des mesures de température (figure 19) et on obtient pour le mât M1 une vitesse caractéristique d'écoulement gravitaire de 1,5 m/s. En prenant comme épaisseur de couche limite associée la hauteur de la nappe gazeuse (1m), on estime que le coefficient de diffusion turbulente qui résulte de l'action de cet écoulement est de l'ordre de  $1,5 \times 1 = 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$ . On constate que cette valeur est identique à celle du coefficient de diffusion turbulente de l'écoulement d'air externe (le jet). Il n'est donc pas surprenant que l'on observe à la fois l'effet de l'écoulement de la nappe et du jet au niveau du mât M1 (cf. commentaires associés aux figures 17 et 18 ci-avant). Si on fait le même calcul pour le mât M3, on calcule une vitesse gravitaire de l'ordre de 0,9 m/s, ce qui fait que la nappe de 1m de haut diffuse sous l'effet des forces de gravité à  $0,9 \text{ m}^2/\text{s}$ , c'est-à-dire avec une intensité nettement plus petite que celle du jet. Il est donc assez logique qu'au droit du mât M3 et au-delà, ce soit surtout l'écoulement d'air qui domine le processus de diffusion.

#### **4. CONCLUSIONS**

Dans le cadre de cette opération, on a tout d'abord tenté de mettre en place une métrologie robuste susceptible d'être employée à plus grande échelle, par exemple en mer. On a en particulier tenté d'observer au moyen de thermocouples flottants la formation d'une nappe évaporante. On s'est aperçu que les fluides susceptibles de fournir un écart de température détectable s'évaporent non pas sous forme d'une nappe à la surface de l'eau mais dans le cône de mélange qui se forme sous la surface au point où le jet de liquide se brise dans l'eau. Certains liquides, en particulier ceux qui ne sont pas stockés sous pression, peuvent former une nappe mais l'écart de température est insuffisant pour une détection par thermocouple. Il semblerait que dans ces deux situations la thermographie infrarouge puisse donner des informations qualitatives et dans une certaine mesure quantitatives.

On a trouvé que l'utilisation de thermocouples et de quelques mesures de concentrations d'oxygène (pour calage) permettait d'obtenir toutes les informations relatives à la répartition des espèces et à la structure du nuage. On note que, pour des rejets massifs, l'écoulement gravitaire dans le nuage devrait très nettement dominer les effets de turbulence atmosphérique si bien que l'épaisseur du nuage devrait rester relativement faible, probablement inférieure à 10m pour ce qui concerne la zone inflammable. Dans ce cas, l'instrumentation de mâts sur des bouées maritimes autonomes paraît tout à fait envisageable. Une fréquence d'échantillonnage de 10Hz doit néanmoins être retenue. Enfin, il faut prévoir pour chaque mât une mesure d'hygrométrie et de vent.

Des expériences ont été réalisées, non simplement pour tester cette instrumentation, mais également pour examiner les processus d'évaporation. On a mis en évidence en particulier que la partie visible du nuage n'avait pas de rapport direct avec la position de la zone inflammable et qu'il existe même des situations où on n'observe pas de panache, alors qu'on détecte avec les capteurs un nuage inflammable. De fait, la présence ou non d'un panache visible dépend des conditions climatiques (point de rosée, en particulier) et du point d'ébullition du liquide répandu sur l'eau.

A propos du processus d'évaporation, il semble que les liquides à bas point d'ébullition (on a testé l'azote liquide, le propane et le butane), se mélangent avec l'eau sous la surface, qu'une vaporisation intense s'ensuit avec une remontée de bulles vers la surface. Il en résulte que la température des vapeurs est systématiquement plus grande que le point d'ébullition. Cet aspect constitue une différence essentielle par rapport à un rejet sur la terre ferme. Notons à ce propos que les modèles courants de dispersion reposent sur l'hypothèse de la formation d'une nappe sur la surface de l'eau. Ils ne permettraient probablement pas ici de prédire correctement les caractéristiques du nuage dans des conditions de brassage eau-gaz liquéfié similaires à celles des essais ici présentés.

Pour ce qui concerne le processus de dispersion, il semblerait que la densité des vapeurs soit le paramètre clé, mais les conditions des essais n'ont pas permis de préciser nettement ce point. Néanmoins, la condensation de la vapeur d'eau de l'atmosphère aurait une incidence notable au moins pour les rejets cryogéniques. On se demande également si de fines gouttelettes d'eau entraînées avec les bulles lors du processus de vaporisation ne contribueraient pas à alourdir très significativement les vapeurs, ce qui constituerait une autre spécificité des rejets en mer.

On s'est intéressé à l'effet des vagues sur l'évaporation. Sans surprise, lorsque la vaporisation se produit sous l'eau dans le cône de mélange, on n'a pas noté d'effet spécifique. En revanche, lorsque le point d'ébullition est nettement plus élevé que la température de l'eau et de l'air, il peut se former une nappe sur la surface et il apparaît que les vagues augmentent très nettement la vitesse d'évaporation. Cet effet ne serait pas dû à la fragmentation de la nappe ou à son étirement puisque son épaisseur ne varie pas et qu'elle reste continue dans les conditions de l'essai. On pense cependant que les ondulations étirent et affinent la couche limite de diffusion moléculaire située immédiatement au-dessus de la nappe. Ce point reste évidemment à préciser.

## 5. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Descriptif de l'installation d'essais	6
Annexe 2	Etablissement des conditions de vent au-dessus du bassin	2
Annexe 3	Description du dispositif utilisé pour la création de vagues	2
Annexe 4	Description du dispositif de mesure de la turbulence	7
Annexe 5	Résultats des essais – mesures en surface du bassin	3
Annexe 6	Résultats des essais – mesures sur la profondeur	2
Annexe 7	Résultats des essais – mesures de concentration dans le panache	3



## ANNEXE 1

### DESCRIPTION DE L'INSTALLATION D'ESSAIS

Le schéma global de l'installation d'essais est représenté sur la figure A1 – 1. Cette installation est constituée de trois parties :

- un dispositif de rejet prévu pour des liquides cryogéniques (azote) ou gaz liquéfiés (propane, butane) ou liquides évaporants (pentane),
- un bassin instrumenté suffisamment grand pour y réaliser des rejets de quelques centaines de g/s des liquides prévus sans effet de bord,
- un système de mesure à l'atmosphère pour caractériser le panache créé par le rejet à l'atmosphère.

Par ailleurs, l'installation est filmée en plan large en vidéo haute définition (Sony HVR-V1E – 25 images/s) et en vidéo thermique (FLIR Thermacam 400 – 50 images/s). La température et l'hygrométrie ambiantes sont relevées pour chaque essai.

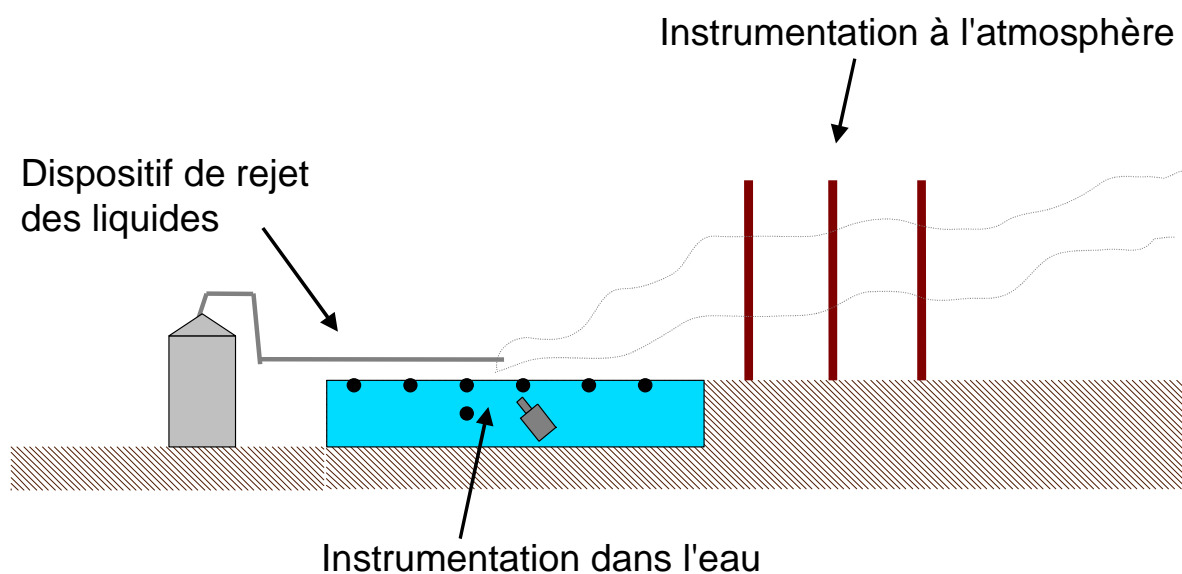


Figure A1 – 1 : schéma global de l'installation

#### A1.1 - DISPOSITIF DE REJET

L'azote liquide est contenu dans un réservoir de 400 litres (ranger/Air Liquide) sous une pression limitée à l'aide d'une soupape tarée à 4 bar. Pour les débits importants, une boucle de réchauffage peut être utilisée pour compenser la baisse de pression due à la perte de liquide. Ce réservoir présente une restriction au niveau du prélèvement estimée à 15 mm.

Pour le propane et le butane, le réservoir utilisé est un réservoir en acier de 100 litres préalablement rempli à partir de conteneurs commerciaux de 400 litres. Ce

réservoir peut également être pressurisé à l'azote. Un tube plongeur de 12 mm de diamètre permet d'y prélever la phase liquide.

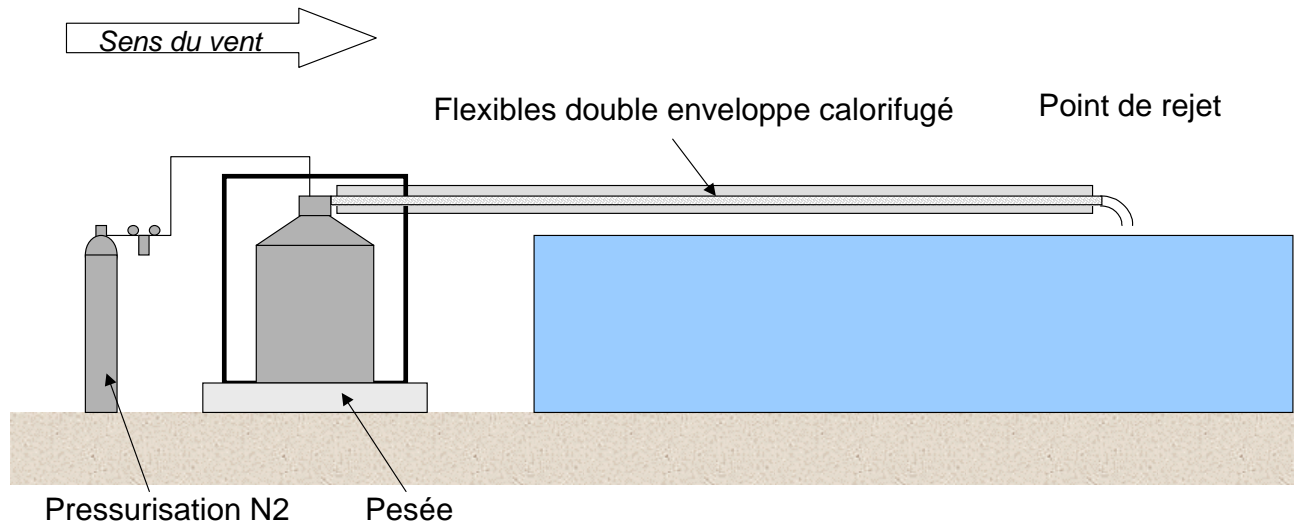


Figure A1 – 2 : schéma du dispositif de rejet – réservoir et point de rejet

Les différents réservoirs utilisés sont pesés de façon à connaître le débit durant le rejet.

Un flexible de 8 mètres de long et de 25 mm de diamètre interne relie le réservoir au point de rejet au milieu du bassin (figure A1 – 2). Ce flexible est constitué de deux enveloppes et est calorifugé sur toute sa longueur.

Au point de rejet, un système de vannes permet de purger à l'atmosphère le contenu du flexible (évacuation de la phase gazeuse) avant l'essai (figure A1 – 3). La vanne de rejet (vanne à boisseau à passage intégral) est munie d'un tube coudé de façon à rejeter le liquide verticalement dans l'eau d'une hauteur de 15cm. Des orifices calibrés de différents diamètres peuvent être fixés à l'extrémité de ce tube.





Figure A – 3 - Photographie du point de rejet

Pour les liquides évaporants, le rejet est réalisé à l'aide d'un simple tube raccordé à une pompe péristaltique. Le liquide est pesé directement dans la bouteille qui alimente la pompe.

### A1.2 - INSTRUMENTATION DU BASSIN

Afin de détecter la présence éventuelle d'une nappe de liquide s'évaporant, Une ligne de 10 thermocouples (type K, retreint 0,5mm) est disposé à la surface du bassin suivant l'axe principal (direction du vent). Ces thermocouples sont fixés sur des flotteurs de façon à être immergés en permanence de quelques mm sous la surface de l'eau (figure A1 – 4).

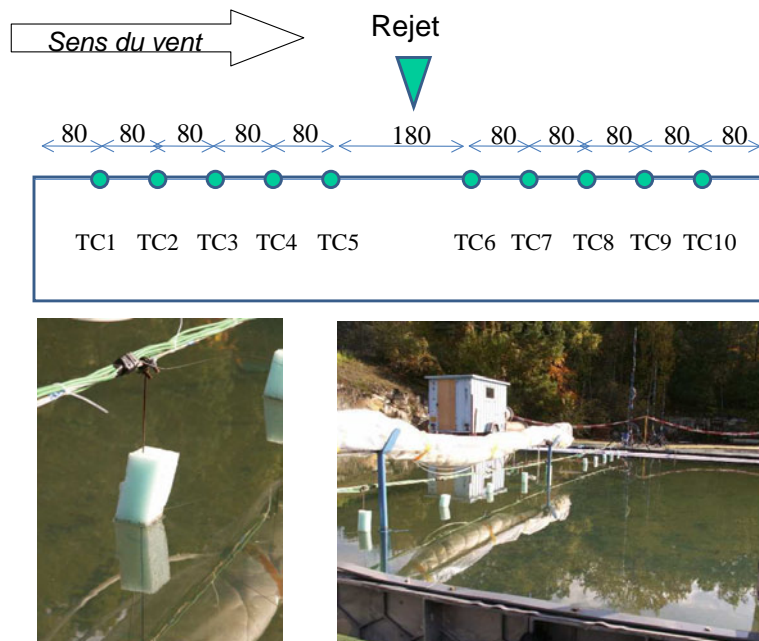


Figure A1 – 4 : localisation des 10 thermocouples de surface

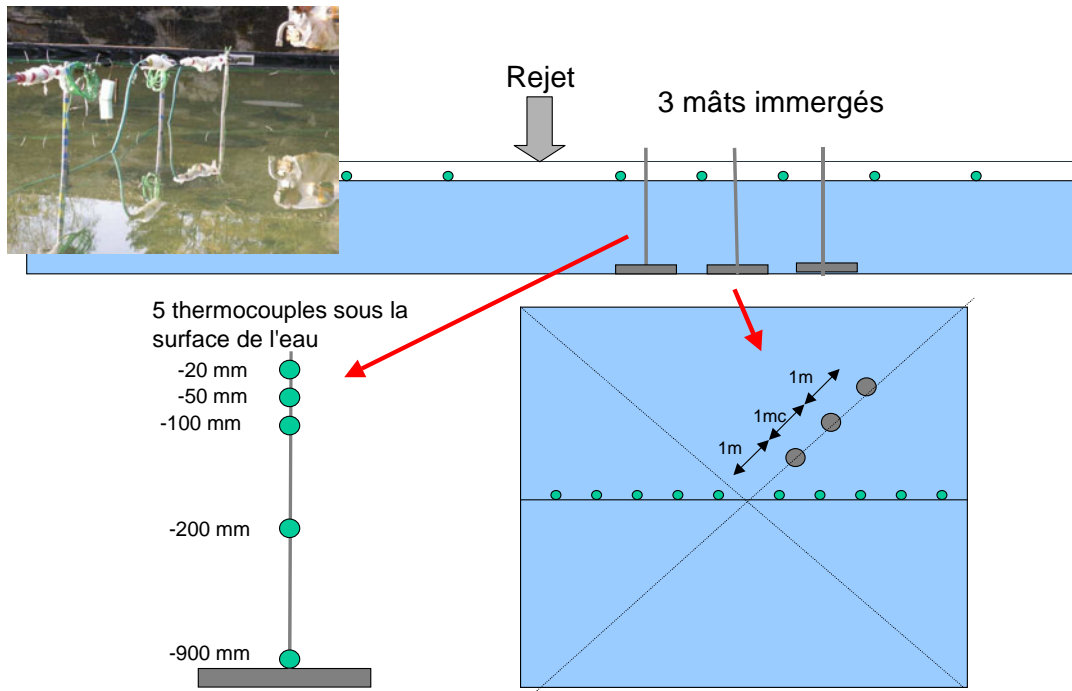


Figure A1 – 5 : localisation des thermocouples sous l'eau

Plusieurs thermocouples sont également disposés dans la couche d'eau afin de mesurer d'éventuels gradients thermiques à proximité du point de rejet. Leur position est indiquée sur la figure A1 - 5.

Enfin, 3 caméras grand angle sont immergées dans le bassin pour visualiser, sous différents angles, le comportement des liquides au contact de l'eau.

### A1.3 - INSTRUMENTATION A L'ATMOSPHERE

En aval du rejet, 3 mâts de mesure ont été installés (figure A1 – 6). Chacun de ces mâts supporte plusieurs points de mesures :

- 3 points de prélèvements (tube diamètre interne 4mm, longueur 16m) raccordés à un analyseur O<sub>2</sub>,
- 6 thermocouples (type K, retreint 0,5mm) répartis sur une hauteur de 3 mètres,
- 2 sondes de turbulence placées à 800 et 1500 mm du sol (1 seule sonde à 1500 mm pour le dernier mât).

Les analyseurs O<sub>2</sub> sont des appareils Servomex de type paramagnétique. La concentration en gaz est calculée par différence lorsque la concentration en oxygène de l'atmosphère baisse. Un seul analyseur est utilisé par mât. Un dispositif à séquence permet de scruter chacun des trois points de prélèvement à tour de rôle et à raison de 1 scrutation par minute (20 secondes par point de prélèvement). Cette séquence a été établie en mesurant les délais de transfert dans les lignes de prélèvement et en prenant en compte le temps de réponse de l'analyseur.

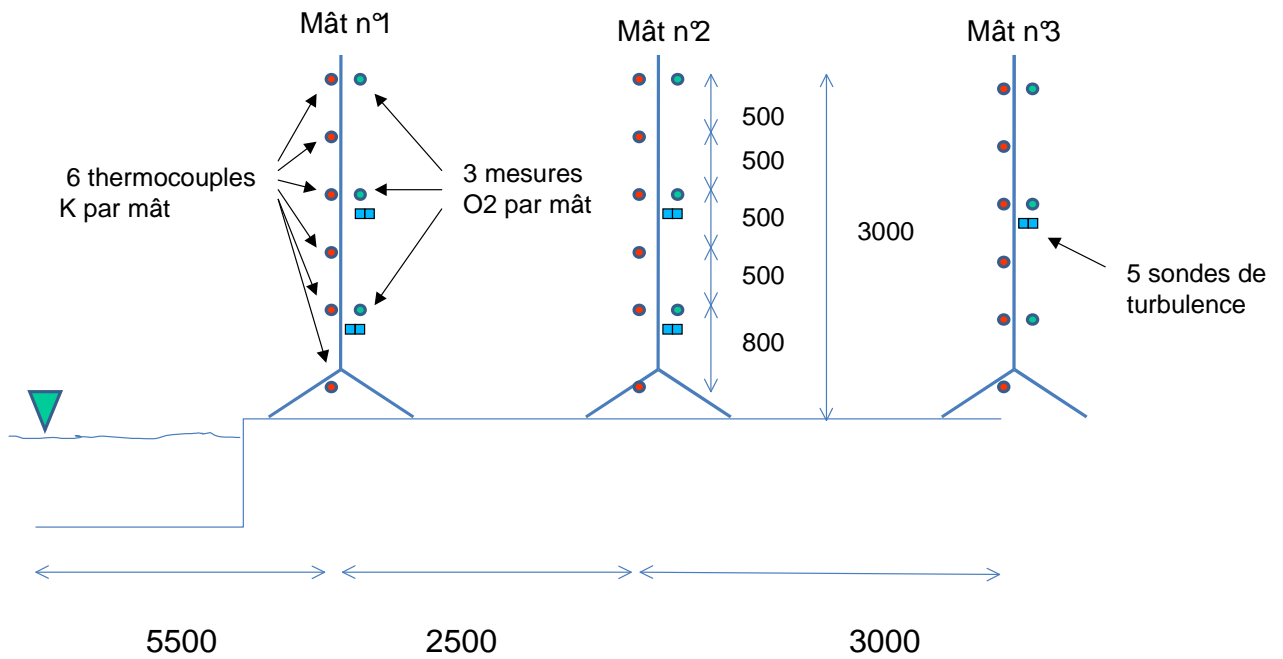


Figure A1 – 6 : Mesures à l'atmosphère

L'incertitude sur la mesure de la concentration en O<sub>2</sub> est de l'ordre de +/-0,1% v/v, ce qui se traduit par une incertitude sur la mesure de gaz de +/-0,5% v/v. En pratique, compte tenu de la nature très fluctuante du phénomène étudié comparée au temps d'intégration de cette mesure, on utilise la moyenne des 3 mesures obtenues sur un mât sur une période pour laquelle le panache est correctement orienté.

Les thermocouples permettent d'évaluer, à partir du gradient de température durant le rejet et donc de la quantité de chaleur retirée à l'atmosphère, la concentration en gaz produite par l'évaporation du liquide au point de rejet.

La relation qui permet de calculer la concentration en gaz est la suivante :

$$C \approx \frac{C_{p\text{-air}} \left( (T_{\text{ambient}} - T_m) + L_{\text{H}_2\text{O}} \times f_{\text{H}_2\text{O}} \right)}{C_{p\text{-N}_2} (T_m - T_{\text{N}_2\text{source}})}$$

avec :

C<sub>p-air</sub>, C<sub>p-N<sub>2</sub></sub> : capacité calorifique des gaz en présence

T<sub>ambient</sub> : température de l'air ambiant avant le rejet

T<sub>m</sub> : température mesurée au point où est calculée la concentration

T<sub>N<sub>2</sub>source</sub> : température du gaz test à l'émission

L<sub>H<sub>2</sub>O</sub> : Chaleur latente de vaporisation de l'eau

f<sub>H<sub>2</sub>O</sub> : fraction condensable de l'eau sous forme vapeur dans l'ambiante

Ce calcul nécessite de connaître la teneur en eau de l'atmosphère de façon à calculer la fraction condensable pour chaque température mesurée dans le panache. Par ailleurs, il faut attribuer une valeur à  $T_m$ . Dans le cas des flaques, on assimile généralement  $T_m$  à la température d'ébullition du liquide qui se vaporise. Dans le cas présent cette hypothèse n'est plus vérifiée. On utilise les mesures de concentration obtenues à l'aide des analyseurs  $O_2$  pour ajuster ce paramètre.

Compte tenu de l'incertitude attendue pour ce type de mesure ( $\pm 0,3^\circ\text{C}$  sur une mesure à court terme), l'incertitude sur la concentration en gaz est de l'ordre de  $\pm 1\%$  v/v avec les conditions d'essais décrites ici.

## ANNEXE 2

### ETABLISSEMENT DES CONDITIONS DE VENT AU-DESSUS DU BASSIN

Le panache produit par les rejets doit être orienté suivant l'axe passant par les mâts de mesure au moment où on réalise ces mesures. Dans la pratique, même si on ne réalise les essais que durant les moments propices (direction du vent et vitesse), le panache s'écarte fréquemment de l'axe principal sous l'effet des fluctuations résiduelles de vent. La mesure de concentration en oxygène est difficile à interpréter dans ces conditions, compte tenu de son temps de réponse.

Deux ventilateurs gros débit ont été utilisés pour stabiliser les conditions d'émission à l'atmosphère des gaz produits par le rejet (photos de la figure A2-1). De cette façon il a été possible de diminuer l'effet des fluctuations locales de vent.



*Figure A2 – 1 : installation des deux ventilateurs en amont du point de rejet*

Ces deux ventilateurs, qui ont un diamètre de 630mm, sont donnés pour fonctionner avec un débit maximum de 16450 m<sup>3</sup>/H. Le champ de vitesse présenté sur la figure A2 – 2 est une donnée fournie par le fournisseur de ces ventilateurs.

Les deux ventilateurs ont été positionnés à 3,5 m l'un de l'autre, leur axe étant parallèles. Lorsqu'on utilise deux ventilateurs l'un à côté de l'autre, les champs de vent s'additionnent. La vitesse attendue entre 10 et 12 m sur l'axe du bassin devrait être de l'ordre de 6 m/s si on se réfère à la figure A2 – 2, et ce, sans prendre en compte la présence de la surface d'eau qui doit « réfléchir » une partie de la quantité de mouvement produite par les ventilateurs.

En réalité, les mesures de vitesse réalisées à l'aide des sondes bidirectionnelles placées en aval dans l'axe du rejet indiquent des valeurs de l'ordre de 2,8 m/s à 10 m et 2,2 m/s à 12m.

Le champ de vent réel de ces appareils est donc probablement plus étroit que ne l'indique le constructeur.

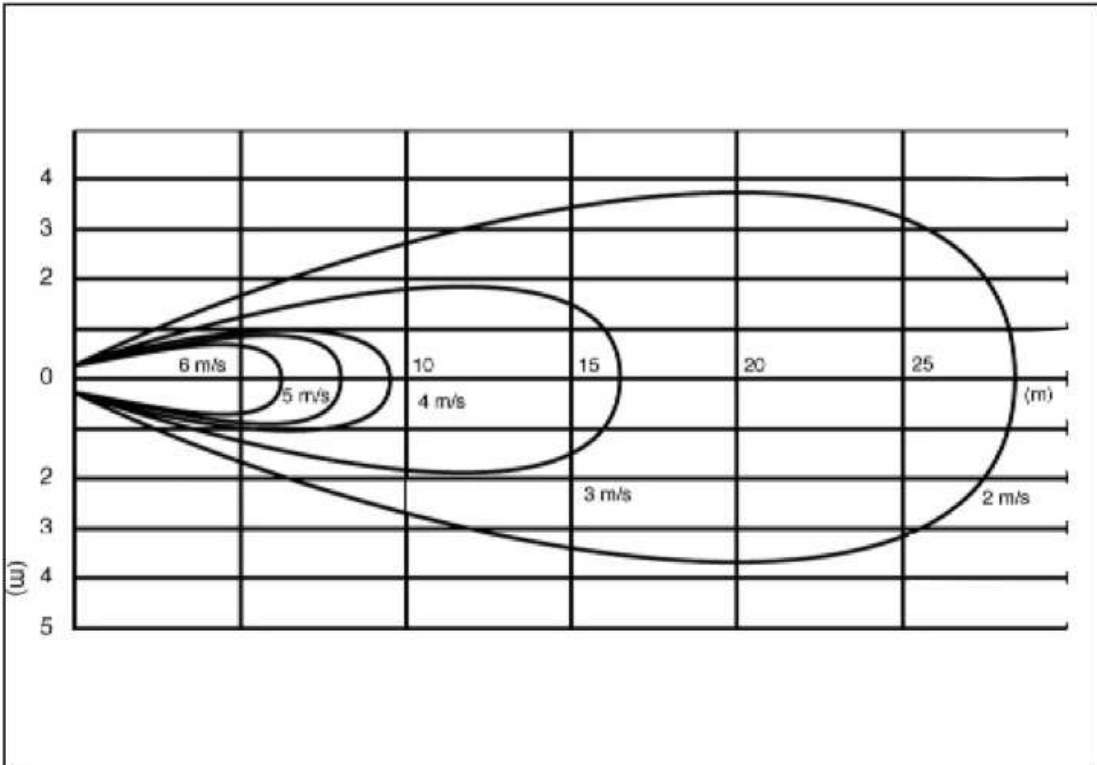


Figure A2 – 2 : champs de vent du ventilateur. Données fournisseur

## ANNEXE 3

### DESCRIPTION DU DISPOSITIF UTILISE POUR LA CREATION DE VAGUES

Le principe retenu consiste à appliquer un mouvement de va-et-vient à l'aide de vérins aérauliques sur un cylindre immergé dans l'eau à une extrémité du bassin. L'objectif était de réaliser un train d'ondes à la surface du bassin avec une amplitude de quelques cm (20cm au maximum compte tenu des dimensions du bassin) et une longueur d'onde entre 1 et 2 m, ces conditions pouvant être ajustées.

Pour atteindre cet objectif une modélisation du dispositif a été réalisée de façon à en dimensionner les différents éléments constitutifs :

- Diamètre, longueur et matériau du cylindre immergé,
- Nombre, capacité, et course des vérins actionneurs,
- Besoin en air comprimé (débit, pression),
- Dimensionnement des potences de support,
- Taux d'immersion du cylindre (position au repos).

Le modèle utilisé prend en compte la force produite par les vérins sous l'action de la pression d'air, la traînée du cylindre en mouvement dans l'eau et la force de rappel appliquée sur le cylindre (poussée d'Archimède) pour calculer la trajectoire de ce cylindre. Les paramètres dimensionnels ont été ajustés pour produire un mouvement alternatif le plus régulier possible dans la plage de fonctionnement recherchée.

Sur la base de ce modèle, on a choisi d'utiliser un tube de PVC de 6m de long et 20 cm de diamètre (rempli d'eau). Deux vérins double action de 50cm de course ont été utilisés sur le réseau d'air comprimé du site (7bar). Un dispositif de vannes pilotées par un automate permet de régler l'amplitude et la fréquence de la descente et de la remonté du tube. Le tube doit être positionné de façon à être immergé au  $\frac{3}{4}$  de son diamètre en position haute (figure A3-1 ci-dessous)..

En pratique, des mouvements parasites apparaissent pour certains régimes de fonctionnement (flexion du tube, mouvements latéraux) qui perturbent la régularité du train de vagues. La plage de fréquence qui permet d'obtenir un régime de vagues stable et non perturbé est assez étroite mais reste en accord avec le cahier l'objectif initial.

Remarque : à l'extrémité opposée du bassin, une lame de métal de 30 cm de large est à moitié immergée en position inclinée (photographie de la figure A3-2 ci-dessous). La position de cette lame est ajustée pour neutraliser les vagues incidentes et limiter leur réflexion.



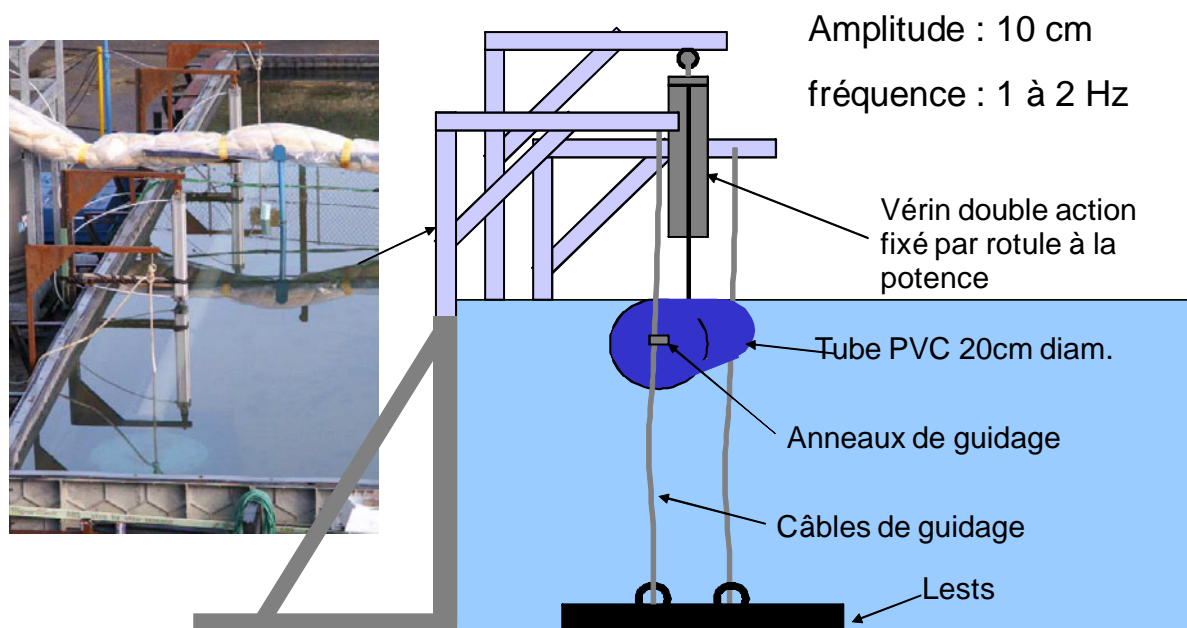


Figure A3 – 1 : Schéma du dispositif de création de vagues



Figure A3 – 2 : lame anti-réflexion positionnée dans le bassin



## ANNEXE 4

### MESURE DE LA TURBULENCE A L'AIDE D'UNE SONDE BIDIRECTIONNELLE

On trouve une description de ce type de sonde dans un article de McCaffrey (McCaffrey et al., 1976). Il était utilisé jusqu'à une date assez récente essentiellement pour les études de ventilation et d'incendie. Une première application a été tentée pour des mesures de turbulence par Tamanini au début des années 1990 (Tamanini, 1990). Mais à notre connaissance aucune étude de ses performances eu égard à la mesure de la turbulence n'a été publiée. Une large part du travail accompli sur ce type de sonde a été consacrée à ce point.

#### DESCRIPTION

La version de base est celle disponible dans le commerce (Furness Control). Elle se compose d'une sonde munie de deux prises de pression reliée par des tubes souples à un capteur de pression différentielle (capacitif).

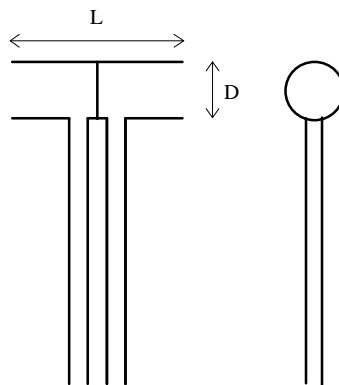


Figure A4 - 1 : Schéma de la sonde bidirectionnelle

La sonde est un tube long de 48 mm (diamètre externe 20 mm, interne 15 mm) dans sa version commerciale, muni en son centre d'une paroi étanche. De part et d'autre de cette paroi sont disposées les prises de pression (diamètre 3 mm externe; 1,5 mm interne).

Dans cette configuration, la différence de pression est proportionnelle à la force appliquée par l'écoulement sur la paroi centrale et cette force est directement reliée à la pression dynamique (au coefficient de traînée près).

Une première série d'essai a été réalisée en vue d'une part d'étalonner ces dispositifs le plus précisément possible et d'autre part d'examiner l'incidence de la géométrie de la sonde sur les performances du système de mesure. Une seconde

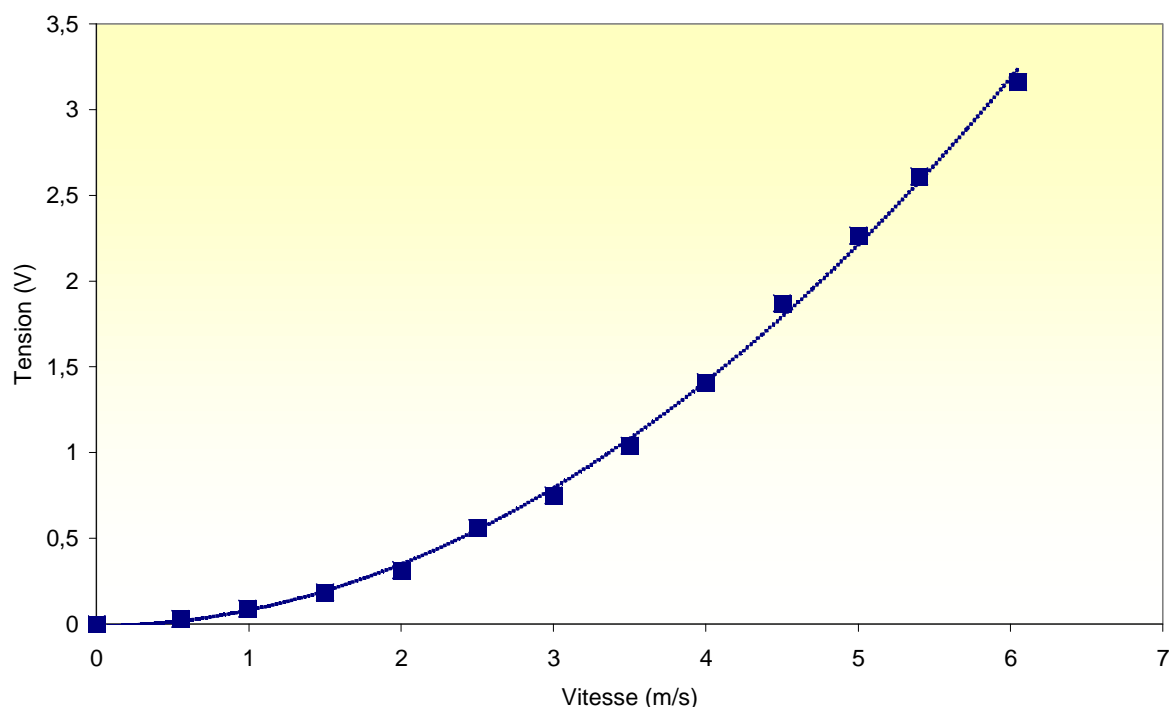
série d'essai a été effectuée en vue de tester ses aptitudes à la mesure de la turbulence.

## PERFORMANCES

Les essais ont été réalisés au moyen de la soufflerie de l'INERIS (diamètre de la veine 1 m vitesse 0,1 à 20 m/s). Le dispositif expérimental permet de faire varier avec précision l'orientation de la sonde par rapport à l'écoulement.

### EXEMPLE DE COURBE D'ETALONNAGE

On constate (figure A4-2) que le niveau du signal varie de manière quadratique avec la vitesse dans la gamme étudiée ce qui paraît conforme avec le principe de ce dispositif. L'incertitude de mesure est de l'ordre de 1%.

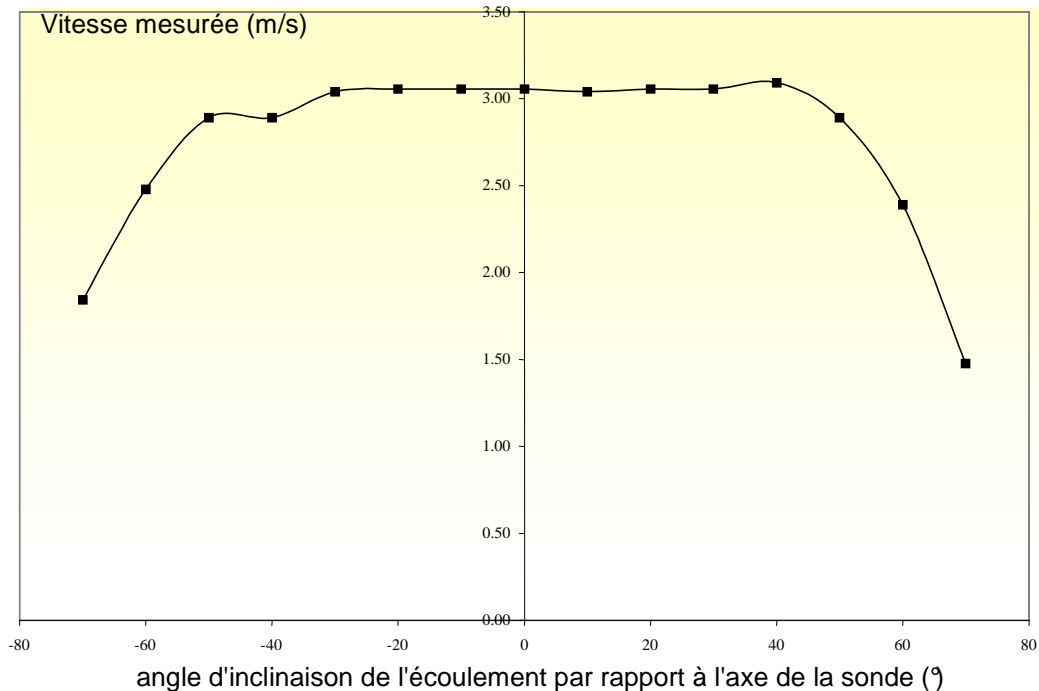


*Figure A4-2 : exemple d'étalonnage d'une sonde*

### INCIDENCE DE L'INCLINAISON DE L'AXE DE LA SONDE PAR RAPPORT A LA DIRECTION DE L'ÉCOULEMENT

Un dispositif spécial permet de faire varier avec précision l'orientation de la sonde par rapport à l'écoulement (au degré près).

On constate (figure A4-3) que la réponse du capteur ne varie pas significativement ( $\pm 5\%$ ) tant que l'angle d'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement est compris entre 0 et 45°. Ce résultat est conforme aux observations de McCaffrey. En d'autres termes, ce capteur ne peut pas donner une mesure selon une direction précise.



*Figure A4-3 : incidence de l'angle d'inclinaison de l'axe de la sonde par rapport à la direction de l'écoulement*

#### INCIDENCE DE LA GEOMETRIE DE LA SONDE

Nous avons fait varier la longueur de la sonde de 48mm à 18mm sans observer de modification significative des caractéristiques ce qui permet d'envisager une miniaturisation.

Une petite étude de l'incidence de l'épaisseur du tube a également été réalisée mais n'a pas révélé de différences très significatives.

#### TEMPS DE REPONSE ET PRECISION DE LA MESURE

Un examen rapide a clairement montré que le temps de réponse global de ce dispositif est limité par l'acoustique de la sonde (de la tête au capteur de pression). Lorsque la ligne aéroulique entre la tête de la sonde et le capteur de pression présente des étranglements important le temps de réponse peut être de plusieurs centaines de millisecondes. En revanche, si les tubes de liaisons ont une section constante alors la fréquence maximum correspond à celle de résonance des tubes. Nous avons utilisé systématiquement des tubes courts (1 m) ce qui permet en principe de pouvoir faire des mesures fiables dans la gamme 0-100 Hz environ ce qui paraît acceptable. Il est en principe possible de s'affranchir de ces difficultés soit en modifiant le schéma aéroulique, soit en plaçant le capteur dans la tête de la sonde (Tamanini, 1998).

La précision globale de la mesure serait de l'ordre de 5% si le vecteur vitesse est orienté selon un angle compris entre  $-45^\circ$  et  $+45^\circ$  par rapport à l'axe du capteur. Au-delà, la mesure est erronée.

## APPLICATION A LA MESURE DE LA TURBULENCE

### LIMITATIONS POSSIBLES

En premier lieu, une première limitation concerne la précision de la mesure. Ce type de capteur ne semble pas permettre actuellement une détection fiable d'une intensité de turbulence plus petite que 2%.

En second lieu, compte tenu de l'ouverture angulaire admissible, ce dispositif est a priori capable de fournir une estimation raisonnable du module du vecteur vitesse instantané tant que les fluctuations de vitesse ne le font pas « sortir » de « l'angle de vue » du capteur. En admettant que la direction moyenne de l'écoulement est parallèle à l'axe de la sonde, cela signifie que l'intensité *moyenne* des fluctuations admissibles ne doit pas excéder 100% (!! ) de la valeur moyenne ce qui permet en principe de couvrir la plus grande large part des situations pratiques.

Enfin, seul est accessible le module du vecteur vitesse instantané. On peut assez facilement montrer que la moyenne déduite de la mesure du module,  $U_{\text{mod}}$ , diffère légèrement de la moyenne statistique  $U_{\text{stat}}$  :

$$U_{\text{mod}} = U_{\text{stat}} \cdot (1 + \varepsilon^2)$$

où  $\varepsilon$  est l'intensité moyenne de la turbulence prise comme le rapport entre l'écart-type des fluctuations de vitesse selon une direction (par exemple la direction principale de l'écoulement) et  $U_{\text{stat}}$ . Si on admet que  $\varepsilon = 35\%$  alors  $U_{\text{mod}}$  est plus grand que  $U_{\text{stat}}$  d'un facteur 1,1 environ. L'écart est plus petit si l'intensité de la turbulence est plus modeste.

Si, par ailleurs, on choisit comme estimateur des fluctuations de vitesse,  $u'_{\text{mod}}$ , la variance du module du vecteur vitesse mesuré (c'est à dire la moyenne quadratique dans le temps de la différence entre le module du vecteur vitesse instantané et  $U_{\text{mod}}$ ) alors on montre que

$$u'_{\text{mod}} = u'_{\text{stat}}$$

où  $u'_{\text{stat}}$  désigne la moyenne quadratique statistique des fluctuations de vitesse selon la direction principale de l'écoulement. En résumé, pour un vecteur vitesse de direction quelconque :

- la valeur moyenne du module est surestimée de  $(1 + \varepsilon^2)$ . Ce facteur d'erreur peut cependant être éliminé dès lors que  $u'_{\text{stat}}$  est connu ;
- la valeur moyenne des fluctuations est très correctement estimée mais la mesure n'est significative que si  $\varepsilon$  est plus grand que 2%.

### VERIFICATIONS

La configuration choisie est celle du jet libre subsonique et de densité constante. En raison de la somme de connaissances et de données disponibles, on peut aujourd'hui la considérer comme une configuration de référence pour la turbulence. Les corrélations que nous utilisons sont extraites des travaux de E. Ruffin (Ruffin, 1994) :

- Vitesse moyenne sur l'axe (direction x):  $U(x) = U_j \cdot (5.D/x)$
- Fluctuations longitudinales:  $u' = 0,27 \cdot U(x)$

- Fluctuations transversales (axes y et z):  $v'=w'= 0,25.U(x)$
- Tenseurs de reynolds:
  - $u'.v'/U^2=u'.w'/U^2=0$  sur l'axe.
  - $u'.v'/U^2=u'.w'/U^2=0,017$  à  $r=0,058.x$  (hors de l'axe).
- Taille des plus gros tourbillons:
  - selon x,  $Lu=0,0385.x$
  - selon y,z  $Lr=0,0157.x$

Le dispositif expérimental est schématiquement représenté sur la figure A4-4. De l'azote, provenant d'une bouteille, s'écoule à travers un long tube d'acier (longueur 3 m) rectiligne de diamètre 50 mm, muni à son extrémité d'un diaphragme à arête vive (coefficient de décharge = 1). La longueur de la canalisation a été choisie de manière à homogénéiser l'écoulement. Le nombre de Reynolds est plus grand que 10000 et signifie que le profil des vitesses au droit du diaphragme est pratiquement plan. L'ensemble est disposé dans un large hangar, à l'abri des courants d'air. La sonde (longueur 48 mm, diamètre 20 mm) est disposée sur l'axe du jet, parallèlement à l'axe.

La pression de l'écoulement dans la canalisation est mesurée à une dizaine de cm en amont du diaphragme au moyen d'un capteur piezorésistif de marque ENDEFECO (0-70 mb, précision 0,5 mb).

Les paramètres variables sont la pression d'écoulement (i.e. vitesse à l'orifice) et la distance sonde/diaphragme (0,5 m, 1m, 2m ou 3m).

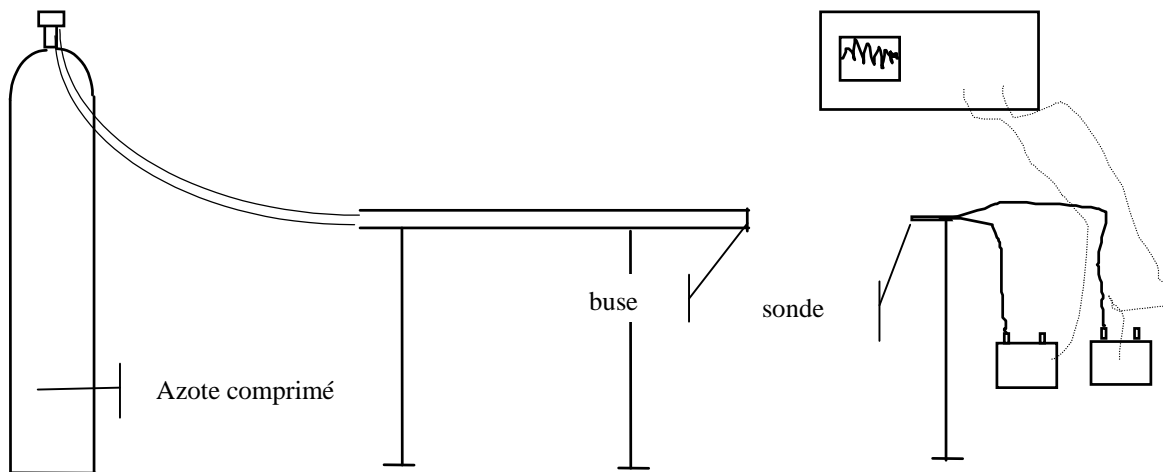
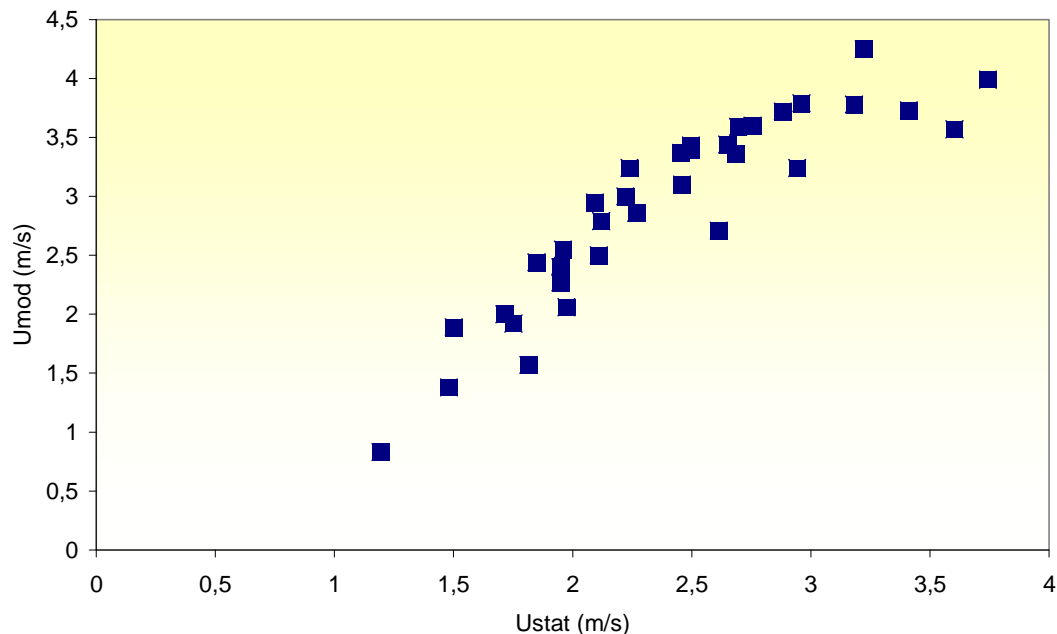


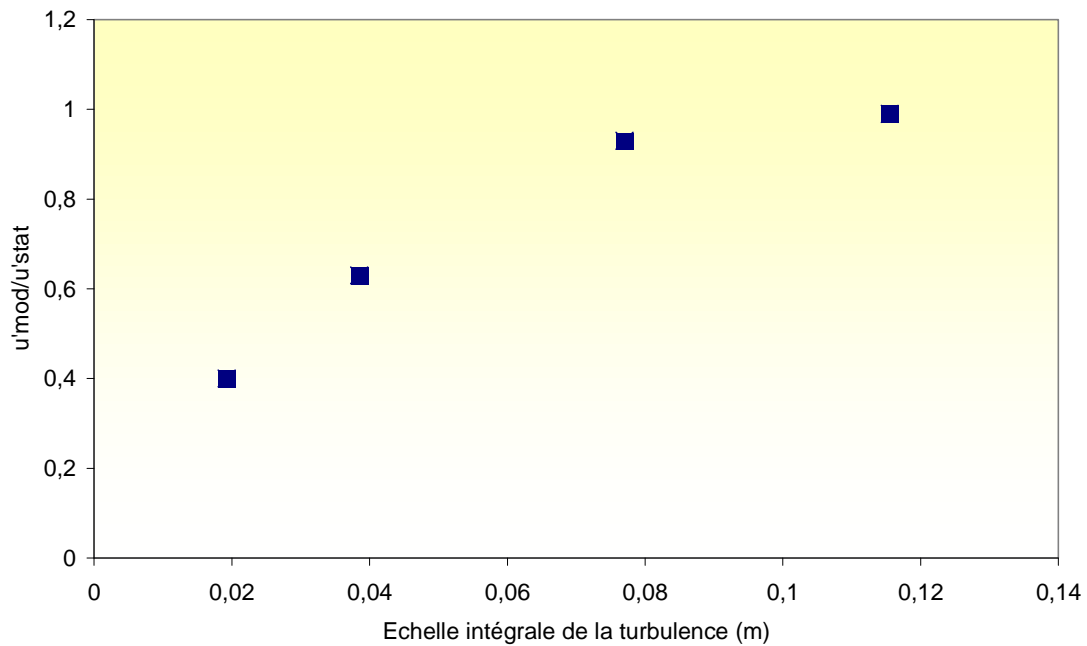
Figure A4-4 : schéma du montage

Un graphe représentant la comparaison entre la vitesse moyenne ( $U_{mod}$ ) mesurée et celle prédite par les corrélations est représenté sur la figure A4-5. On constate que les mesures sont plus grandes que les prédictions d'un facteur 1,2 environ. Cet écart est conforme à celui estimé théoriquement.



*Figure A4-5 : Vitesses moyennes sur l'axe du jet: comparaison mesures ( $U_{mod}$ )/prédictions ( $U_{stat}$ )*

Lorsque la distance entre l'orifice et la sonde varie, la dimension des grandes structures du jet (échelles intégrales le long de l'axe et perpendiculairement) varie en proportion. La sonde est un dispositif intrusif et il faut s'attendre à ce que sa présence affecte la mesure lorsque la taille des structures turbulentes devient suffisamment petite. On a représenté sur le graphe de la figure A4-6, l'estimation déduite des mesures,  $u'_{mod}$ , par rapport aux prédictions,  $u'_{stat}$  en fonction de la taille des structures turbulentes ( $Lu$ ). On constate que l'accord mesures//prédictions devient excellent dès que la taille des structures turbulentes est au moins deux fois plus grande que celle de la sonde.



*Figure A4-6 : Fluctuations de vitesses sur l'axe du jet: comparaison mesures/prédictions  $u'_{mod}/u'_{stat}$  en fonction de la taille des grandes structures de l'écoulement*

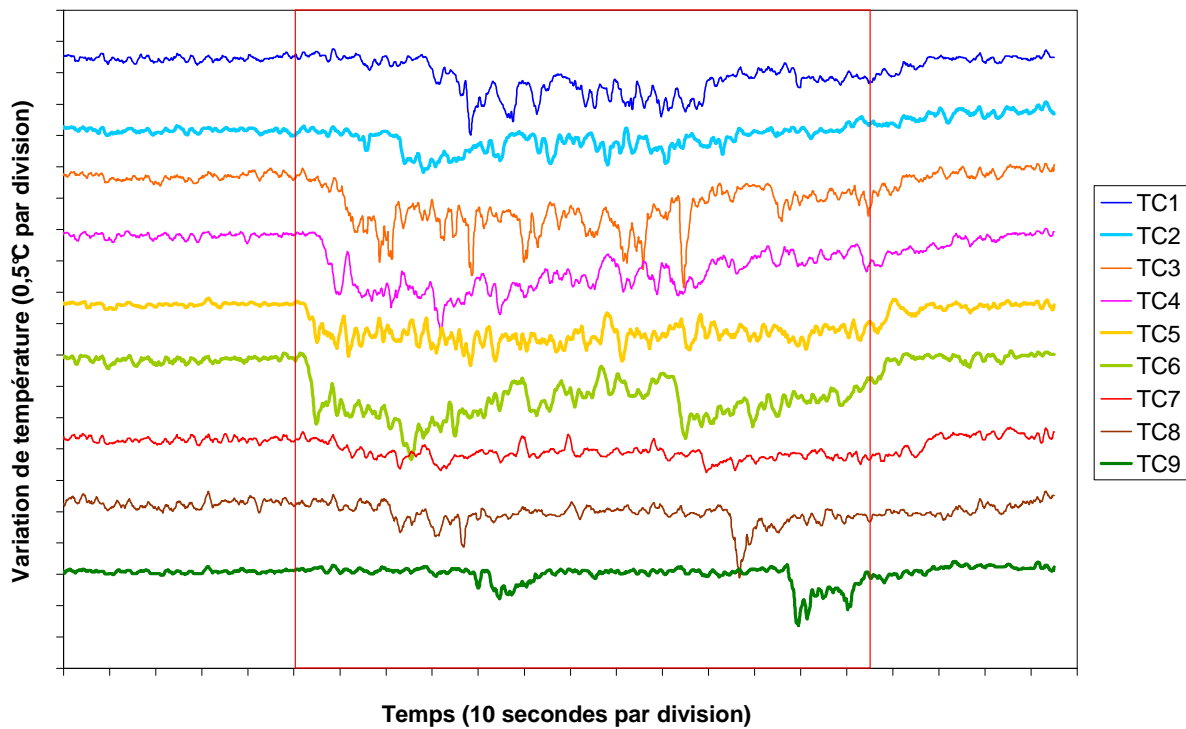
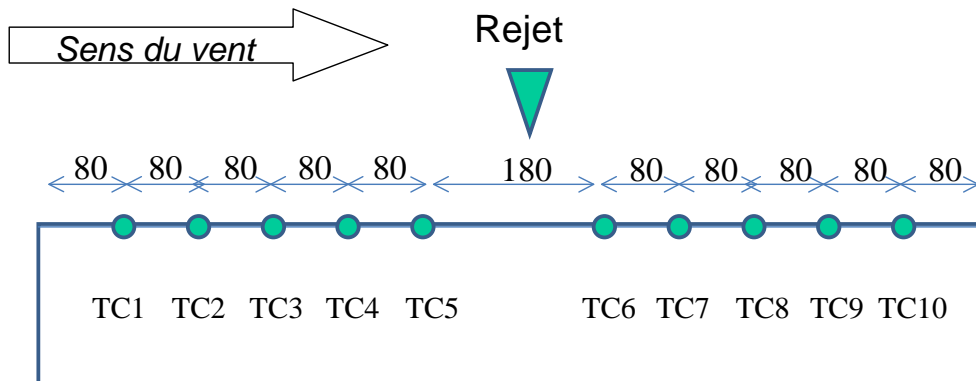
Ce modèle de sonde bidirectionnelle semble donc convenir pour la détermination des paramètres de base de la turbulence que sont  $u'$  et  $L$ . En revanche, il ne semble pas facilement permettre l'évaluation d'autres grandeurs éventuellement importantes comme les tenseurs de Reynolds. Par ailleurs sa précision est médiocre pour l'évaluation des vitesses moyennes.



*Figure A4 – 7 : tête bidirectionnelle connectée à un capteur de pression différentielle*

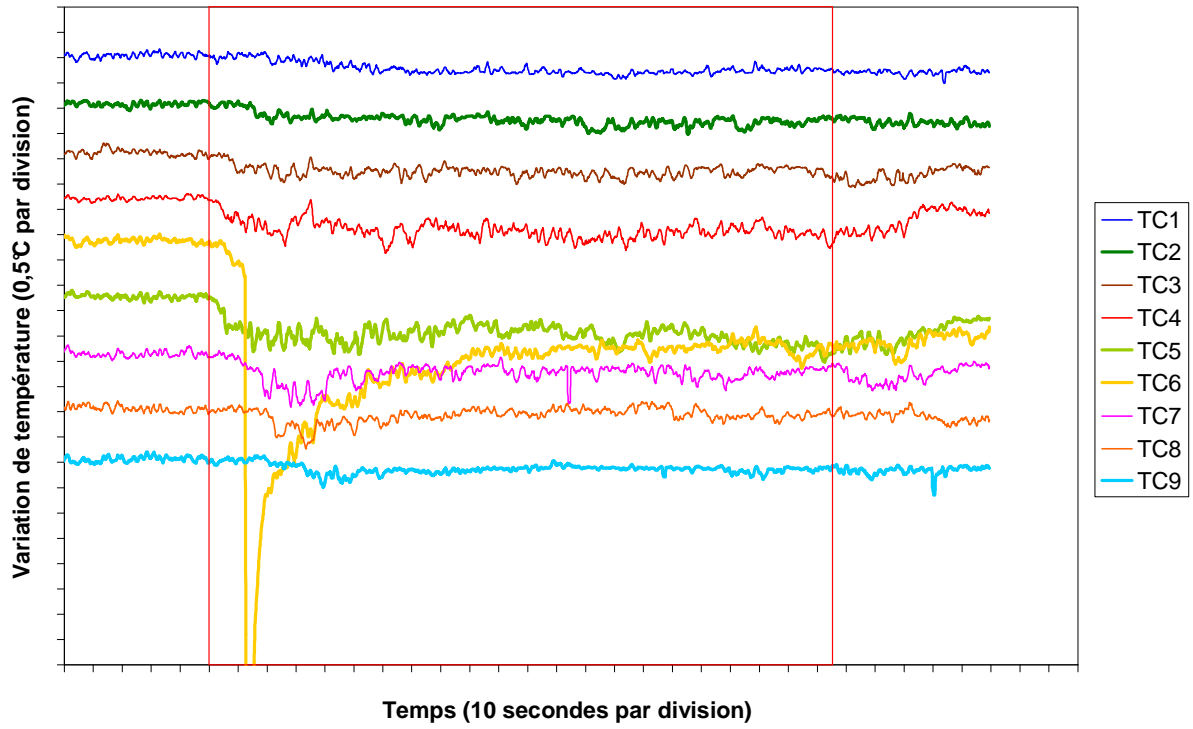
## ANNEXE 5

### RESULTATS DES ESSAIS DE MESURES DE TEMPERATURE EN SURFACE DE BASSIN

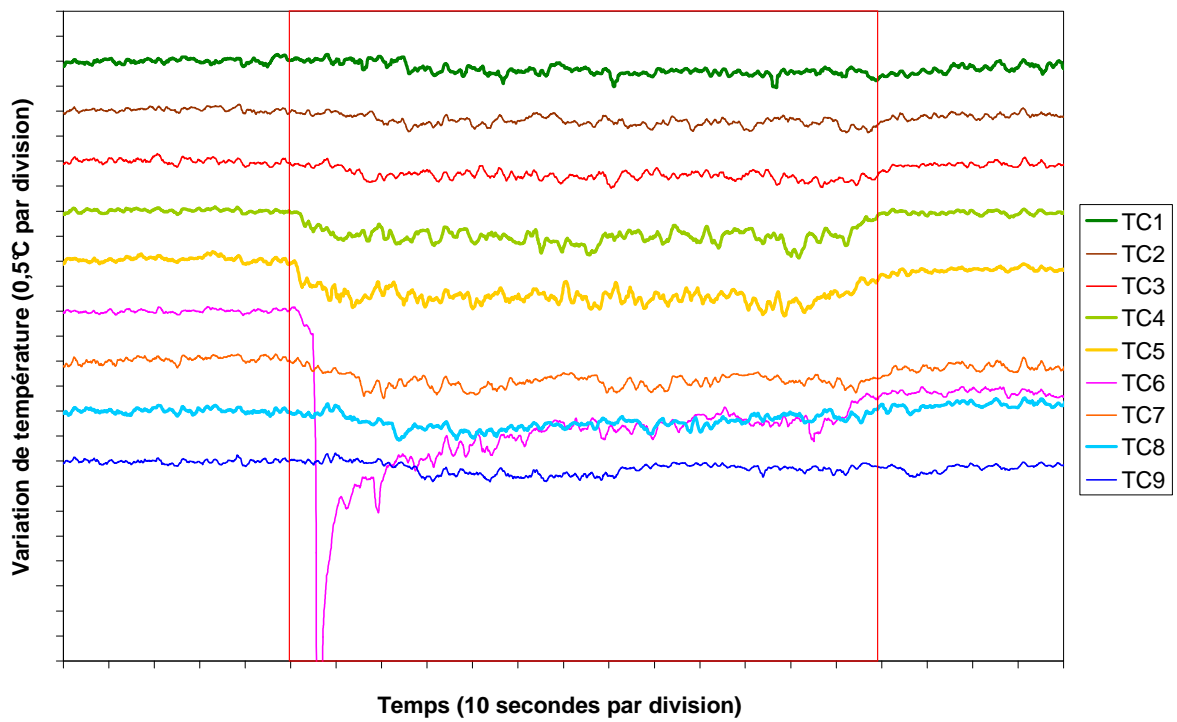


Essai n°5 - N2 - 16mm (*cadre rouge : durée du rejet*)

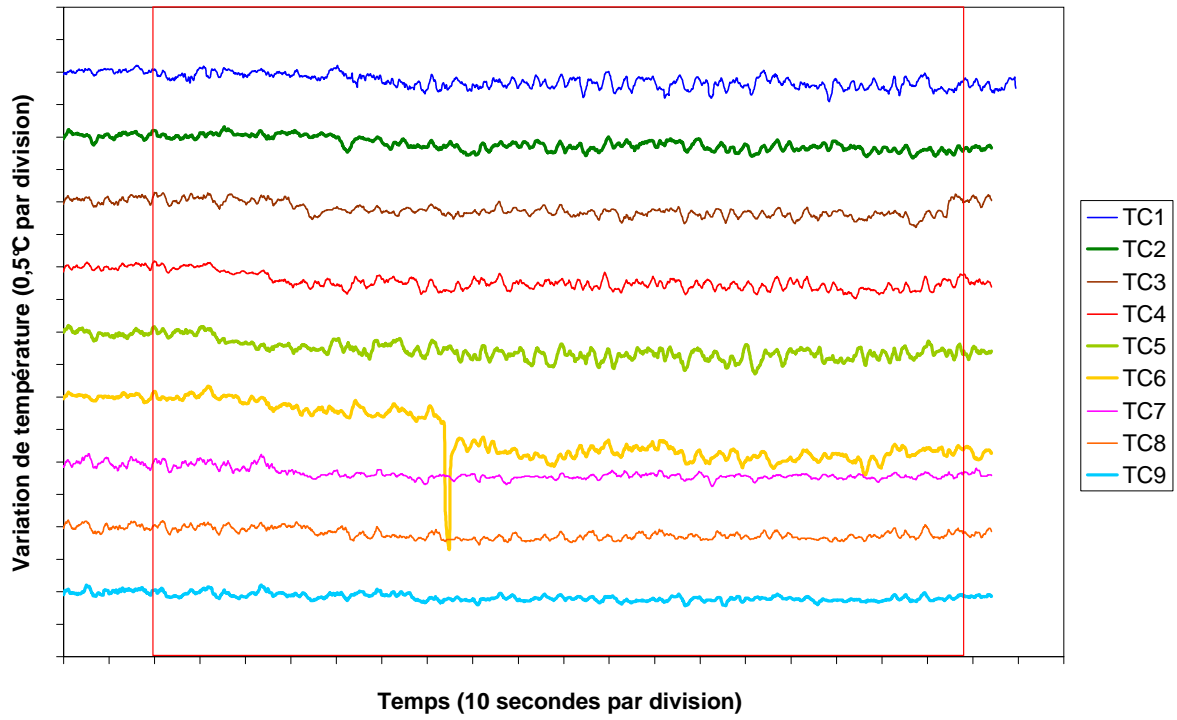




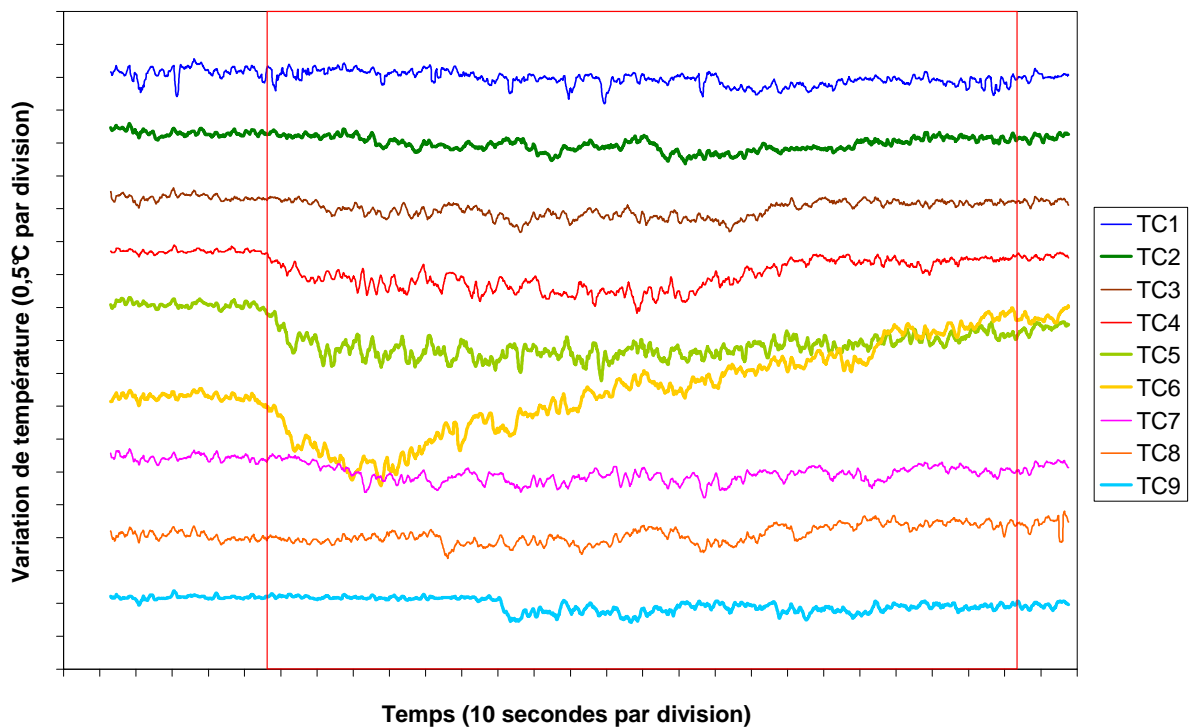
Essai n°6 - N2 - 20mm



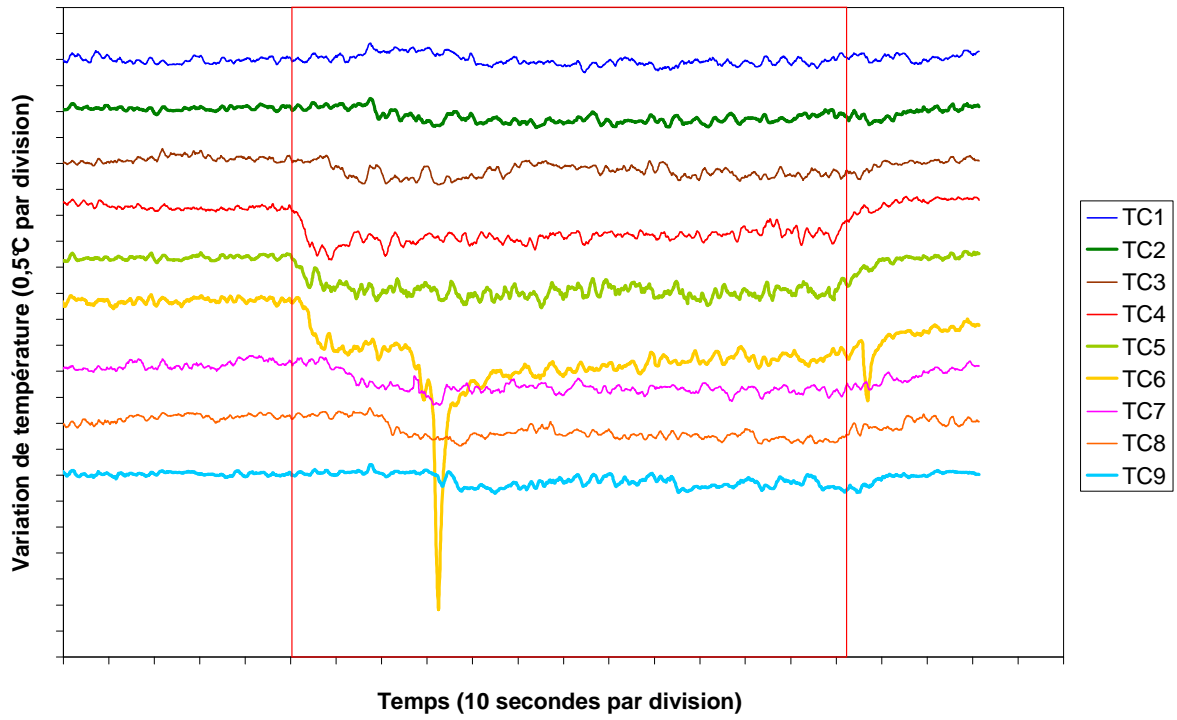
Essai n°7 - N2 - 20mm



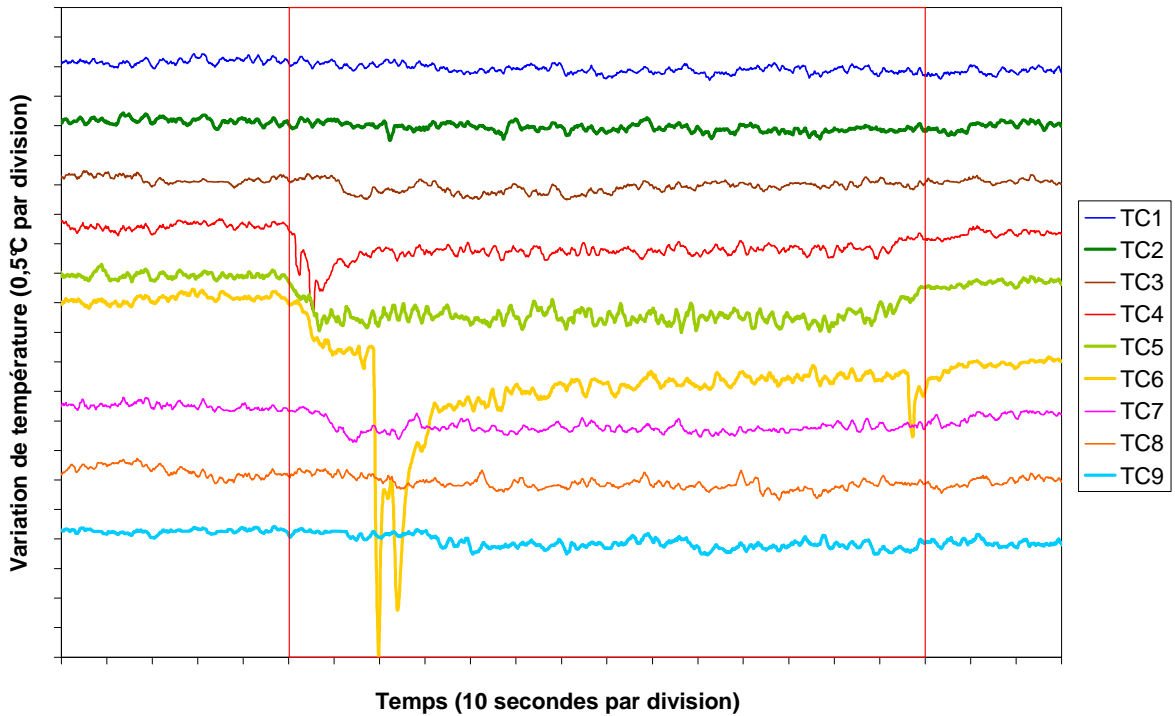
Essai n°8 - N2 - 20mm - rejet sous l'eau



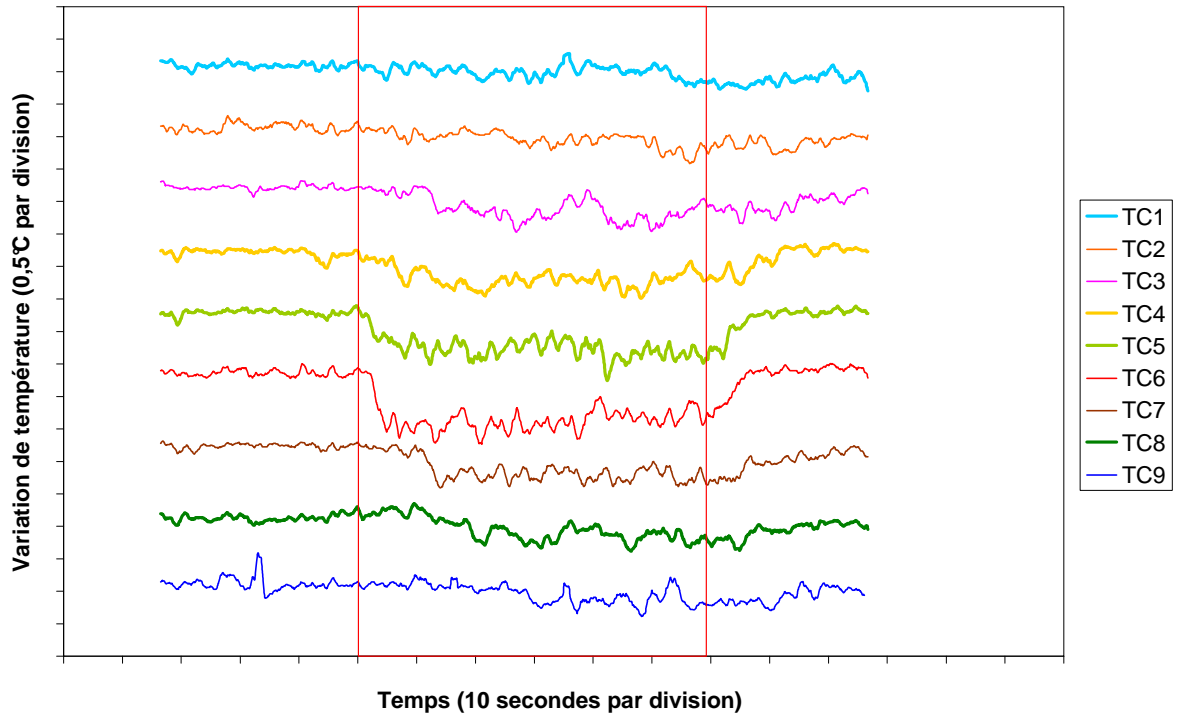
Essai n°9 - N2 - 16mm - vagues



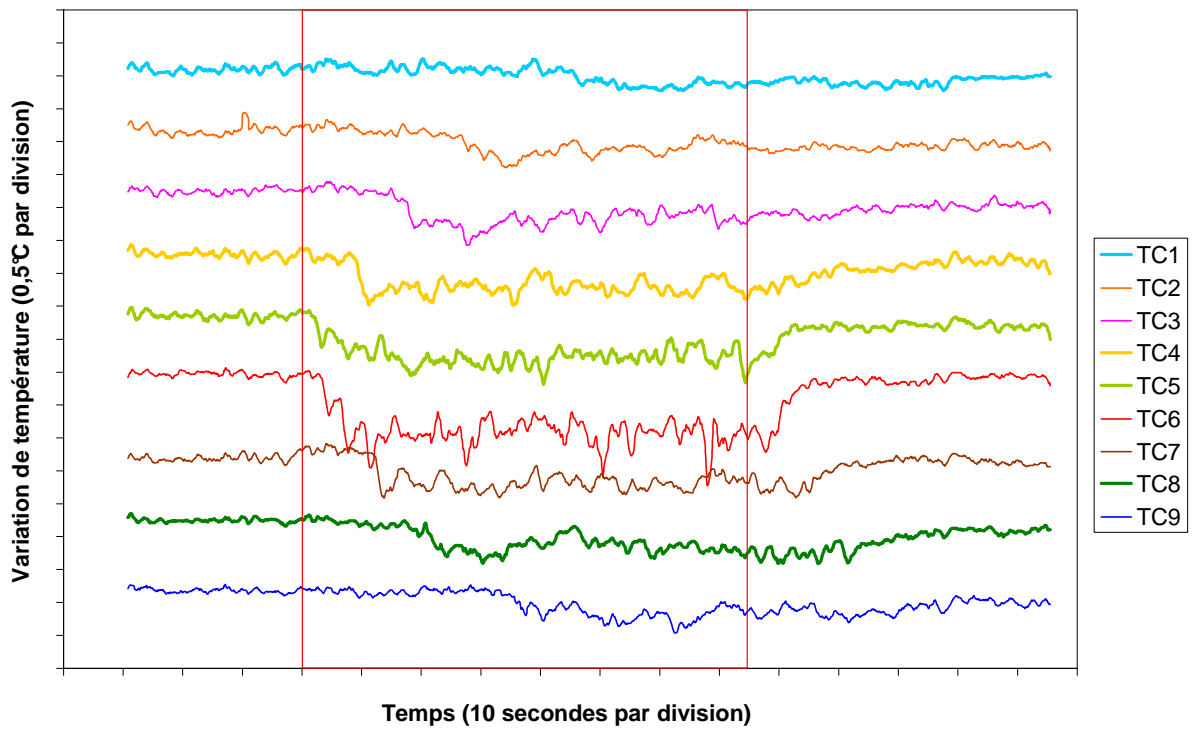
Essai n°12 - propane - 10mm



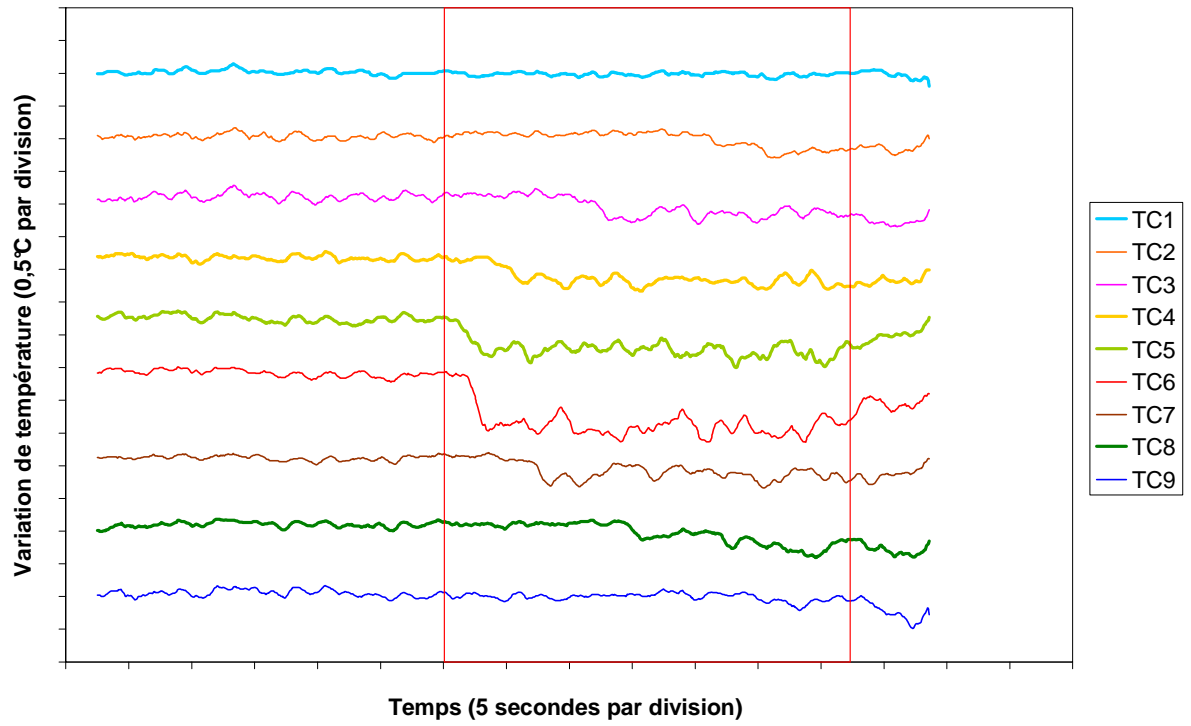
Essai n°13 - propane - 9mm



Essai n°14 - butane - 9mm



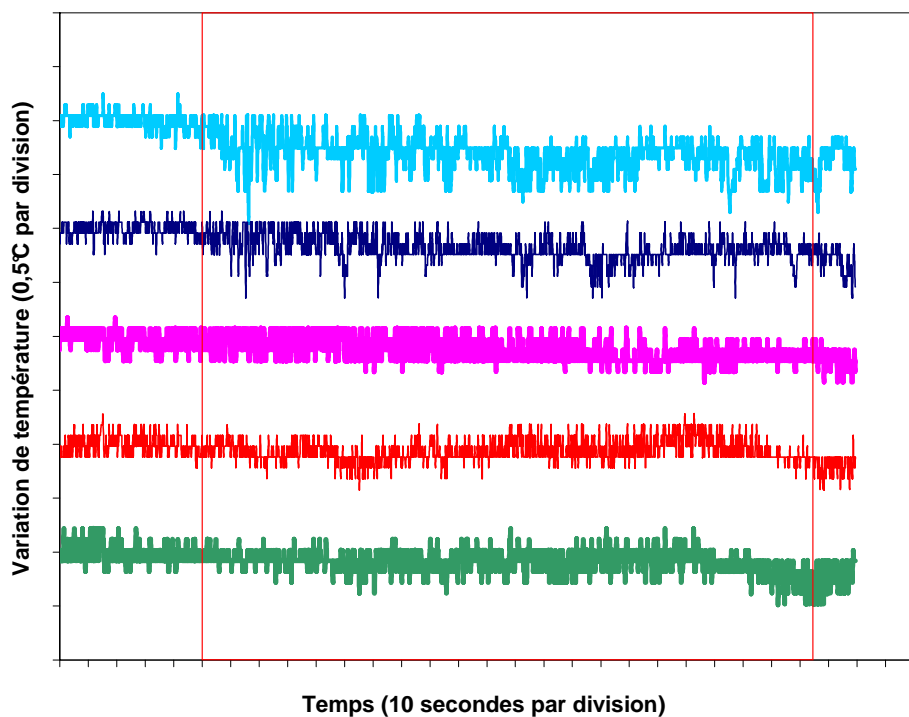
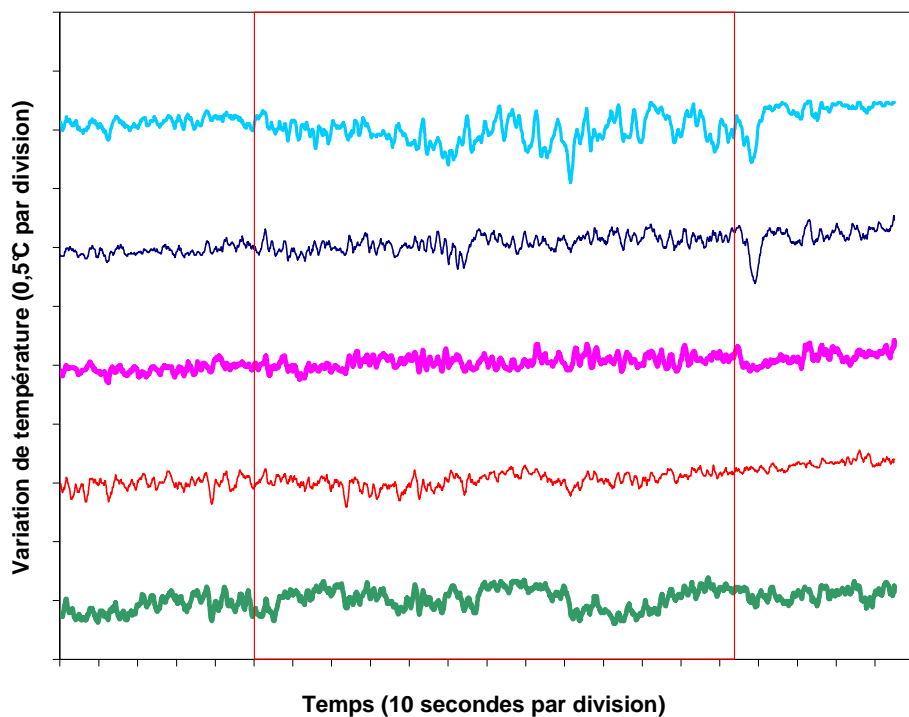
Essai n°15 - butane - 9mm

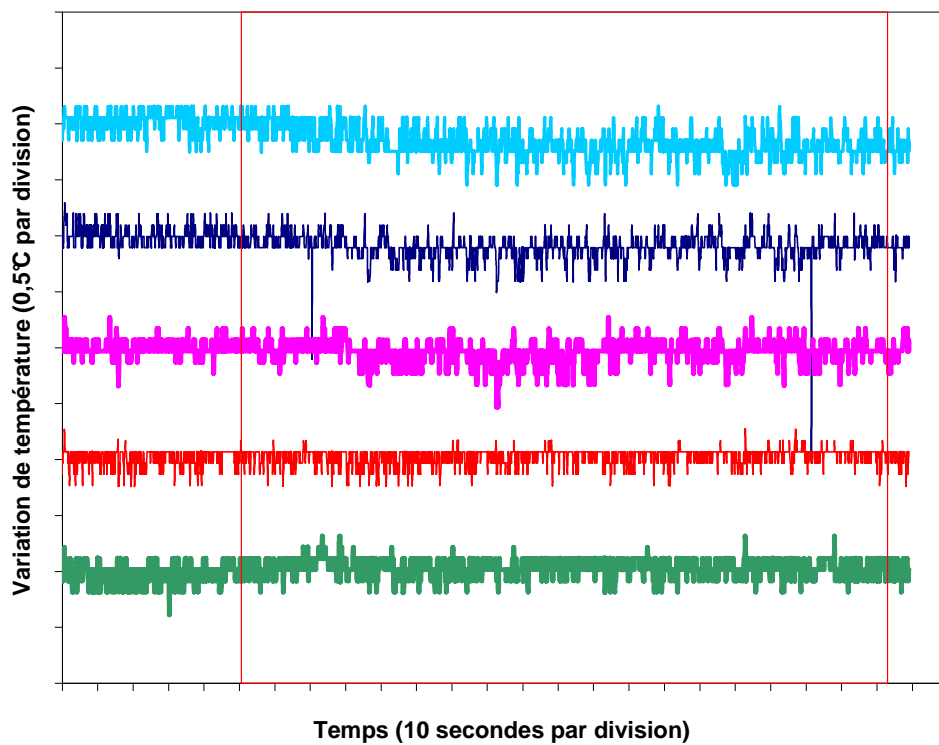
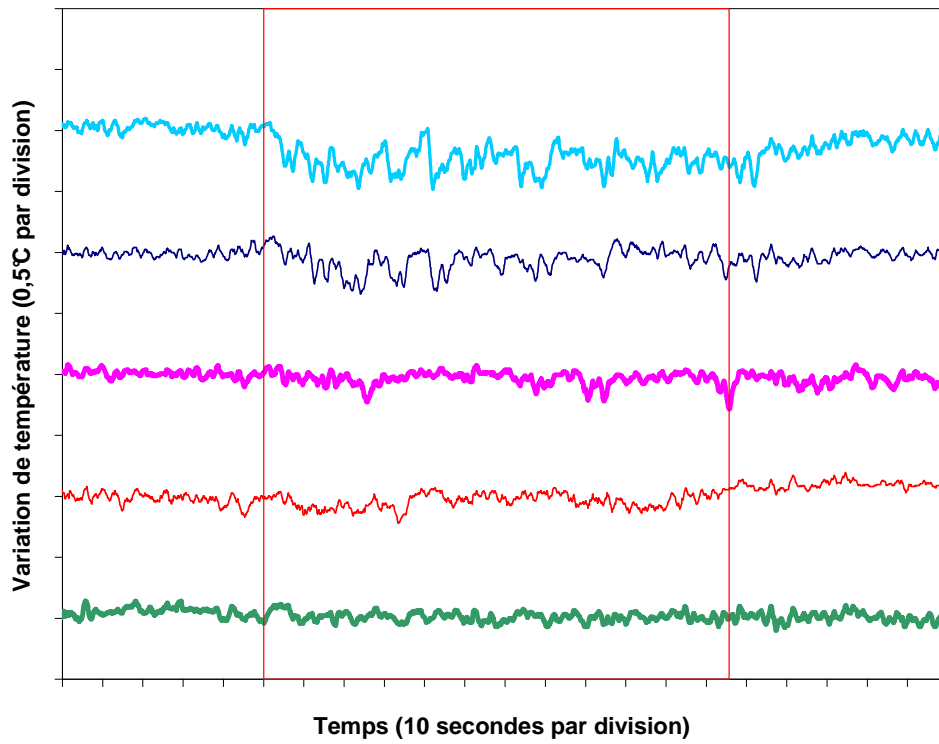


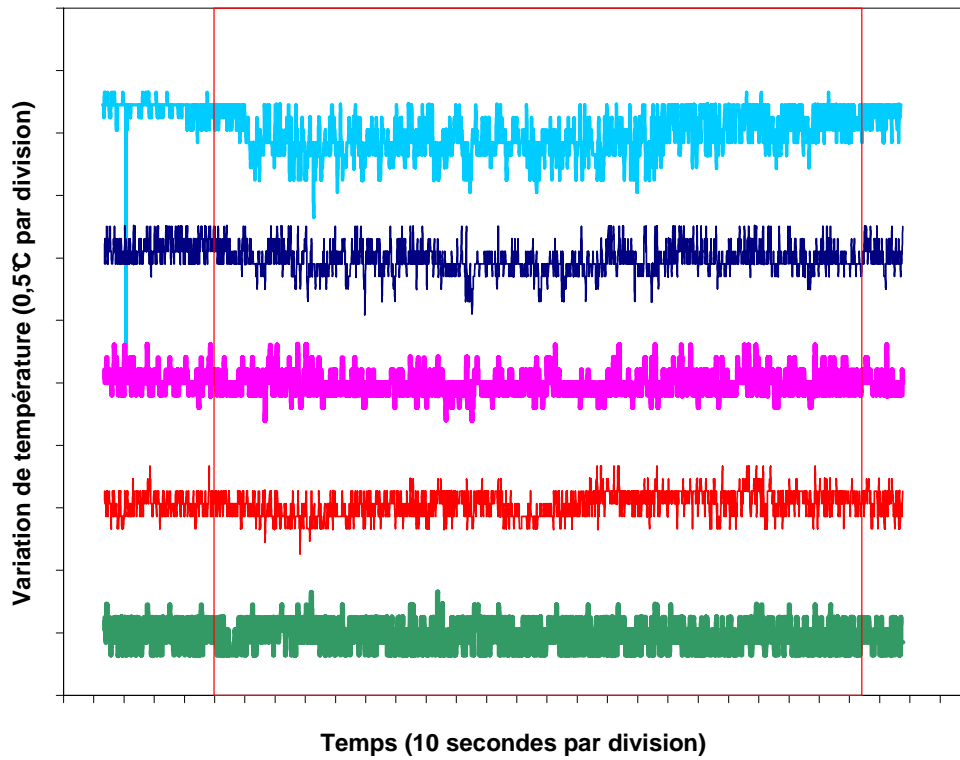
## Essai n°16 - butane - 9mm

## ANNEXE 6

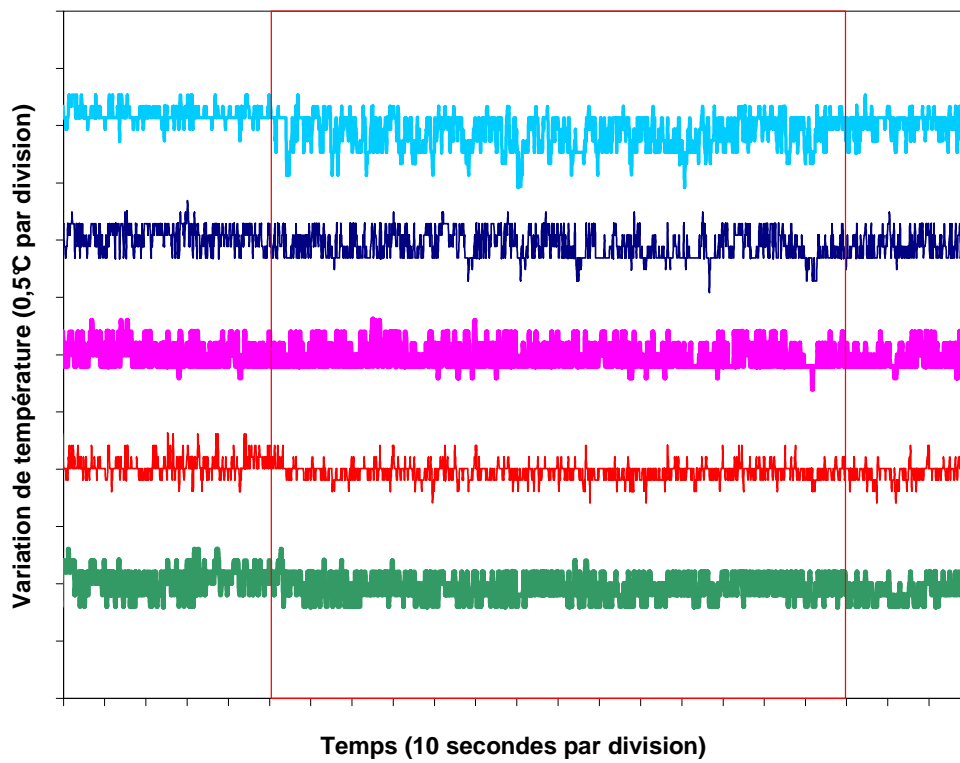
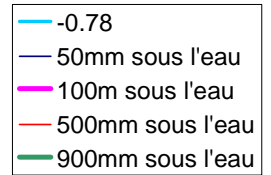
### RESULTATS DES ESSAIS DE MESURES DE TEMPERATURE EN PROFONDEUR (PIED N°1)



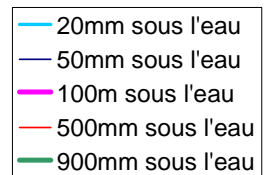




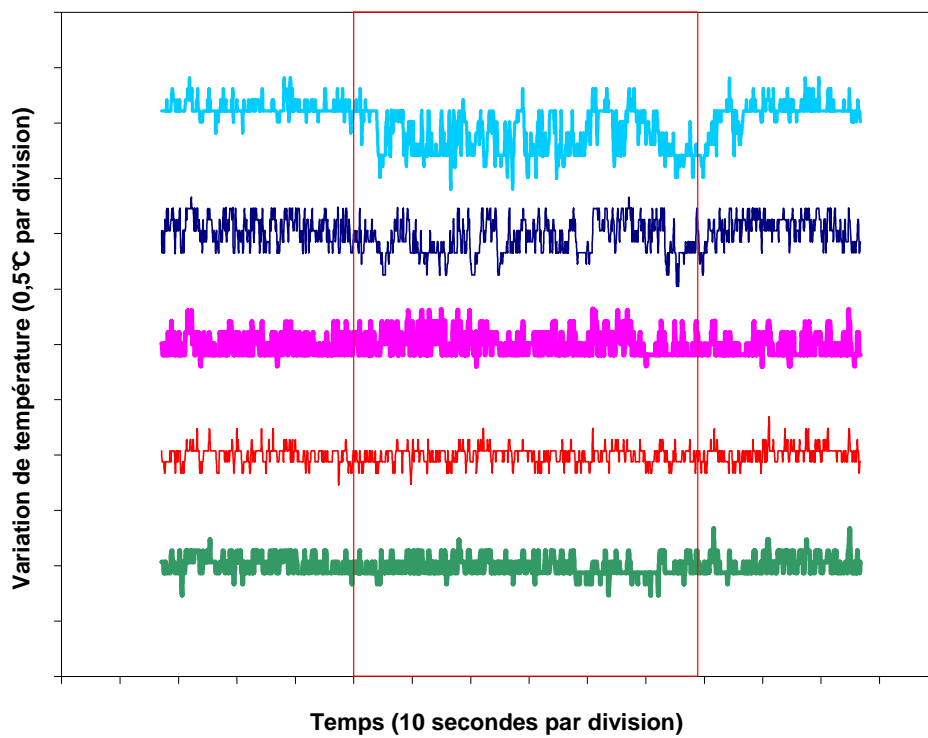
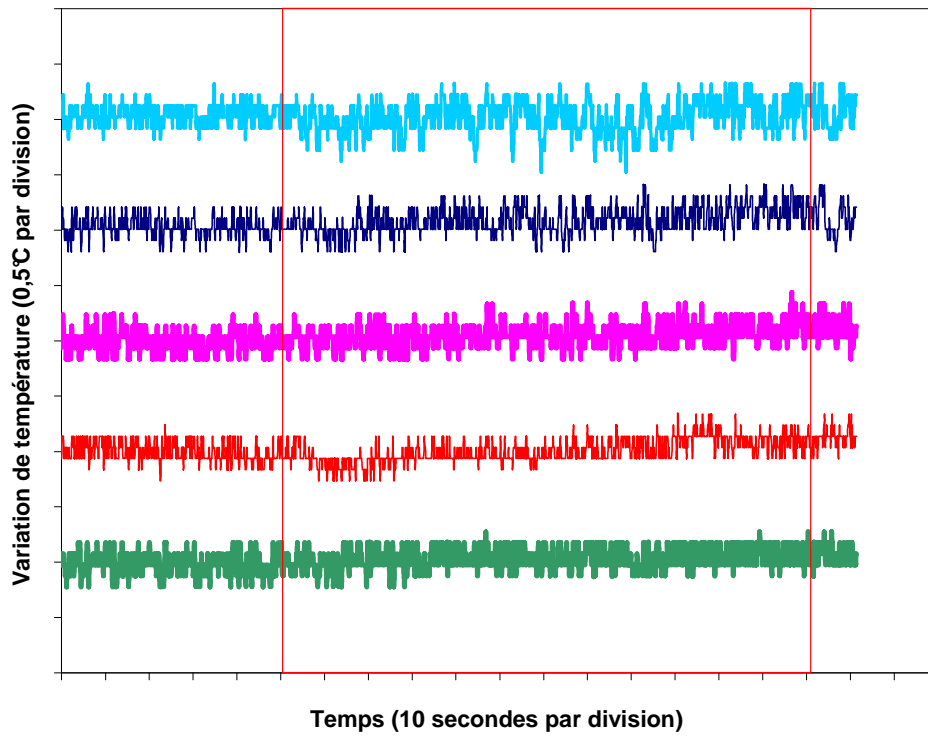
Essai n°9 -  
N2 - 20mm  
- vagues

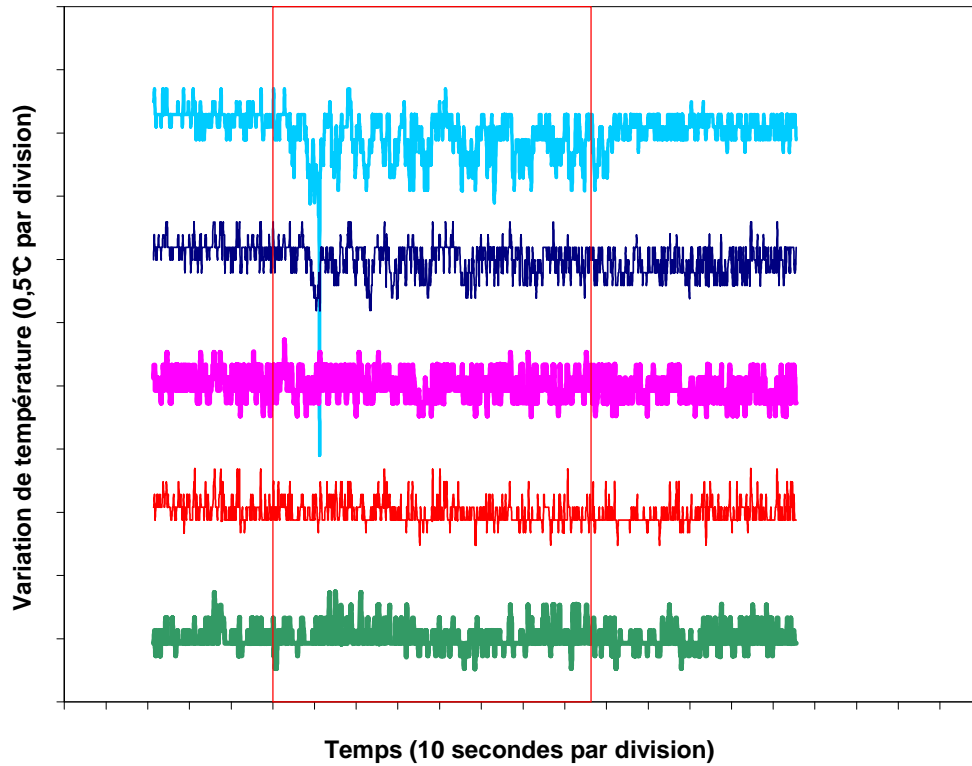


Essai n°12 -  
propane -  
10mm



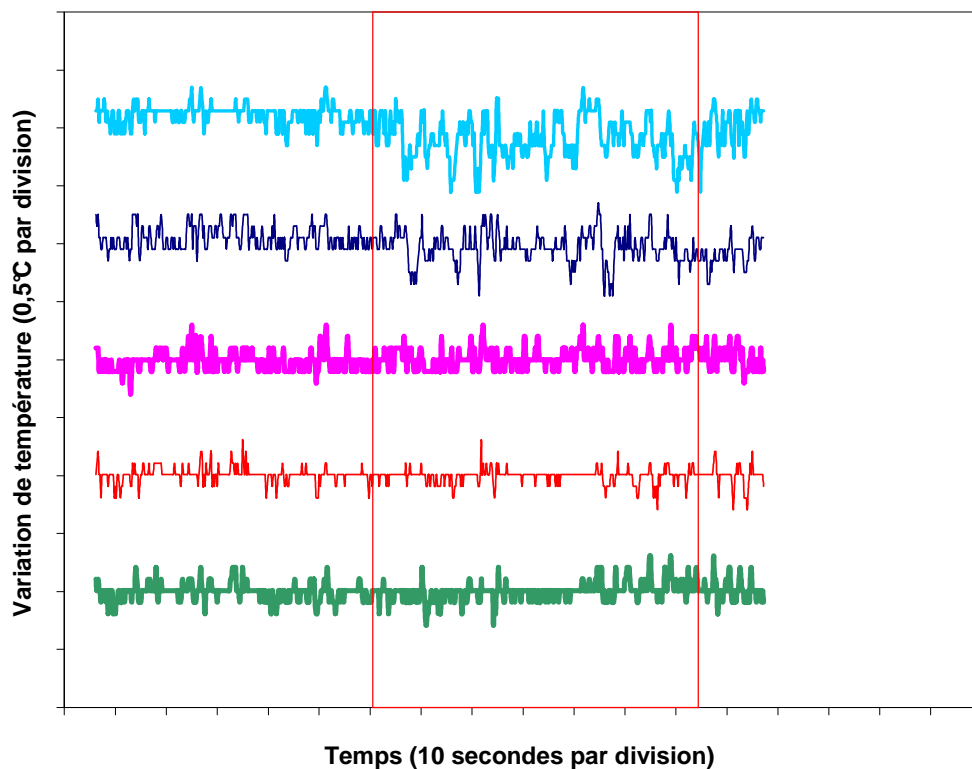






Essai n°15 -  
butane -  
9mm

- 20mm sous l'eau
- 50mm sous l'eau
- 100m sous l'eau
- 500mm sous l'eau
- 900mm sous l'eau



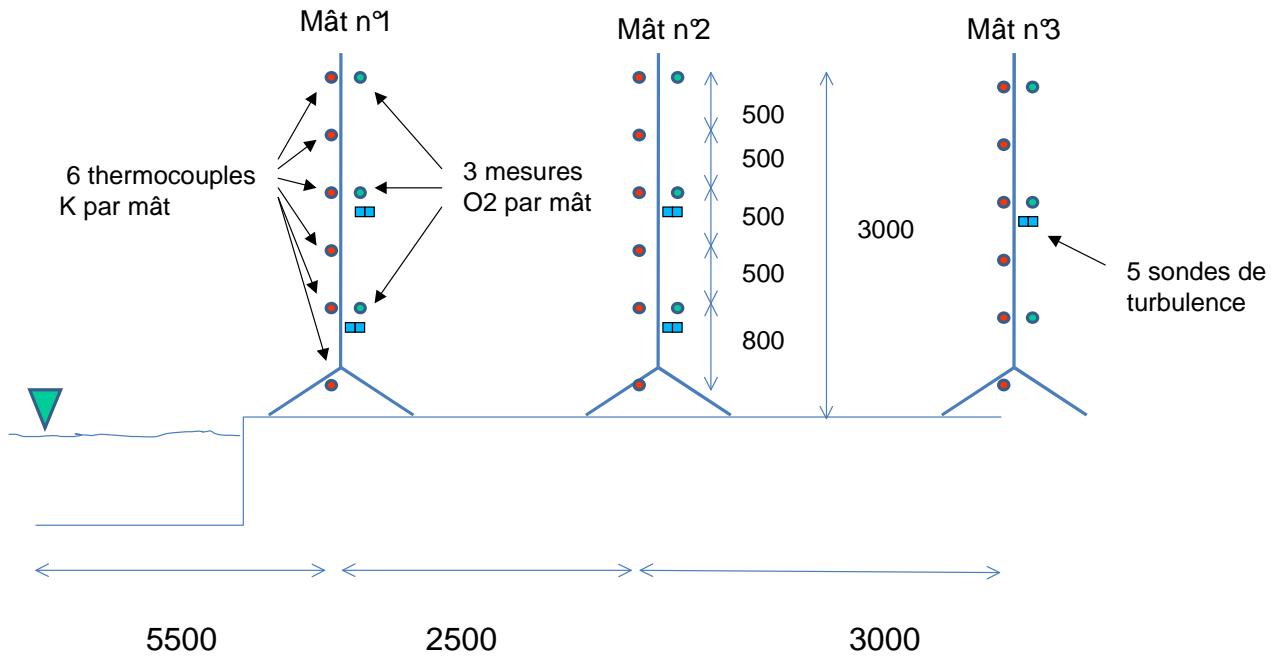
Essai n°16 -  
butane -  
9mm

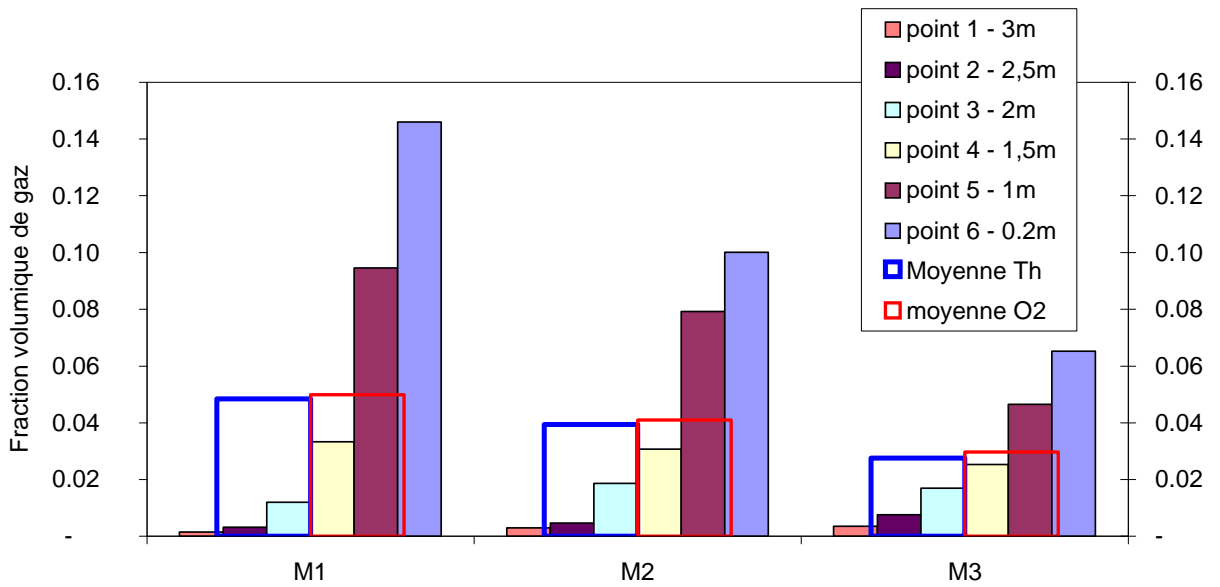
- 20mm sous l'eau
- 50mm sous l'eau
- 100m sous l'eau
- 500mm sous l'eau
- 900mm sous l'eau

## ANNEXE 7

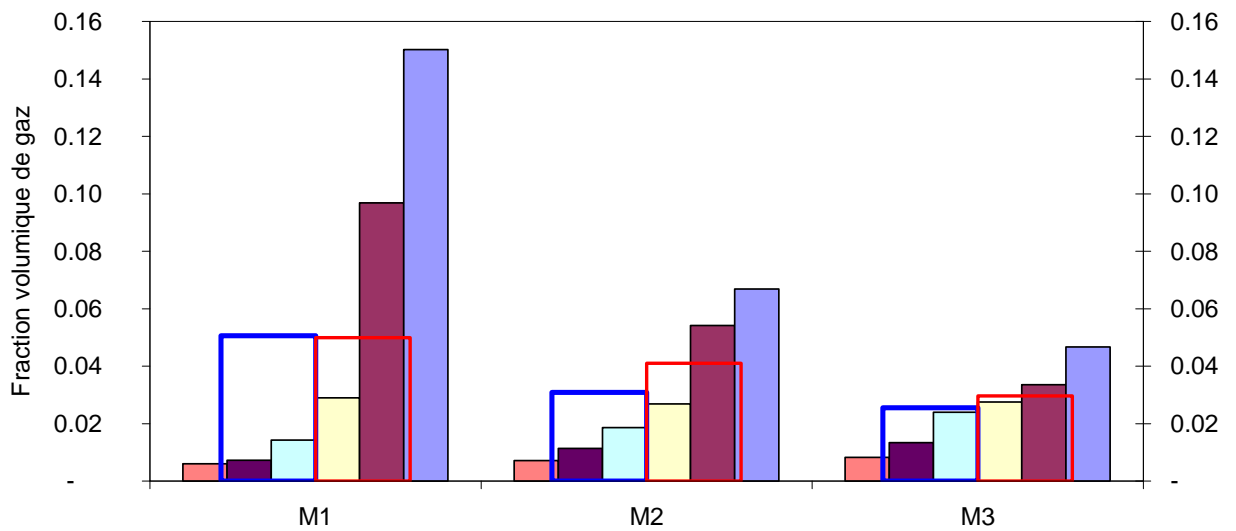
### RESULTATS DES ESSAIS DE MESURES DE CONCENTRATION DANS LE PANACHE

Rappel de l'implantation des capteurs

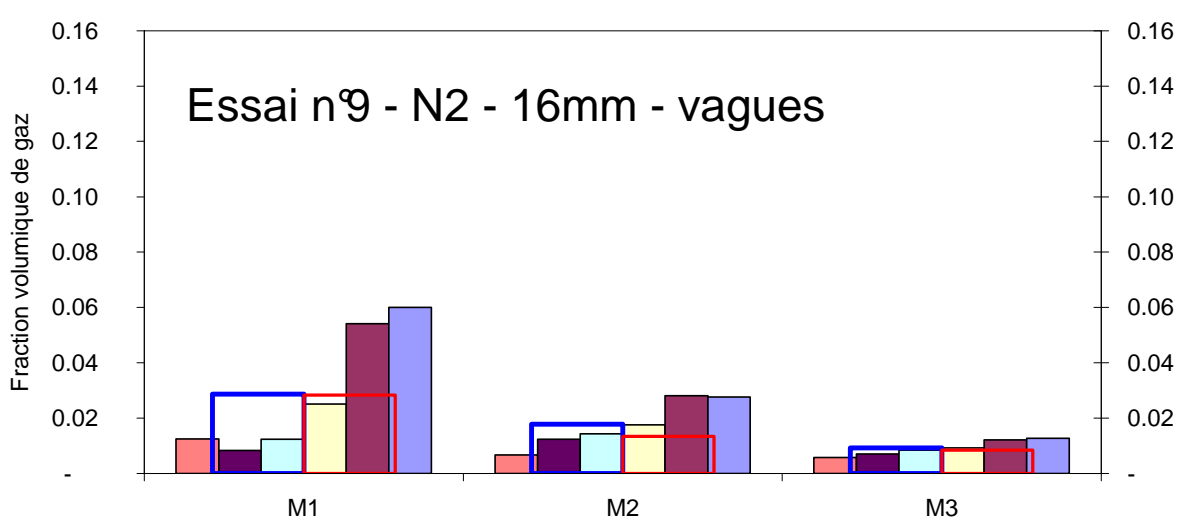
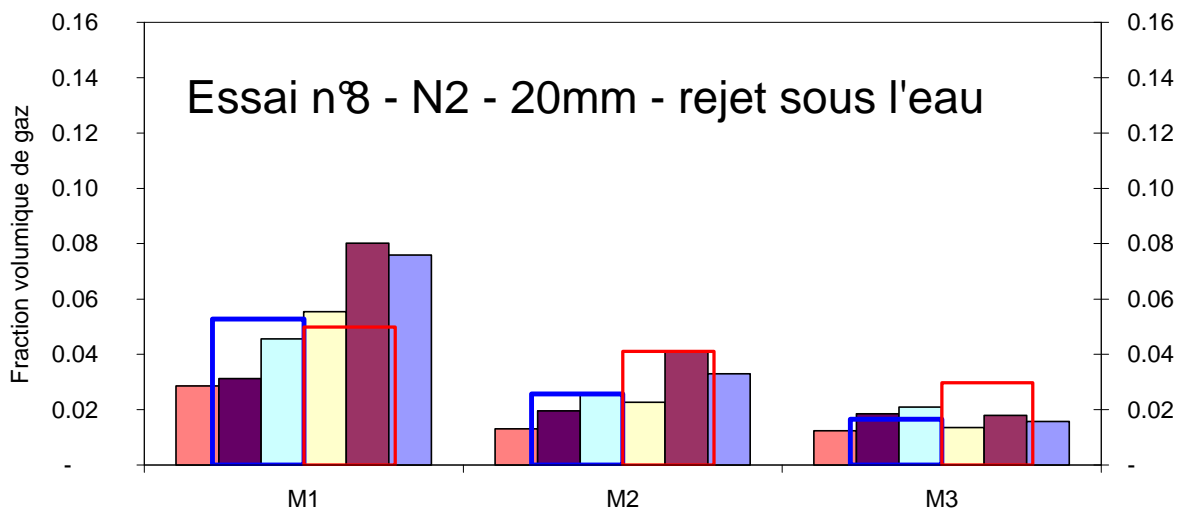
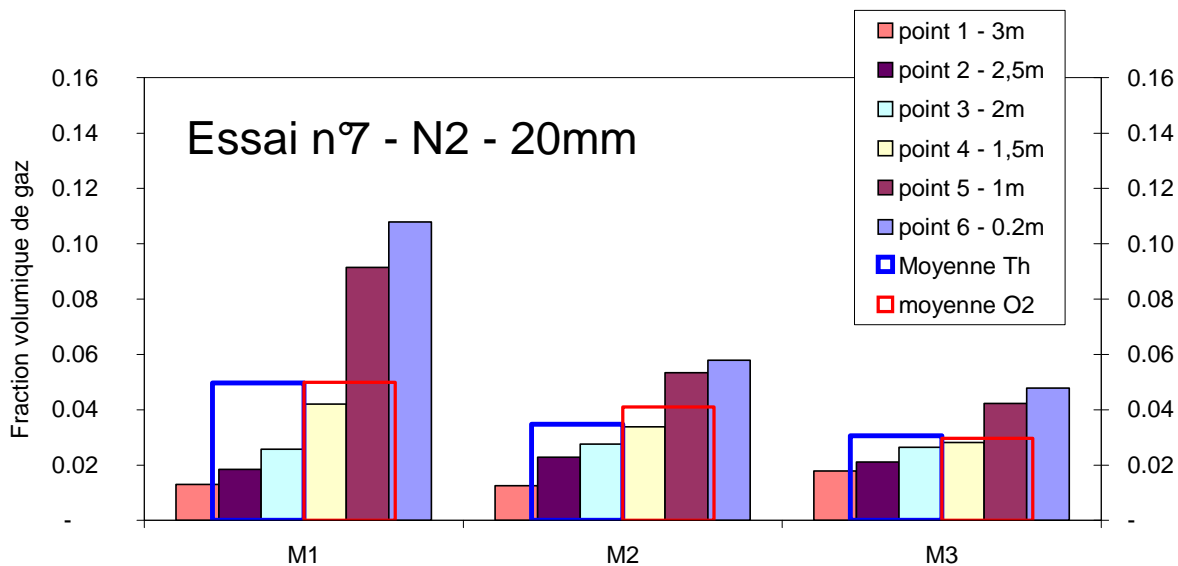


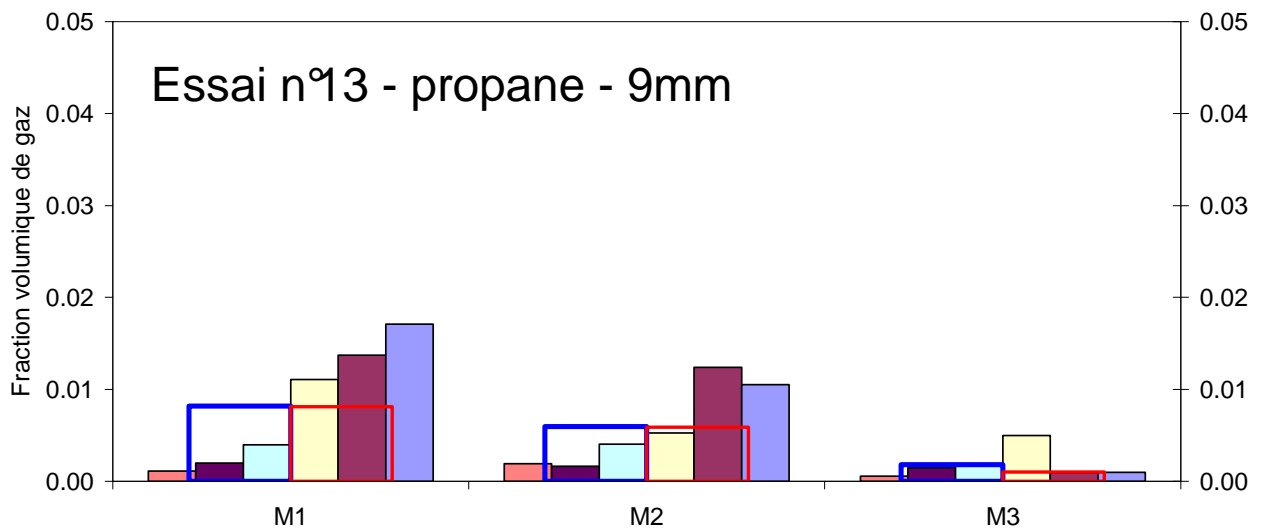
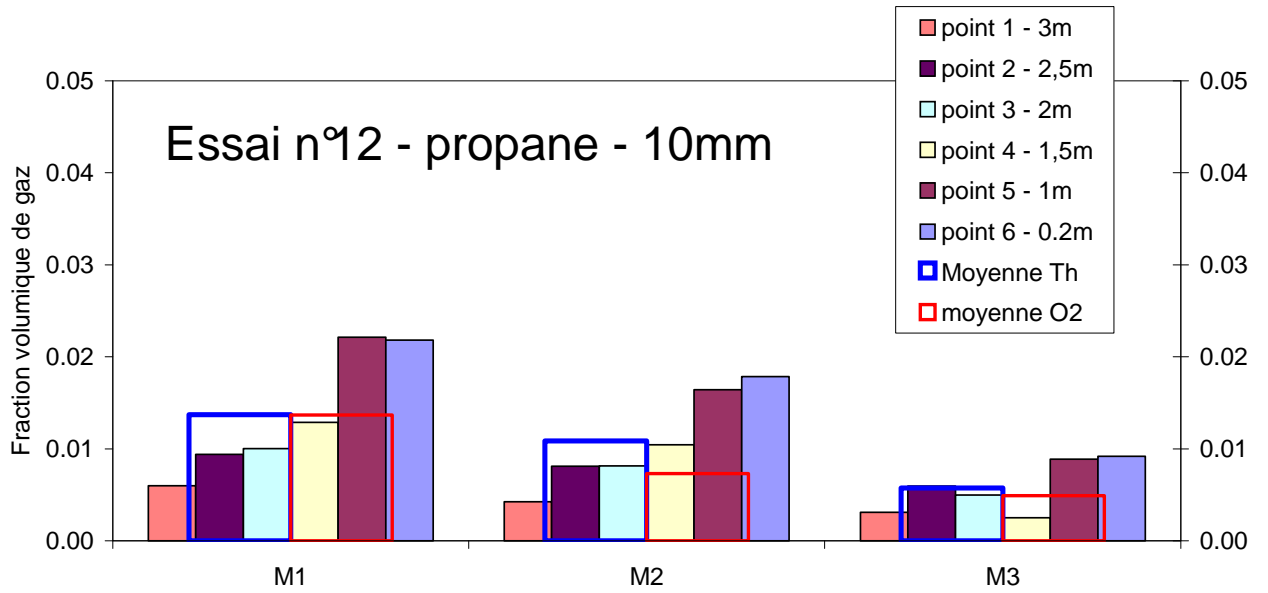


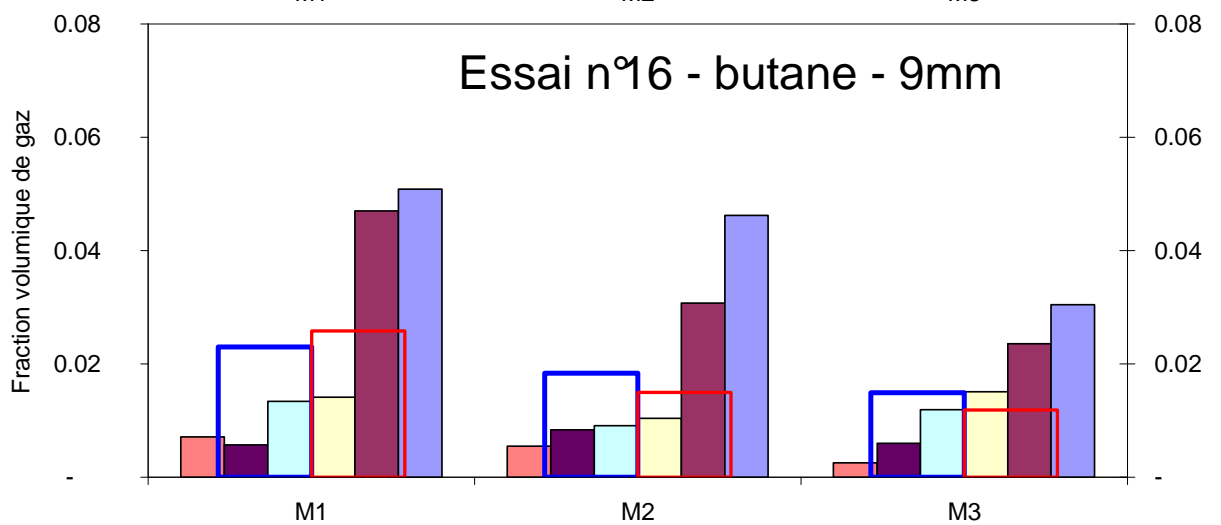
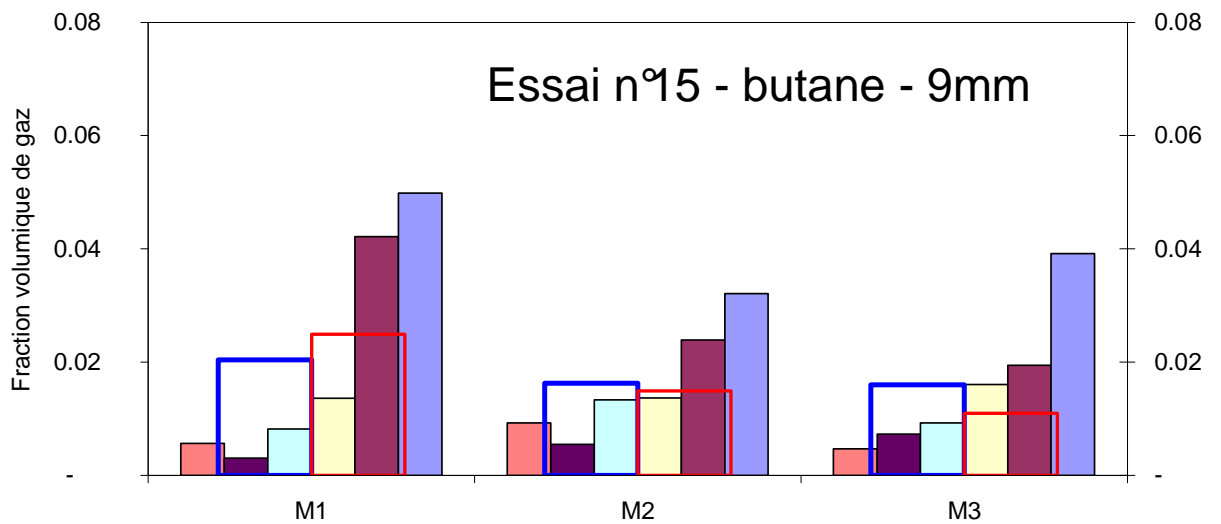
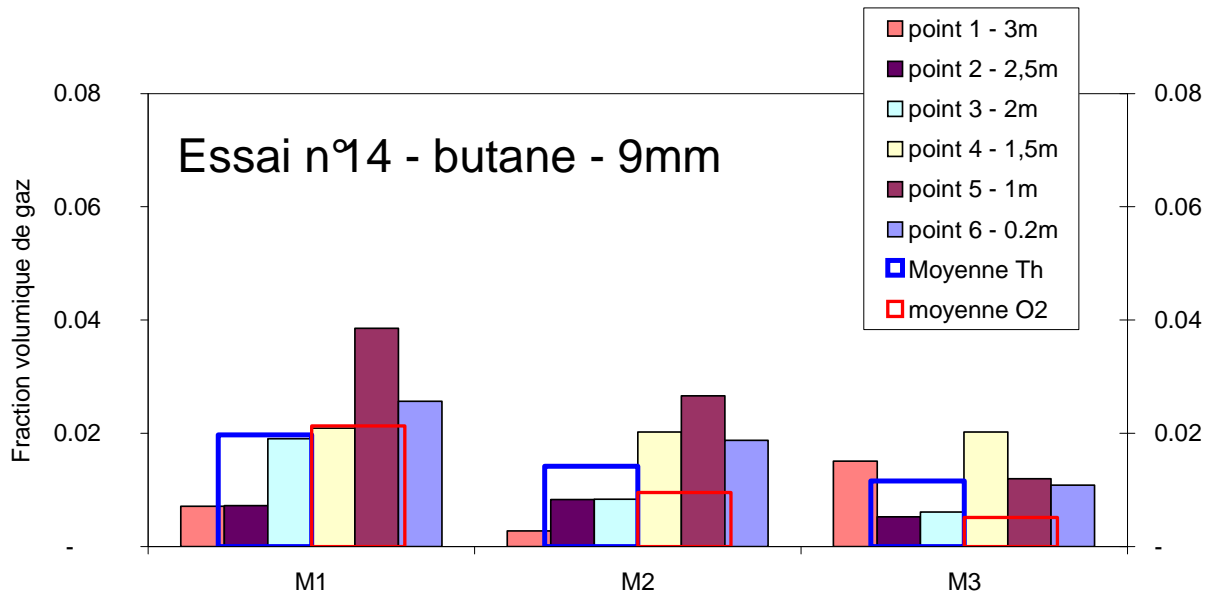
### Essai n°5 - N2 - 16mm



### Essai n°6 - N2 - 20mm







# CHAPITRE 4





**Evaluation du risque pour le personnel d'intervention  
aéroporté lors d'accidents maritimes impliquant des  
substances dangereuses évaporantes**



**FABRICE CARLE/FANCH CABIOC'H**

## **RESUME**

---

Le transport maritime et le stockage des matières chimiques se sont considérablement développés depuis 20 ans. Les connaissances sur le comportement de produits chimiques évaporants relâchés en mer et les méthodes d'intervention s'y référant sont peu nombreuses.

En cas d'accident, l'approche d'un navire transportant des substances susceptibles de s'évaporer ou des gaz liquéfiés avait donné lieu à des expérimentations en mer au début des années 90 (CEDRE, CEA, Marine Nationale).

Depuis, les techniques d'analyses, les processus de modélisation et les valeurs toxicologiques de référence ont évolué et autorisent une refonte complète du problème au sein d'un projet triennuel financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

Le projet GALERNE se propose d'étudier le comportement des produits gazeux et évaporants relâchés en mer et en particulier la dispersion dans l'atmosphère et la pénétration dans les aéronefs et ce, afin de contribuer à un meilleur cadrage des interventions aéroportées dans des zones que l'on sait contaminées.

La méthode proposée s'appuie sur la recherche de données récentes auprès d'organismes spécialisés et des sources du CEDRE. Un logiciel de modélisation est utilisé afin de comparer les résultats des expérimentations en mer. La modélisation est la base de scénarios d'accidents maritimes mettant en cause des substances dangereuses évaporantes. Ces scénarios permettent de définir les risques pour les intervenants. Par la suite, cette étude permettra d'affiner les méthodes d'intervention sur les accidents maritimes impliquant des substances dangereuses évaporantes.

## **ABSTRACT**

---

Maritime transport and the storage of chemical matters have developed considerably over 20 years. Knowledge of the behavior of evaporating chemicals spilled at sea and the response methods is minimal.

The approach of a chemical tanker or gas carrier in difficulty triggered experiments at sea at the beginning of the Nineties (CEDRE, CEA, French Navy).

Since, the technology of analysis, the processes of modelling and the toxicological reference values have evolved and make possible a complete recasting of the problem within a triennial project financed by the French Ministry of Research. The GALERNE project proposes to study the behavior of the products gas and evaporating spilled at sea, and in particular, the atmospheric dispersion, the penetration in the aircraft cockpit and this, in order to contribute to a better framing of the airborne responses in contaminated zones.

The method suggested is based on recent data from specialized organizations and from the CEDRE. A chemical dispersion modelling software was used in order to compare the results of the experiments at sea. Modelling was the basis of maritime accident scenarios involving the evaporating dangerous substances. These scenarios make it possible to assess the risks for the response team. Thereafter, this research will be used to specify the methods of intervention on the maritime accidents involving liquified gas and evaporating chemicals.

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

ADIOS	Automated Data Inquiry for Oil Spills
AEM	Action de l'Etat en Mer
ALOHA	Areal LOcations of Hazardous Atmospheres
BLEVE	Boiling Liquid Expending Vapour Explosion
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CEDRE	Centre de Documentation de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux
CRB	Centre de recherche du Bouchet
CROSS	Centre Régionaux Opérationnels de Secours et de Sauvetage
CTA	Coefficient de Transfert Atmosphérique
DGA	Délégation Générale pour l'Armement
EPA	Environmental Protection Agency
EPI	Equipement de Protection Individuelle
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines
FDS	Fiche de Données de Sécurité
GALERNE	GAz et Liquides Evaporants et Risques de Nuisances Environnementales et humaines
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de pétrole Liquéfié
IBC	International Bulk chemical Code
IDLH	Immediately Dangerous to Life or Health concentrations
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
IFP	Institut Français du Pétrole
IGC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IMDG	International Maritime Dangerous Goods
IMO	International Maritime Organization
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
LASEM	Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la marine
LIE	limite inférieure d'explosivité
LESU	Limites d'Exposition en Situation d'Urgence
LNE	Laboratoire National d'Essais
LSE	limite supérieure d'explosivité
ONERA	Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales
POLMAR	POLLution MARine
PPM	Partie Par Million
SNPE	Société Nationale des Poudres et Explosifs
STAT	Station Technique de l'Armée de Terre
VLE	Valeur Limite d'Exposition
TLV-STEL	Threshold Limit Value-Short Time Exposure Limit

# SOMMAIRE

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I ORGANISATION DE L'ETUDE</b> .....	<b>2</b>
1. CONTEXTE DE L'ETUDE .....	2
2. OBJECTIFS ET CONTENU .....	9
<b>CHAPITRE II RECHERCHE DE DONNEES RECENTES</b> .....	<b>11</b>
1. PROBLEMATIQUE.....	11
2. CONTACTS AVEC DES SPECIALISTES EXTERIEURS .....	11
3. LES EXPERIMENTATIONS POLLUTMAR .....	13
<b>CHAPITRE III UTILISATION DE L'OUTIL DE MODELISATION CHEMMAP</b> .....	<b>18</b>
1. LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE .....	18
2. LA MODELISATION DES POLLUTIONS ACCIDENTELLES .....	20
3. VERIFICATIONS DES RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LE COMPORTEMENT DU NUAGE TOXIQUE EN MER.....	29
<b>CHAPITRE IV APPLICATION : MODELISATION DES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT MARITIME METTANT EN CAUSE DU BENZENE</b> .....	<b>39</b>
1. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LE BENZENE.....	39
2. LE SCENARIO D'ACCIDENT.....	41
3. RECOMMANDATIONS POUR L'INTERVENTION .....	45
<b>CHAPITRE V LIMITES DE L'ETUDE</b> .....	<b>46</b>
1. LA PENETRATION DES GAZ DANS LES AERONEFS .....	46
2. SIMULATION DES TURBULENCES D'UN HELICOPTERE.....	46
3. LE LOGICIEL DE MODELISATION.....	46
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>56</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>58</b>
<b>LISTE DES ANNEXES</b> .....	<b>60</b>

## INTRODUCTION

---

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) estime que la moitié des colis et cargaisons en vrac transportés par mer à ce jour peuvent être considérés comme dangereux ou nocifs pour l'environnement. Une grande partie de ces substances, produits ou articles représente également un danger pour l'Homme.

L'augmentation constante du transport des produits chimiques dangereux par voie maritime ou fluviale entraîne également une augmentation du nombre d'accidents impliquant de tels produits.

Le personnel d'intervention ainsi que les populations alentours sont donc de plus en plus exposées aux accidents qui impliquent des substances chimiques, en témoigne l'accident du Ievoli Sun en 2000 qui a déversé 4 000 tonnes de styrène dont les vapeurs ont été ressenties par les pilotes des douanes et les populations alentours.

Or les méthodes d'intervention relatives aux déversements de produits chimiques semblent peu nombreuses et méconnues, en raison notamment de la complexité des comportements des substances chimiques déversées et de la grande diversité des produits.

Pour pallier ce manque, le CEDRE est à l'origine du projet « GALERNE » qui a pour objectif de comprendre le comportement de substances chimiques évaporantes et gazeuses déversées en mer afin de mieux maîtriser la gestion de l'accident.

Une partie de ce projet se focalise sur la problématique de l'intervention d'un aéronef exposé à une substance évaporante.

Dans ce cadre, la mission confiée au CEDRE a été de faire un point sur la pénétration d'un gaz dans les aéronefs d'intervention.

Notre implication dans ce travail s'est faite en plusieurs étapes : elle a commencé par une étude documentaire et un travail de synthèse, suivi d'une recherche auprès d'experts extérieurs au CEDRE. Elle a ensuite consisté à maîtriser un logiciel de modélisation afin d'élaborer des scénarios de rejet de produits chimiques. Ces scénarios serviront de base à l'élaboration de recommandations concernant l'approche par aéronef d'un chimiquier en difficulté. Ces recommandations seront finalisés pour la dernière période de mon stage qui se poursuit jusqu'au début septembre 2007.

Ainsi nous introduirons l'étude en décrivant le contexte dans lequel elle s'inscrit. Une fois les objectifs de l'étude précisés, nous nous attacherons à l'analyse des outils et méthodes mis en œuvre ainsi que des résultats obtenus. Nous terminerons enfin par une analyse critique de l'étude suivie des perspectives d'évolution pour ce projet.

## CHAPITRE I ORGANISATION DE L'ETUDE

---

### 1. Contexte de l'étude

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la problématique de l'intervention sur un navire en difficulté en mer et notamment les navires chimiques transportant des substances évaporantes liquides ou des gaz liquéfiés. Les quantités de substances dangereuses transportées sont en augmentation régulière et l'accidentologie met également en évidence une forte variété de ces substances et de leurs comportements. De ce fait, l'intervention sur un chimiquier doit être organisée par un ensemble de procédures permettant de prendre rapidement les meilleures décisions.

#### 1.1. Le transport maritime des matières dangereuses

Au cours des vingt dernières années, le transport maritime et le stockage des matières chimiques se sont considérablement développés. Bien que dominé par les échanges d'hydrocarbures, le trafic maritime est confronté à cette augmentation de la part des produits chimiques. Ainsi, le trafic en Manche est passé de 30 millions de tonnes en 1988 à 150 millions de tonnes en 2000, ce qui représente une multiplication par cinq en douze ans.

Cette croissance soulève la question du risque d'accidents, qui est d'autant plus important que la fréquence des voyages augmente, surtout dans les pays émergents. On peut par exemple citer les naufrages en mer des chimiquiers « Ievoli Sun » (Manche, octobre 2000), « Balu » (Golfe de Gascogne, mars 2001) et ECE (Manche, 2006)

Pour identifier et mieux gérer le risque associé au transport maritime de produits chimiques, plusieurs classifications selon la nature du produit et son mode de conditionnement existent :

- **Le code IMDG** (International Maritime Dangerous Goods) : Ce code maritime international utilise la classification ONU, également prise en compte par le règlement type du transport des marchandises dangereuses élaboré par le Comité d'experts du Conseil économique et social des Nations Unies. Ce code, qui s'applique à tous les navires transportant **des marchandises dangereuses en colis**, répartit les marchandises en neuf classes (matières explosibles, liquides inflammables, comburantes, toxiques...). Les substances, matières et objets identifiés comme polluants marins sont représentés comme suit : (voir annexes 2)
  - Les substances ayant un pouvoir de pollution (polluants marins) sont identifiés par la lettre « P ».
  - Les substances ayant un pouvoir de pollution extrêmement élevé (polluants marins présentant des risques graves) sont identifiés par les lettres « PP ».
- **La convention Marpol 73/78** : Cette convention, élaborée par L'Organisation Maritime Internationale (OMI), est divisée en cinq annexes. L'annexe II concerne les « pollutions par les **substances liquides nocives transportées en vrac** », et divise ces substances en 4 catégories (X, Y, Z et autres substances) selon un ordre décroissant de dangerosité pour la santé humaine et l'environnement marin ; (voir annexe 3)
- **Le système européen de classification (SEBC)** : Ce système européen classe les produits en fonction de **leur comportement physique** lors de leur déversement dans le milieu

aquatique et il les répertorie selon 12 groupes de comportements. Ce système est basé sur les paramètres physico-chimiques des produits (solubilité, masse volumique, pression de vapeur...) ; (Voir annexe 4)

- **Nomenclature uniforme des marchandises pour les Statistiques de Transport (NST/R)** : Les résultats des importations et des exportations suisses selon les moyens de transport sont publiés d'après la « Nomenclature uniforme des marchandises pour la statistique de transport » de l'UE, connue sous l'abréviation NST/R (Nomenclature uniforme des marchandises pour la Statistique de Transport, Révisée). Dans la NST/R, les marchandises sont classées principalement selon la nature et le degré d'ouvrison. La systématique de la NST/R compte 176 positions réparties en 52 groupes et 10 chapitres. **La section 8 concerne uniquement les produits chimiques.** Cette section est utilisée pour étudier le trafic en produits chimiques au sein des ports français. (voir annexe 5)

## 1.2. L'intervention sur navire en difficulté

Afin d'évaluer le plus rapidement les éléments importants utiles à l'intervention, une équipe est envoyée dès les premiers instants suivant l'accident sur place. Cette équipe a deux missions :

**a) L'évaluation** de la situation par une équipe hélitreuillée dont la composition est définie en fonction des différentes situations. L'investigation de cette équipe permet de renseigner le PC Opérations (Centre d'Opérations Maritimes basé dans une préfecture Maritime) sur l'état du navire, tant pour ce qui concerne le risque de navigation que le risque de pollution, avéré ou possible. Les décisions relatives au navire (remorquage vers telle ou telle zone abri, éventuellement vers un port si le navire est sécurisé) ou aux mesures antipollution seront prises à partir des informations fournies par l'équipe d'évaluation.

**b) La lutte** contre un sinistre déclaré, l'équipage du navire n'étant pas en mesure d'y faire face seul, soit parce qu'il a quitté le bord, soit parce qu'il a été victime lui-même du sinistre. En préalable à cette mission, la nature de la cargaison du navire est recherchée par les Centre Régionaux Opérationnels de Secours et de Sauvetage (CROSS) (cette recherche sera par la suite effectuée par les services de l'Action de l'Etat en Mer (AEM)).

### 1.2.1. La protection des premiers intervenants : la Phase Réflexe

Une fois la cargaison connue, les CROSS ou les AEM demandent alors aux experts de la Marine (Sapeurs pompiers, chimistes du LASEM (Laboratoire d'analyse, de surveillance et d'expertise de la marine)) ou aux conseillers techniques du *CEDRE*) de fournir une première évaluation des dangers afin de prémunir les équipes d'intervention contre les risques toxiques et d'inflammation.

Plusieurs niveaux d'informations sont demandés à la **Cellule d'Expertise d'Urgence** par le Centre Opérationnel de la Marine :

**a) Le comportement du produit.**

S'agit-il d'un produit qui génère des gaz (évaporation), qui reste flottant, ou coulant. Quels sont les risques de réaction tels la polymérisation brutale en cas d'incendie à bord d'un navire transportant un monomère ou une réaction violente avec l'eau de mer...

**b) Les dangers propres au produit.**

La classification de danger (corrosivité, inflammabilité, brûlures par le froid, asphyxie, toxicité...) constitueront ensuite un élément de décision important.

c) Les Limites d'Exposition en Situation d'Urgence (LESU).

Dans le cas de produits évaporants (toxiques, corrosifs, asphyxiants) les valeurs relatives à l'intervention seront à fournir :

- **L'IDLH** (*Immediately Dangerous for Life and Health*)

L'IDLH est la concentration atmosphérique maximale à laquelle une personne peut se soustraire en 30 minutes sans l'apparition d'aucun symptôme de neutralisation des réflexes de fuite ou d'effets irréversibles sur la santé.

L'IDLH est une valeur anglo-saxonne qui présente l'avantage d'être connue de tous les sapeurs pompiers.

- **La VLE** (*Valeur Limite d'Exposition*)

La VLE représente la concentration maximale admissible, pour une substance donnée, dans l'air du lieu de travail, à laquelle le travailleur peut être exposé pour une durée de 15 minutes. La VLE est une donnée française qui n'existe malheureusement pas pour tous les produits.

- **La TLV-STEL** (*Threshold Limit Value-Short Time Exposure Limit*)

La TLV-STEL constitue une moyenne sur 15 min qu'il ne faut jamais dépasser sans protection. Ces valeurs correspondent à des seuils au dessous desquels un ensemble de symptômes ne surviendra pas, compte tenu d'une exposition relativement brève. Ces valeurs ne conviennent pas aux populations.

- **Les Limites d'explosivité** (ou d'inflammabilité) seront aussi des éléments à fournir.

### 1.2.2. La protection des populations et la prise de décision

Nous ne sommes plus dans l'urgence proprement dite à renter mais dans la réflexion et la prise de décision sur le devenir du navire. Le navire sinistré doit être pris en remorque soit pour l'éloigner d'une zone sensible et urbanisée soit au contraire pour le rapprocher d'une zone abris où il sera sécurisé voire allégé avant d'être autorisé dans un port. Les routes maritimes font passer ces navires dans des détroits, à proximité de côtes ayant une forte densité de population. Les autorités se basent sur des scénarios et des calculs mis au point par les experts pour fonder leur décision. Hors, renseigner ces scénarios c'est déjà bien comprendre le comportement du produit une fois libéré en mer.

Les valeurs LESU à prendre en compte dans la protection des populations sont les ERPG (Emergency Response Planning Guidelines) ou les TEELs (Temporary Emergency Exposure Limit). Cette recommandation des Centres Antipoison permet de définir les seuils en dessous desquels une population sera confinée ou au contraire évacuée. On imagine sans peine que l'évacuation d'une grande quantité de personne est une mesure lourde à mettre en œuvre, compte tenu de la logistique qu'elle implique mais aussi des effets psychologiques induits (panique, colère...)



Le schéma ci-dessous montre comment les relations entre les différents acteurs interfèrent lors d'un accident maritime :

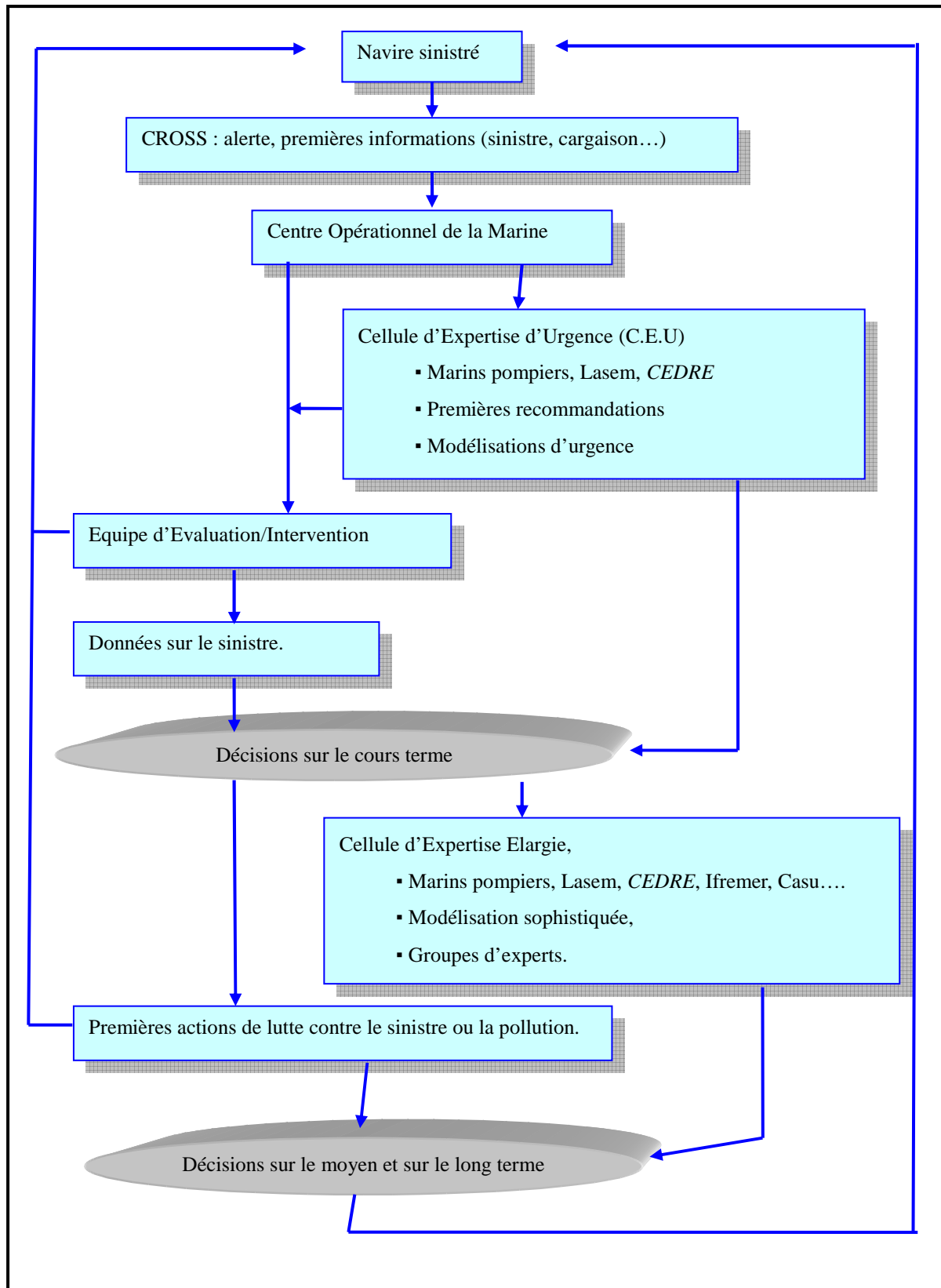


Figure 1 :L'intervention sur navire en difficulté : schéma des actions

### 1.3. Les missions aériennes en mer

Lors d'accidents en mer impliquant des chimiquiers ou des navires gaziers, plusieurs entités mettant en œuvre des moyens aériens sont susceptibles d'intervenir. Ces moyens aériens réalisent deux types de missions. Lors de ces missions, le personnel intervenant est susceptible d'être exposé à des dangers de différentes natures.

#### 1.3.1. L'observation aérienne

Cette mission est réalisée en priorité par les douanes françaises car elles disposent d'aéronefs adaptés. En effet, outre ses attributions classiques de protection du territoire sur le plan fiscal et économique, la douane contribue aux côtés d'autres administrations présentes en mer à la protection du milieu marin, à la sécurité des personnes et des biens et à la sûreté du territoire

Pour cela elle dispose notamment de 3 avions POLMAR spécialisés dans la détection des pollutions marines :



*Photo 1 : F 406 POLMAR III*

L'observation aérienne réalisée par les avions de la douane a donc deux objectifs distincts :

- **En routine**, pour la recherche et la répression de la pollution opérationnelle par les navires, l'observation a pour buts de :

- Repérer la pollution ;
- La localiser et la décrire précisément ;
- Identifier le pollueur ;

Ceci afin de :

- Permettre l'évaluation (quantité et qualité) de la pollution ;
- Anticiper sur l'évolution de la situation ;
- Permettre des poursuites via l'établissement d'un procès verbal.

- **En cas d'accident**, pour soutenir les opérations de récupération ou dispersion en mer, les missions d'observations ont pour buts de :

- Localiser les nappes ;
- Les décrire précisément ;
- Cartographier la pollution ;

Afin de :

- Permettre le suivi de la pollution ;
- Recaler les modèles de dérives ;
- Guider les opérations de lutte de jour ;
- Préparer les opérations de lutte des jours suivants.

La recherche en haute mer est également réalisée au moyen de l'Atlantique 2 (ATL2), **L'Atlantique 2** couvre un très large rayon d'action (4 300 nautiques, soit 18 heures de vol ). La recherche est facilitée par sa " bulle " située sur le nez de l'appareil :



Photo 2 : L'atlantique 2

En cas d'accident, l'observation aérienne est le seul moyen d'avoir une idée claire de la réalité. Elle constitue le premier maillon d'une chaîne de décisions essentielle.

### 1.3.2. Les missions d'hélictreillage

Dans le cadre d'une intervention sur un navire en difficulté, certaines missions nécessitant l'emploi d'un hélicoptère peuvent être menées. Ce sont :

- Le treuillage à bord du navire d'une équipe qui va évaluer la situation
- L'évacuation de l'équipage
- Le treuillage à bord d'une équipe de remorquage

Le type d'appareil privilégié en France pour effectuer ces missions est **l'hélicoptère Super Frelon**.

En effet son rayon d'action (420 nautiques=750km) lui permet le sauvetage en haute mer par des conditions très difficiles. Ses dimensions et ses trois turbines lui permettent de transporter jusqu'à 27 hommes ou 15 blessés sur civières.



*Photo 3 : Le super frelon dans une mission d'hélitreuilage*

### **Le Dauphin et le Lynx (Aéronavale/Service Public) : Délai d'intervention : 2h**

Formidable chasseur de sous-marin redouté dans toutes les eaux du globe, **le Lynx** intervient fréquemment pour des missions de sauvetages aux marins. Cet hélicoptère bi-turbines équipé d'un treuil est plus rapide à mettre en œuvre qu'un Super-Frelon.

Son rayon d'action plus court (320 nautiques) et sa capacité de trois civières maximum le limite à certaines missions.

**Le Dauphin N**, présent sur 4 sites en France, est uniquement dédié aux missions de Service Public, contrairement aux autres appareils de l'aéronavale qui ont également une fonction militaire.



*Photo 4 : Le Lynx*



*Photo 5 : Le Dauphin*

#### **1.4. Dangers et cibles lors d'interventions en mer impliquant des substances dangereuses.**

Un accident maritime mettant en cause des substances dangereuses est source de danger à plusieurs niveaux :

En premier lieu, l'équipage lui-même est directement exposé à plusieurs types de dangers : incendie généralisé du navire, feu de nappe, rupture cryogénique, asphyxie, brûlures, brûlures cryogéniques, gaz évaporés, gaz et fumées générés par un incendie, aérosols...

Le personnel « volant » intervenant sur le sinistre est également exposé aux risques d'asphyxie, d'incommodations en altitude, à l'allumage d'un nuage explosif en altitude due à l'ignition des turbines d'un hélicoptère.

La rupture subite du navire peut provoquer une transition rapide de phase (TRP). Une TRP est la vaporisation « quasi-instantanée » d'une substance dans le cas où deux liquides en présence présentent une différence importante de température. Si cette TRP se produit au-dessus de la zone survolée le personnel sera exposé à une onde de choc.

La population côtière est susceptible également d'être touchée par un nuage toxique qui atteindrait la côte. En général, le risque toxique est ici plus élevé que le risque d'explosion, ce dernier ne concerne que les zones les plus proches du sinistre.

## **2. Objectifs et Contenu**

### **2.1. Objectif de la tâche 2 du projet Galerne**

Dans le contexte de l'intervention en mer, ce travail s'intéresse principalement à la partie « protection des premiers intervenants ».

Cette sous-tâche s'intéresse, dans ce cadre, aux risques liés au survol par aéronef d'une nappe de produits évaporants issus d'un navire sinistré.

Plusieurs questions se posent alors :

- Comment va se faire l'approche par hélicoptère ?
- Comment effectuer une surveillance par aéronef et à quelle hauteur surveiller les nappes flottantes ?

L'objectif de la tâche 2 du projet Galerne est de réunir les informations nécessaires par le biais de recherche et d'expérimentations pour répondre à ces questions et définir par la suite une procédure d'approche sur un navire en difficulté.

### **2.2. Objectif et contenu de l'étude**

L'objectif fixé est de réaliser une étude sur la pénétration d'un gaz dans un aéronef.

A l'origine du projet Galerne, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) devait mettre en œuvre ses moyens pour réaliser des expérimentations en mer à ce sujet. Malheureusement cet établissement s'est retiré du projet peu avant son lancement. Il n'y aura donc pas d'expérimentations prévues pour ce thème. Ce travail se base donc uniquement sur des expérimentations effectuées par le CEDRE et le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) au début des années 1990.

Pour réaliser ce projet, le travail s'est organisé de la façon suivante :

- **Recherche de l'existant sur le sujet**

Cette recherche a été tout d'abord bibliographique et précède une prise de contact avec plusieurs entités qui étaient susceptibles de me renseigner.

- **Analyse des résultats d'expérimentations passées**

L'analyse des résultats d'expérimentations effectuées au CEDRE pour l'acquisition de données références sur le sujet.

- **Utilisation d'un outil de modélisation**

**Confrontations des résultats**

Cette étape consiste à comparer les données de référence issues des expérimentations avec les données calculées par un logiciel de modélisation utilisé par le CEDRE.

**Application à différents scénarios**

Différents scénarios sont élaborés permettant d'évaluer le risque auquel est exposé le personnel intervenant dans les conditions de l'étude.

- **Recommandations**

L'objectif sur ce point est, à partir des données recueillies et des résultats obtenus avec le logiciel de modélisation d'émettre des recommandations quant à l'approche par aéronef d'un navire en difficulté.

## **CHAPITRE II RECHERCHE DE DONNEES RECENTES**

---

### **1. Problématique**

Après une recherche documentaire au Cedre, nous avons réalisé que la documentation mise à la disposition du public (bibliothèques, sites internet spécialisés) était très pauvre. Aussi, nous nous sommes tournés vers des institutions spécialisées.

### **2. Contacts avec des spécialistes extérieurs**

Nous avons pris contact avec plusieurs établissements ; des institutions publiques et militaires ainsi que des institutions privées, notamment des laboratoires spécialisés.

Ces prises de contact avaient pour objectif de :

- Cadrer le sujet
- Connaître le retour d'expérience d'accidents significatif au sujet.
- Rechercher l'existence d'expérimentations ayant une concordance avec mon sujet.

#### **2.1. Cadrage du sujet**

Les entretiens téléphoniques avec les correspondants du Bureau des Risques Majeurs (BRM) de la Direction de la Sécurité Civile (DSC) ont permis de discuter de :

- L'exposition des fumées des feux de forêts pour les pilotes de la Sécurité Civile

Nous nous sommes orientés vers une hypothèse concernant la possible exposition des pilotes d'aéronef de lutte contre les feux de forêts aux fumées d'incendies. Si cette idée s'avérait significative, elle pourrait se relier à l'exposition des pilotes au gaz toxiques lors des interventions en mer et apporter des données nouvelles.

Néanmoins, le bureau des risques majeurs de la sécurité civile a infirmé cette hypothèse évoquant le fait que l'exposition des pilotes des canadiens aux fumées d'incendie était négligeable car la vitesse de passage de ces aéronefs ne permet pas une pénétration des fumées dans l'habitacle.

- Puis nous nous sommes posés la question de savoir quel type d'aéronef était susceptible d'être concerné par le projet, et si l'étude ne pouvait pas s'élargir aux aéronefs autres que ceux participant à l'intervention en mer.

Après un entretien avec Mr André COSSE, expert en observation aérienne des pollutions au Centre Aéronautique des Douanes, nous avons pu cadrer l'étude en ne retenant que les types d'aéronefs cités précédemment dans la partie II.1.3. En effet, les autres aéronefs sont pour la plupart pressurisés, donc il n'y a pas d'entrée d'air issue de l'extérieur, par conséquent aucun gaz ne peut entrer dans l'habitacle.

#### **2.2. Retour d'expérience Ievoli Sun**

Nous avons ensuite abordé le retour d'expérience de l'intervention sur le chimiquier « Ievoli Sun ». Suite à une avarie, le Ievoli Sun, transportant notamment 3 998 tonnes de styrène, a coulé le 31 octobre 2000 à la limite des eaux françaises, britanniques et anglo-normandes.

Cet accident est particulier et requiert notre attention pour cette étude puisque ce chimiquier transportait du styrène qui est une substance liquide, flottante et évaporante.

D'autre part, ce cas est particulier dans la mesure où lors de l'intervention, le personnel navigant d'un aéronef des douanes, lors du survol de nappes de styrène libérées à la suite de l'accident, a été incommodé du fait de l'exposition aux vapeurs de styrène.

Des restrictions en matière de circulation aérienne ont donc été mises en place, ainsi une zone réglementée temporaire de 2 nautiques (4km) de rayon et de 1500 pieds (500m) d'altitude a été définie autour du sinistre.

Ce retour d'expérience montre qu'en terme de sécurité humaine, de pollution du milieu marin, les chimiquiers peuvent présenter un danger bien plus important que les pollutions par hydrocarbures dues à des pétroliers. Cet accident a également montré les limites des connaissances en matière de comportement des produits chimiques déversés dans l'eau de mer.

### 2.3. Recherche de données récentes

Au cours de nos recherches documentaires, nous avons appris l'existence d'expérimentations portant sur la vulnérabilité d'un hélicoptère. Cela m'a amené à prendre contact avec la STAT (Station Technique de l'Armée de Terre), réalisateur de ce projet. En effet il est intéressant de se pencher sur ces expérimentations car les préoccupations de ces essais rejoignent celles de notre étude. Il serait alors intéressant de recueillir les résultats issus de ces expérimentations et de les confronter aux données existantes sur la pénétration d'un gaz sur un aéronef.

Néanmoins après un entretien téléphonique avec le responsable du groupement « Armes Nucléaires et Chimiques », il s'est avéré que les archives correspondantes à ces expérimentations ont été détruites car trop anciennes.

Par la suite nous avons pris contact avec plusieurs responsables de la DGA (Délégation Générale pour l'Armement), expert technique aux services des forces armées, dans l'optique de trouver la trace d'expérimentations similaires au sujet. Cependant, cette recherche a été vaine, ce qui, compte tenu du caractère militaire des renseignements peut se comprendre.

Nous avons ensuite contactés les organismes de recherches privés et publics suivants :

- Le LNE (Laboratoire National d'Essais)

<http://www.lne.fr/>

Le LNE a pour vocation de répondre aux besoins de mesures et d'essais de l'industrie, principalement dans les domaines des matériaux, des machines et de la physique.

- L'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales)

<http://www.onera.fr/>

L'ONERA est un établissement public français de recherche dédié au secteur aéronautique et spatial.

- Le CRB (Centre de Recherche du Bouchet)

<http://www.materiaux-energetiques.com/DRT/fr/crb/index.html>

Le CRB est un centre dédié à la recherche sur les matériaux énergétiques pour les applications civiles et militaires. Il appartient au groupe SNPE (Société Nationale des Poudres et Explosifs), il est également tiers-expert au Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables.

Deux de ces institutions (ONERA et CRB) ont déjà travaillé sur des thèmes correspondants à mon étude. Ainsi l'ONERA a étudié la diffusion de gaz toxiques dans l'atmosphère et la pénétration de gaz dans des bâtiments. Ces deux organismes ont proposé de fédérer une équipe sur le sujet de la pénétration de gaz dans un aéronef. Ces propositions, n'entrant pas



dans le budget du projet Galerne et dans le cadre de mon stage, nous n'y avons pas donné suite.

En conclusion, les informations collectées par le biais d'entretiens avec différents responsables n'ont pas permis de mettre à jour les connaissances sur la pénétration d'un gaz dans un aéronef à l'approche d'un navire en difficulté.

La spécificité du sujet et le peu d'écho trouvé auprès des organismes contactés, ont rendu difficile l'obtention de nouvelles données.

Cependant cette recherche n'a pas été vaine, puisque ce travail a permis d'établir une liste des personnes à contacter pour d'éventuelles recherches ultérieures relatives à la dispersion atmosphérique et à l'aéronautique.

### **3. Les expérimentations POLLUTMAR**

Afin de combler l'absence d'expérimentations, initialement prévues, portant sur la pénétration des gaz dans les aéronefs, nous nous sommes penchés sur des essais en mer réalisés en 1992.

Ces essais, bien que anciens, présentent un fort intérêt car, à notre connaissance, ce sont les seules expérimentations réalisées sur le sujet.

#### **3.1. Objet**

De 1989 à 1992, le CEDRE, en collaboration avec la Marine Nationale et l'IRSN, a mené des expérimentations en mer et à terre.

Les campagnes POLLUTMAR 1 et 3 se sont déroulées respectivement en 1989 et 1991 au large de la Bretagne. Elles avaient pour but l'observation du comportement de produits chimiques (étalement, évaporation, dissolution) suite à un déversement en mer.

Les campagnes POLLUTMAR 2, 4 et 5 entrent particulièrement dans le cadre du projet GALERNE puisqu'elles avaient pour objet l'étude du comportement d'un nuage gazeux suite à un déversement de produits chimiques en mer ainsi que l'influence d'une approche par hélicoptère sur ce nuage. Le but étant de mesurer l'extension horizontale et verticale du nuage gazeux et d'apprécier le risque pour le personnel intervenant.

#### **3.2. Méthodologies utilisées**

##### **3.2.1. Traçage au SF6**

Durant ces expérimentations, la méthodologie a été la même : l'utilisation d'un gaz traceur : l'hexafluorure de soufre (SF6) en remplacement du gaz toxique. Par l'intermédiaire du traçage SF6, il est possible de simuler l'évaporation d'une nappe de gaz à la surface de la mer. La simulation par traceur consiste à émettre un gaz avec un débit connu et à mesurer des concentrations, à différents points de la masse d'air environnante.

Une nappe d'épandage était installée sur le pont d'un bateau et libérait le gaz SF6 à un débit constant de façon à simuler l'évaporation.

##### **3.2.2. Le Coefficient de Transfert Atmosphérique (CTA)**

Lors des expérimentations, le traçage au SF6 permet de mesurer le rapport concentration sur débit appelé Coefficient de Transfert Atmosphérique (CTA). On estime que ce CTA représente le même coefficient dans le cas du polluant, en assimilant le SF6 au polluant :

$$\text{CTA} = \frac{C \text{ (mg.m}^{-3}\text{)}}{Q \text{ (mg.s}^{-1}\text{)}} \text{ (s.m}^{-3}\text{)}$$

En effet, le mécanisme de dispersion atmosphérique est régi principalement par la diffusion turbulente (le mouvement des particules d'air). Par conséquent les gaz présents dans l'atmosphère à l'état de polluants diffusent tous avec le même comportement quelle que soit leur nature chimique. La diffusion moléculaire peut être considérée comme négligeable car elle se situe à l'échelle microscopique.

Une fois les CTA du gaz traceur mesurés, on pourra calculer les concentrations des différents polluants en établissant des scénarios :

Par exemple, pour une nappe de 100 m<sup>2</sup> de benzène, les valeurs du taux d'évaporation, de la surface de la nappe et du CTA mesuré permettent de calculer les concentrations en benzène dans l'atmosphère.

Les CTA ont été calculés sous le vent du déversement et autour de la nappe d'épandage afin de déterminer le comportement du nuage gazeux sans hélicoptère et avec hélicoptère en vol stationnaire au dessus de la nappe.

Les CTA ont été également calculés dans l'habitacle de l'hélicoptère à différentes altitudes pour apprécier la pénétration du gaz.

### 3.3. Résultats, Observations

#### 3.3.1. La dispersion atmosphérique en mer

Les expérimentations effectuées en mer lors des campagnes POLLUTMAR ont permis de mieux comprendre le phénomène de dispersion atmosphérique en mer, et de quantifier les différents paramètres.

##### - *Fluctuation de la direction du vent*

Lors de ces campagnes, on a remarqué que la direction du vent changeait constamment. Il s'avère, en effet, que sur terre, la direction du vent oscille moins qu'en mer. On considère sur terre que plus un vent est fort, plus sa direction est stable. On peut considérer que pour un vent inférieur à 1m/s, la direction du vent va osciller d'un angle de 60° de part et d'autre de sa direction moyenne, de 40° pour un vent inférieur à 3 m/s, de 30° pour un vent inférieur à 5m/s et de 20° pour un vent supérieur à 5m/s. Les mesures effectuées en Méditerranée lors des campagnes POLLUTMAR montrent que quelle que soit la vitesse du vent, la direction du vent va osciller de 40° de part et d'autre de sa direction moyenne.

##### - *Faible diffusion du polluant*

La diffusion atmosphérique est fonction d'un certain nombre de paramètres notamment la direction du vent et la vitesse du vent mais aussi les turbulences qui favorisent la dispersion du polluant. Ces turbulences sont engendrées par le relief (arbres, bâtiments, montagnes...)

Du fait que l'on étudie la dispersion atmosphérique à la surface de la mer, on est en présence d'une surface plane, sans reliefs susceptibles d'engendrer des turbulences supplémentaires. Ainsi, la diffusion du polluant est plus lente car le brassage est moins important. Le panache à

la surface de la mer est donc soumise à moins de turbulences, ceci implique une diffusion plus faible. En conséquence, la concentration en polluant est alors plus élevée en moyenne. On peut résumer ces deux phénomènes dans le tableau 1 :

	DIFFUSION SUR MER	DIFFUSION SUR TERRE
DIRECTION DU VENT	Très variable	Fonction de la vitesse du vent
	Angle de 40°	Angles de 60°, 50°, 40° et 20°
DIFFUSION TURBULENTE	Faible	Importante

Tableau 1: Comparaison de la diffusion atmosphérique sur terre et sur mer

Dans le cas d'une diffusion d'un polluant à la surface de la mer nous sommes donc en présence d'un panache qui serpente considérablement du fait de la variation de la direction du vent et d'un panache qui diffuse plus lentement du fait du manque de turbulences.

### 3.3.2. Comportement du panache

En premier lieu, on a constaté lors des expérimentations, que le panache avait une portée horizontale plus conséquente à la surface de la mer que sur terre. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y ait peu de turbulence à la surface de la mer, le panache diffusant plus lentement, la distance atteinte sera donc plus grande. D'autre part, le développement horizontal du nuage gazeux est tributaire des variations du vent, qui peuvent dépasser 90°. On constate également que la diffusion horizontale du panache suit une courbe de décroissance dans l'axe du vent, les concentrations sont plus faibles à mesure que l'on s'éloigne de la source.

Le développement vertical met en évidence une stratification des concentrations. Le nuage reste concentré jusqu'à 30m d'altitude mais des « bulles » de forte concentration ont aussi été enregistrées jusqu'à 40 m d'altitude. La concentration mesurée n'évolue pas régulièrement en fonction de l'altitude, cependant il est important de relativiser ces remarques en tenant compte des conditions météorologiques sachant que les expérimentations se sont déroulées avec un vent faible, ce qui n'entraîne pas de turbulences importantes.

### 3.3.3. Influence de l'hélicoptère sur le panache

L'hélicoptère en vol stationnaire crée des turbulences qui influent sur le comportement du nuage. En effet l'appareil déplace de haut en bas une masse d'air très importante qui va être projeté à la surface de l'eau en provoquant de très fortes turbulences. Ces turbulences, ainsi créées, ont des conséquences sur le développement horizontal du panache ainsi que sur la pénétration du gaz dans l'habitacle de l'appareil :

#### - Développement horizontal du panache en présence d'un hélicoptère

L'influence des pales du rotor de l'hélicoptère sur la forme du nuage a été étudiée en mesurant la concentration de SF6 à 200m sous le vent et à 40m, 30m, 20m et 10m de hauteur. On remarque que l'hélicoptère induit des courants descendants qui s'échappent latéralement et

dont les effets se font sentir de plus en plus à basse altitude en fonction inverse de l'altitude ; plus l'hélicoptère est bas, plus la concentration mesurée à 200m de l'émission, au niveau du sol est élevée.

Cette observation est générale pour 3 types d'hélicoptères testés. Il est difficile au vu des résultats obtenus, de déterminer de façon précise et exacte l'influence de chacun des hélicoptères sur la forme du nuage. D'autant que les points de prélèvements sont fixes, que la direction du vent est oscillante et que la proximité du point d'émission ne permet pas de pondérer les effets de changement de direction du vent.

- *Pénétration du gaz dans l'habitacle de l'hélicoptère*

Les campagnes POLLUTMAR 4 et 5 ont permis d'acquérir des données sur les concentrations de polluants dans une cabine d'hélicoptère que l'on pourrait obtenir si celui-ci survole une nappe de produits évaporants. Les concentrations ont été mesurées dans l'habitacle d'un hélicoptère en vol stationnaire au dessus de la nappe d'épandage.

Les conclusions principales de ces campagnes sont résumées dans le tableau 2 :

	POLLUTMAR 4	POLLUTMAR 5
Altitude à laquelle le nuage pénètre dans l'habitacle	< 13 m	< 30 m
Altitude recommandée pour l'hélicoptère	40 m	> 20 m
		> 30 m (si produit très toxique)

Tableau 2 : Recommandations des campagnes POLLUTMAR 4 et 5

Les expérimentations POLLUTMAR 4 ont conclu que pour un vol stationnaire à 13 m d'altitude et par vent faible, le nuage gazeux pénètre dans l'appareil. De plus, à 40 m d'altitude, la pénétration du gaz est très faible.

Au vu de ces résultats, le rapport POLLUTMAR 4 fait état d'une recommandation en ce qui concerne l'hélicoptère au dessus d'un chimiquier en difficulté ; il est recommandé de l'effectuer à 40 m d'altitude avec le port d'EPI (Equipements de Protection Individuels) adaptés à la nature du risque pour le personnel intervenant.

La campagne POLLUTMAR 5 avait pour but d'apporter des précisions sur ces éléments ainsi que sur la cinétique de pénétration du nuage toxique dans l'habitacle de l'aéronef et l'influence du type d'aéronef sur les teneurs en gaz et la vitesse de pénétration dans la cabine.

Ces expérimentations POLLUTMAR 5 complètent les conclusions de POLLUTMAR 4 en fixant l'altitude pour laquelle le nuage gazeux commence à pénétrer dans l'hélicoptère à 30 m. De plus, d'une façon générale, on constate que la pénétration du gaz dans la cabine est quasi instantanée (de l'ordre de la minute) lorsque l'hélicoptère est arrivé à son altitude normale.

La détermination de différents scénarios a également démontré qu'en dessous de 30m d'altitude, des teneurs en produits chimiques atteignant des niveaux « dangereux » pouvaient être rencontrés dans l'habitacle suivant la nature du produit et la quantité déversée.

Néanmoins l'altitude d'approche recommandée dans POLLUTMAR 5 doit être seulement supérieure à 20 m (30 m pour un produit très toxique).

Les recommandations issues des résultats des 2 campagnes POLLUTMAR ne sont donc pas concordantes.

Etant donné que les expérimentations POLLUTMAR 5 ont porté spécifiquement sur l'influence d'un hélicoptère sur un nuage gazeux, beaucoup plus d'essais ont été réalisés que pour les campagnes POLLUTMAR 4. De plus, les campagnes POLLUTMAR 5 ont testé l'influence de trois types d'hélicoptères : l'Alouette 3, le Lynx, le Super Frelon, alors que les campagnes POLLUTMAR 4 n'ont sollicité que le Super Frelon.

Etant les plus fiables, nous prendrons comme référence les conclusions des campagnes POLLUTMAR 5.

Au cours de ces campagnes, on a également constaté que la puissance de l'hélicoptère influençait la pénétration des gaz dans l'habitacle. En effet, plus un appareil est puissant, plus le brassage d'air au dessus de la nappe est important, en conséquence on obtient des concentrations également plus élevées dans l'habitacle.

### **3.4. Conclusions**

Les campagnes POLLUTMAR ont permis d'apporter des connaissances sur le comportement d'un nuage gazeux à la surface de la mer soumis à l'approche d'un hélicoptère. Ces données sont rares dans la littérature spécialisée.

Cependant, les résultats issus de ces expérimentations ne sont que sommairement décrits, et il a fallu effectuer un long travail d'interprétation.

Heureusement, Roger KANTIN, maintenant directeur de laboratoire IFREMER et ancien chef du service intervention du CEDRE, responsable des campagnes à l'époque, nous a permis de résoudre certains problèmes de compréhension.

Les résultats de ces expérimentations ainsi étudiés vont pouvoir être exploités et comparés avec les résultats issus des logiciels de modélisation utilisés par le CEDRE. Ceci permettra d'aboutir à des recommandations spécifiques quant à l'intervention aérienne sur des chimiquiers et gaziers en difficulté.

Néanmoins cette étude POLLUTMAR 5, ne prend pas en compte une dérive potentielle, due au courant, de la nappe de produits évaporants. En effet, la nappe d'épandage était fixe, (arrimée sur le pont du bateau), donc non soumise à l'influence du courant. Or la dispersion atmosphérique d'un nuage gazeux peut être orientée dans le sens opposé de l'étalement de la nappe. C'est un facteur important qu'il faudra intégrer lors de l'élaboration des consignes relatives à l'intervention sur de tels accidents.

## CHAPITRE III UTILISATION DE L'OUTIL DE MODELISATION CHEMMAP

Cette partie de l'étude a pour objectif de comparer les résultats des expérimentations POLLUTMAR, avec ceux d'une modélisation faite avec un logiciel actuel.

Pour ce faire, il est essentiel de faire un point sur la dispersion atmosphérique ainsi que sur la modélisation des pollutions accidentelles.

Ensuite l'application à un logiciel de modélisation sera présentée.

### 1. La dispersion atmosphérique

#### 1.1. Définitions

Le terme de dispersion atmosphérique caractérise le devenir dans le temps et l'espace d'une particule, ou d'un ensemble de particules émises dans des conditions données dans l'atmosphère.

Le transfert de la source de pollution vers l'atmosphère et la réponse générée est fonction de la dispersion atmosphérique :

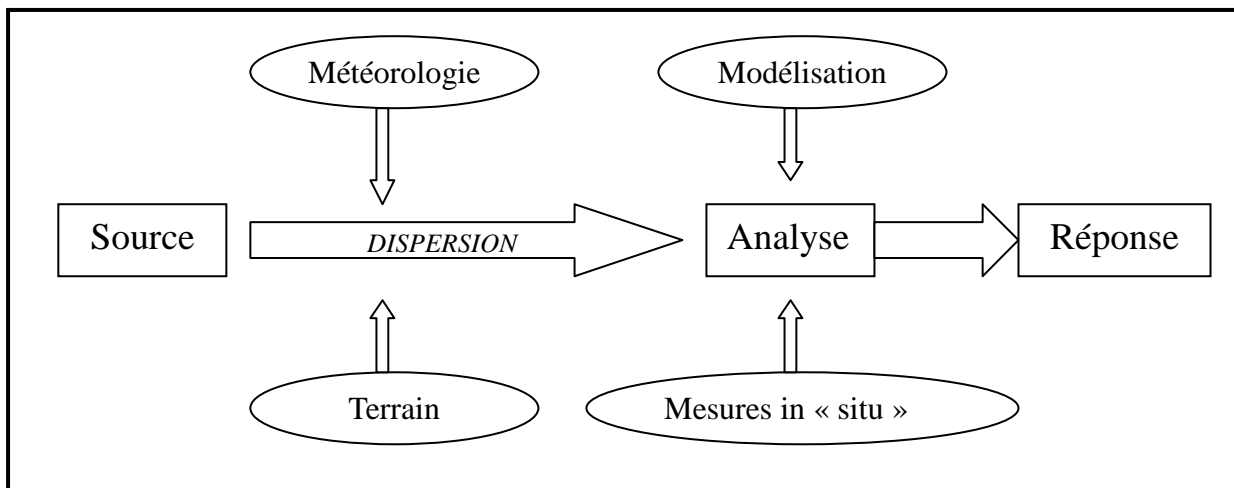


Figure 2 : Facteurs influençant la dispersion atmosphérique et la réponse de l'homme

#### 1.2. Objectif et éléments de l'étude

Comprendre le comportement d'un nuage de gaz lors d'une émission accidentelle a pour objectif d'évaluer les conséquences sanitaires si les populations sont menacées ou touchées par un nuage de gaz, de réagir de manière adéquate lors d'un accident (zones d'intervention, approche des équipes d'intervention...) et d'urbaniser avec raison les zones proches des sites à risques.

Pour atteindre ces objectifs, il y a plusieurs éléments à prendre en compte comme le terme source, la dispersion atmosphérique, la modélisation de la dispersion atmosphérique, l'évaluation des conséquences, les moyens de protection.

### 1.3. Types d'émissions

L'émission d'un produit à l'atmosphère peut revêtir deux origines :

- soit chronique, avec des émissions à l'atmosphère plus ou moins continues ou périodiques dans le temps. Les rejets sont les sous-produits indésirables de toute activité humaine, par exemple, les gaz d'échappement des voitures, les fumées d'usines, de chauffages urbains ou toute forme de pollution diffuse (émission de gaz issu d'une décharge...), la manutention de produits volatils (essences...)
- soit accidentel, un déversement de produits volatils conduisant à des émissions ponctuelles (souvent importantes) à l'atmosphère non désirées.

### 1.4. Paramètres

La prise en compte de plusieurs paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement d'un nuage de gaz.

#### 1.4.1. Nature du rejet

La dispersion s'applique à 2 types de gaz :

- **Gaz passif** : le polluant n'interagit pas avec le milieu porteur et subit, sans les influencer, les mouvements de l'air. Le gaz s'élève dans l'atmosphère et reste dans un milieu homogène.

- **Gaz non passif** : à leur sortie dans l'atmosphère, ces gaz possèdent une énergie cinétique et/ou une énergie potentielle significative qui interagit avec celle de l'écoulement atmosphérique ambiant et engendre un comportement et une dispersion spécifique.

Dans ces conditions le nuage de gaz reste au sol, s'il s'agit d'un gaz dense. (Ex : chlore, propane...)

Une fois dilué dans l'air, tous les gaz deviennent passifs.

Les paramètres d'émission comme la vitesse d'éjection, la température d'éjection, la hauteur de l'émission jouent un rôle prédominant dans la nature du rejet mais ces paramètres s'atténuent progressivement.

#### 1.4.2. Météorologie

Les conditions météorologiques sont importantes à partir du moment où les autres paramètres (vitesse du rejet, densité du gaz...) ont une influence plus faible sur le rejet.

Elles ont un rôle essentiel lorsque le nuage se comporte comme un nuage de gaz passif.

##### - *La turbulence*

Le mécanisme qui permet le déplacement vertical est la turbulence.

La turbulence est due :

- A des origines mécaniques engendrées par la vitesse du vent et la rugosité du sol sur lequel l'écoulement a lieu.
- A des origines thermiques liées à la stratification verticale de la température de l'atmosphère

La turbulence de l'atmosphère est un des paramètres qui affectent le plus la dilution d'un polluant.

Pour définir la turbulence, on utilise la stabilité atmosphérique. Elle représente la capacité de l'atmosphère à faciliter les déplacements verticaux d'air (et donc la dispersion d'un polluant).

Une classification de la stabilité atmosphérique peut être effectuée au moyen des classes de Pasquill, (1974) qui varient de A à F, de l'atmosphère la plus instable à la plus stable. Les classes de stabilité peuvent être associées à des conditions météorologiques données.

Vitesse du vent à 10 m [m/s]	JOUR			NUIT	
	Rayonnement solaire incident			Nébulosité	
	Fort	Modéré	Faible	entre 4/8 et 7/8	<3/8
<2	A	A-B	B	F	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Tableau 3 : Classes de stabilité de Pasquill

Doury, quant à lui, fait appel à seulement deux classes de stabilité :

- les conditions de Diffusion Normale (DN). Cette situation est celle existant le jour, ou la nuit avec des vitesses de vent supérieures à 3 m/s ;
- les conditions de Diffusion Faible (DF). Cette situation est celle existant la nuit avec des vitesses de vent inférieures à 3 m/s.

#### - Autres paramètres météorologiques

Le vent intervient dans la dispersion atmosphérique par son intensité et sa direction.

La température a une action sur l'élévation ou non du nuage.

Etant donné que l'air atmosphérique n'est pas un gaz simple (deux principaux constituants : air sec, vapeur), il faut prendre en compte l'état hygrométrique.

#### 1.4.3. Nature du terrain

La dispersion d'un nuage de gaz est influencée par l'occupation du sol, à la fois dans le champ proche avec la présence d'obstacles isolés (bâtiments industriels, lotissements...), mais aussi dans le champ lointain avec l'existence d'accidents topographiques (vallées, falaises, collines, buttes ...). Ces éléments perturbent le champ de vent de façon mécanique.

En conclusion, il existe plusieurs phases de dispersion selon la nature du rejet (jet gazeux, gaz lourd, gaz passif). De nombreux paramètres interviennent également dans le phénomène ; les conditions de rejet, les conditions météorologiques, la nature du sol sur lequel le nuage se déplace. Dans les faits, le nombre et la variation des facteurs font de la dispersion atmosphérique un processus complexe.

## 2. La modélisation des pollutions accidentelles

### 2.1. Introduction

Modéliser le comportement d'un hydrocarbure ou d'un produit chimique déversé accidentellement en mer, c'est prévoir son comportement et son devenir dans l'environnement. La modélisation mathématique permet de prévoir l'étendue et la durée des



risques : pollution de l'air, de l'eau, des sédiments. Les banques de données renseignent sur la nature des risques (toxicité pour l'homme, inflammabilité...). Les modèles prévisionnels permettent :

- de quantifier ces risques : étendue des dégâts liés à une déflagration, étendue d'une pollution dans l'eau (étalement pour une nappe d'hydrocarbure, dissolution dans la masse d'eau pour un produit soluble) ou dispersion d'un nuage toxique pour un produit gazeux.
- d'évaluer la durée des risques, et en particulier la prévision du temps nécessaire pour qu'un produit volatil s'évapore à la surface de l'eau, durée d'une pollution dans la masse d'eau, temps d'arrivée d'une nappe de pétrole à la côte.

Chaque modèle est adapté à ce que l'on veut prédire ; il peut aussi bien caractériser un panache d'eaux douces en mer ou le devenir d'un déversement accidentel en mer, dans un fleuve ou dans un sol par exemple. L'échelle de temps et d'espace ne sera donc pas la même suivant ce que l'on veut caractériser.

Les résultats de sortie d'un modèle sont évidemment fonction des besoins de l'utilisateur : recherche, prévention, opérations.

En outre, selon les besoins, il est possible de superposer au modèle proprement dit d'autres interfaces informatisées : cartographie, banque de données adaptées aux besoins de l'utilisateur, intégration du modèle dans un système d'information géographique (SIG).

Le CEDRE utilise des modèles, dits opérationnels, qui ont pour objectif principal d'apporter une réponse rapide permettant aux équipes d'intervention, par exemple, de savoir dans quelle direction porter leur effort pour avoir des chances de contrer ou de prévenir le risque maximum. C'est ainsi que ces outils privilégient la détermination des valeurs maximales envisageables (teneur en produit toxique, extension d'un nuage ou d'une nappe...) dans le contexte de l'accident (lieu, conditions atmosphériques, topographiques, hydrauliques, environnement...), quitte à simplifier les mécanismes physiques en jeu pour gagner en temps de calcul.

## **2.2. Les outils de modélisation utilisés par le CEDRE**

Les modèles utilisés par le CEDRE sont des outils d'aide à la décision en situation de pollutions accidentelles. Ces logiciels permettent de répondre aux questions suivantes :

- Quel sera le déplacement du polluant ?
- Comment le polluant va-t-il se comporter ?
- Quels sont les risques pour l'homme et l'environnement ?

Les fiches suivantes sont consacrées aux modèles les plus utilisées par le CEDRE. Ces fiches présentent des informations sur différents thèmes :

- Nom du développeur,
- Application,
- Mécanisme pris en compte, propriétés (banque de données, module hydrodynamique...),
- Type et forme des résultats fournis
- Avantages et limites, application à l'étude.

L'objectif est de déterminer quel est le modèle le plus adéquat pour mesurer les concentrations de toxique suite à un déversement en mer.

## ADIOS

### Développeur

National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) – USA (Page web: <http://www.noaa.gov>)

### Utilisateur reconnu

ADIOS est utilisé par US Coast Guard, les industries, les organisations environnementales...  
ADIOS est librement téléchargeable sur le site de la NOAA, ce qui en fait un outil de gestion de crise très répandu.

### Applications

Hydrocarbures.

### Mécanismes physicochimiques

Les mécanismes pris en compte sont : dispersion, évaporation, émulsification, propagation.

### Propriétés

Le logiciel ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spills) permet de prévoir le changement des caractéristiques d'une nappe d'hydrocarbures après un certain temps.

Les prévisions qu'il fait, présentées sous forme de graphique et de texte, sont conçues pour aider à répondre aux questions qui apparaissent pendant la période d'alerte ou de nettoyage et de préconiser les méthodes de lutte les plus adaptés.

ADIOS intègre une bibliothèque d'environ mille hydrocarbures.

### Résultats

Il présente le comportement d'un hydrocarbure pour une durée maximale de cinq jours. (Cf. Figure 3).

Il fournit les parts de produit dispersées dans la colonne d'eau, évaporées et restantes (figure 3a). Adios donne également les concentrations en benzène présentes dans l'atmosphère (cf figure 3b). Adios apprécie l'évolution de la viscosité et de la densité de l'hydrocarbure.

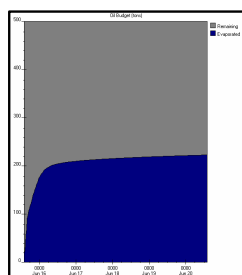


Figure 3.a

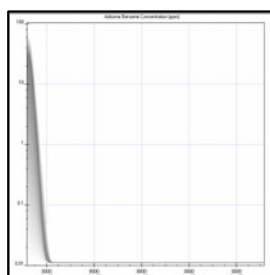


Figure 3.b

**Figure 3 :** L'interface suivante montre les résultats du modèle dans le cas d'un déversement de 500 tonnes de brut léger (Forties) en mer.

Figure 3.a : le graphique indique que la partie évaporée du brut représente 40% de la masse.

Figure 3.b : montre la présence de benzène dans l'atmosphère à une concentration maximale de 40 ppm immédiatement après le déversement.

### Avantages, limites, application à l'étude

Adios est simple d'utilisation et l'interprétation des résultats est aisée.

Ce logiciel est un modèle spécifique aux hydrocarbures, il n'est donc pas recevable pour notre étude qui s'intéresse aux produits chimiques essentiellement.

## ALOHA

### Développeur

U.S. Environmental Protection Agency – USA (Page web : <http://www.epa.gov/ceppo/cameo/aloha.htm>)

### Utilisateur reconnu

ALOHA est utilisé par : aux Etats-Unis par les pompiers, les organismes d'états de gestion de crise, les industries, les écoles, les organisations environnementales.

### Applications

Produits flottants, qui se dissolvent, qui s'évaporent.

### Mécanismes physicochimiques

Les mécanismes pris en compte sont : advection, diffusion, étalement, évaporation, dispersion

### Propriétés

Le logiciel ALOHA (Aerial Locations of Hazardous Atmospheres) est un modèle de dispersion aidant à évaluer le déplacement d'un nuage toxique. Sa base de données sur les substances chimiques contient des renseignements sur les propriétés chimiques d'environ 1000 produits parmi les plus susceptibles d'être impliqués dans des accidents chimiques.

Ce logiciel permet d'évaluer les conséquences d'un accident impliquant ces substances, compte tenu :

- des conditions météorologiques
- du type de fuite
- des propriétés physico-chimiques du produit déversé.

ALOHA estime la concentration du polluant jusqu'à des distances maximales de 10 kilomètres de la source du rejet et ce pendant une durée ne dépassant pas 60 minutes.

### Résultats

Il présente l'évolution du panache gazeux vue de dessus (Cf. Figure 6).

Il fournit les concentrations correspondant aux valeurs toxicologiques de référence (Ex : IDLH), d'inflammabilité, de surpression (nuage gazeux explosif) et permet de définir des zones de dangerosité.

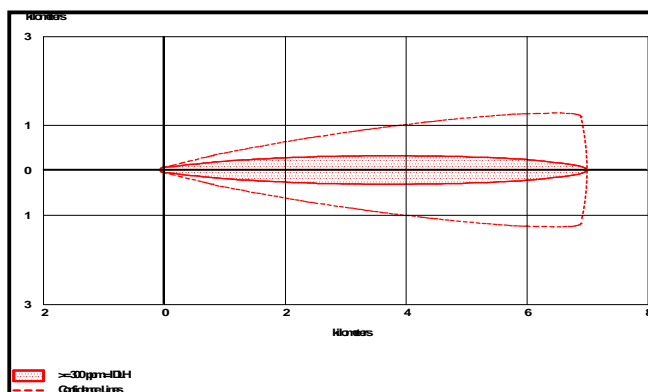


Figure 6 : L'interface suivante montre les résultats du modèle dans le cas d'un déversement d'ammoniac représentant une nappe de 10000 m<sup>2</sup> à la surface de l'eau.

Le graphique donne la concentration en ammoniac dans l'atmosphère.

### Avantages, limites, application à l'étude

Ce logiciel est simple d'utilisation et le temps de calcul est très rapide.

Ce modèle n'est pas adapté aux faibles vitesses de vent. Or les campagnes POLLUTMAR ont voulu s'inscrire dans ce cadre pour pouvoir simuler un nuage de gaz toxique dans les conditions les plus défavorables. En effet, la dispersion du nuage est plus faible dans des conditions de vent faible, les concentrations en toxique sont alors plus élevées. ALOHA ne permet pas d'intégrer des sauts de vent or, comme vu précédemment (III.3.3), le vent est très variable en mer. Ce logiciel donne une vue en deux dimensions (longueur et largeur du panache) mais ne donne pas de résultats sur la hauteur du panache.

## CHEMMAP

### Développeur

Applied Sciences Associate's (ASA) – USA (Page Web : [www.appsci.com](http://www.appsci.com))

### Utilisateur reconnu

CHEMMAP est utilisé par : US Coast Guard, Irish Coast Guard, Environnement Canada...

### Applications

Produits flottants, qui se dissolvent, qui coulent.

### Mécanismes physicochimiques

Les mécanismes pris en compte sont : advection, diffusion, étalement, évaporation, dissolution, dispersion, adsorption, sédimentation et biodégradation.

### Propriétés

CHEMMAP fonctionne avec un système d'information géographique (SIG) qui peut être appliqué sur l'ensemble du littoral mondial. Il comporte un modèle de calcul hydrodynamique 3D qui ne s'applique pas à l'océan mondial. Il tient compte du vent, des courants généraux, de marée et de houle.

Il est composé d'un module eulérien et d'un module Lagrangien.

CHEMMAP est relié à une base de données environnementale contenant les caractéristiques physiques (T°, pression, etc...) de l'eau à proximité des côtes. Il inclue également un modèle d'impact sur le monde biologique (poisson, mollusque, etc...).

Actuellement, CHEMMAP possède sa propre base de données produit. Elle répertorie les propriétés physiques et chimiques de 900 produits différents.

### Résultats

Il fournit des cartes de localisations et des graphiques présentant l'évolution de la concentration en polluant dans les différentes parties de l'environnement (colonne d'eau, surface, sédiments, atmosphère).

Les concentrations de produit sont affichées selon un dégradé de couleurs. (Cf Figure 5).

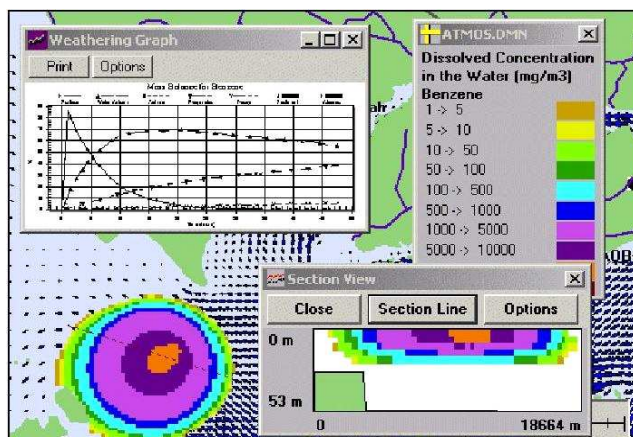


Figure 5 : Les interfaces suivantes montrent les résultats du modèle dans le cas d'un déversement de benzène (10000 tonnes) à la surface de l'eau. Le panache et la coupe permettent de présenter la concentration maximale de produit dans la colonne d'eau et dans l'atmosphère, dans les trois dimensions. Le graphique donne la concentration du benzène en fonction du temps dans les 4 parties de l'environnement.

### Avantages, limites, application à l'étude

Le modèle atmosphérique de CHEMMAP permet de visualiser le comportement dans l'atmosphère d'un polluant dans les trois dimensions. On peut également réaliser des coupes, ce qui permet de déterminer les concentrations en toxique à différentes altitudes. De plus, on peut intégrer beaucoup de paramètres météorologiques (vent, courants, bathymétrie...).

Le nombre important de paramètres qu'il est possible d'intégrer au logiciel augmente le risque d'erreur de manipulation.



## MOTHY

### Développeur

MétéoFrance (MF) - <http://www.meteofrance.com>

### Utilisateur reconnu

Le CEDRE, par une collaboration technique avec MF formalisée par une convention cadre signée en 1996.

Le Service météorologique bulgare dans le cadre d'une collaboration bilatérale avec MF. (MOTHY a été adapté à la mer Noire).

Utilisation au niveau international, dans le cadre du Système d'Intervention d'Urgence en cas de Pollution de la Mer (S.I.U.P.M.), coordonné par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

### Applications

Hydrocarbures, huiles végétales, conteneurs, objets flottants...

### Mécanismes d'action

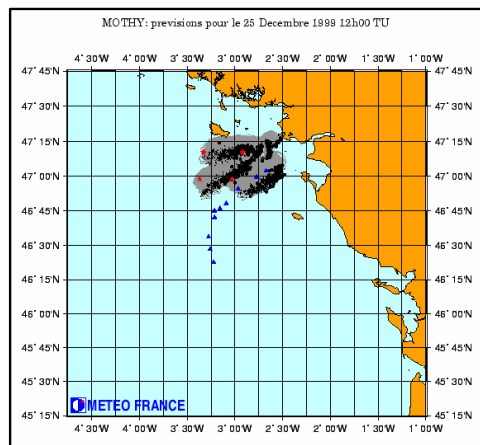
MOTHY est un modèle double, constitué d'un modèle d'océan, développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe. Son modèle physico-chimique prend en compte la densité.

### Propriétés

Le modèle Mothy permet au Cedre de disposer dans les plus brefs délais des prévisions météorologiques sur la zone touchée et des cartes de dérive de nappes d'hydrocarbures et de conteneurs.

### Résultats

Mothy fournit une carte localisant la dérive de l'hydrocarbures en fonction du temps (cf. figure 7). Il y a possibilité d'effectuer une dérive à rebours afin de localiser la source d'une pollution.



*Figure 7 : Accident de l'Erika*  
Prévisions du 25 décembre 1999 à partir de positions observées de nappes. Les trajectoires prévues sont indiquées, ainsi que les positions prévues des nappes.

### Avantages, limites, application à l'étude

Mothy prend en compte des courants de marées et des courants liés au vent, mais il manque l'intégration opérationnelle des courants grand échelle.

Le module physico-chimique ne dispose qu'un d'un seul paramètre : la densité.

Intégration de la description d'une nappe : le modèle inclut uniquement un point d'origine et ne peut pas faire dériver à partir d'une surface.

## PHAST

### Développeur

DNV Software - <http://www.dnv.com/software/>

### Utilisateur reconnu

Industries pétrochimiques et chimiques, des autorités gouvernementales, des bureaux d'études, des universités, des assurances.

### Applications

Produits chimiques

### Mécanismes d'action

Fuites et écoulements de produits, dispersion, évaporation, incendie, explosions.....

### Propriétés

Evaluation du risque d'accident industriel majeur

### Résultats

PHAST examine la progression d'un incident potentiel, de la fuite initiale à la dispersion en champ lointain, incluant la modélisation de l'épandage et de l'évaporation des flaques, ainsi que les effets inflammables et toxiques. Les résultats de l'analyse peuvent être affichés en format graphique ou sous forme de tableaux. L'ampleur de l'impact est visionné, et l'effet de la fuite sur la population et l'environnement évalué.

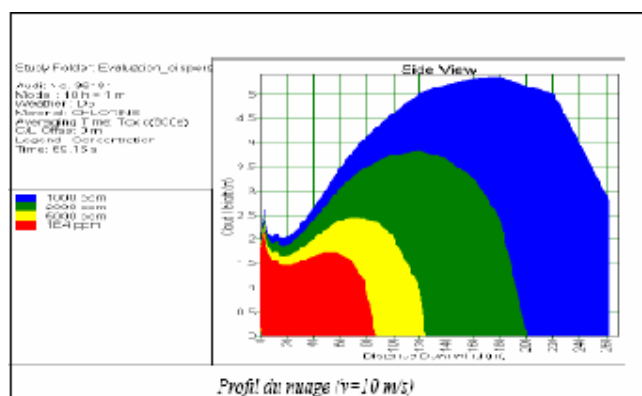


Figure 8 : Cette figure représente une interface de sortie du logiciel. Le profil d'un nuage gazeux de chlore issu d'un rejet continu est représenté. Le logiciel renseigne sur les concentrations atmosphériques en fonction de l'altitude et dos au vent.

### Avantages, limites, application à l'étude

PHAST est un logiciel de modélisation performant qui prend en compte l'ensemble des paramètres de l'étude. Cependant bien que PHAST prend en compte les conditions météorologiques, elles restent invariables tout le temps de l'émission et de la dispersion.

L'inconvénient majeur réside à son coût de revient important. Son investissement par le CEDRE n'est pas pertinent car le service intervention n'a pas utilisé de toutes les fonctionnalités de ce logiciel.

### 2.3. Choix du logiciel

Le choix du logiciel de modélisation pour la réalisation de l'étude s'est tout d'abord porté sur sa fonction première. MOTHY est un modèle de dérive pour les hydrocarbures et les colis perdus en mer. ADIOS, quant à lui, modélise le vieillissement des hydrocarbures. L'étude prend en compte le comportement d'un nuage gazeux suite à un déversement d'un produit chimique en mer. De part leur fonction première, les modèles ADIOS et MOTHY, n'ont pas été retenus. Par contre, CHEMMAP et ALOHA sont susceptibles d'être de bons outils pour notre étude. ALOHA ne permet pas d'évaluer l'évolution verticale du nuage gazeux, or ce point est essentiel pour émettre un avis sur la hauteur de positionnement d'un hélicoptère pour un hélitreuillage, par exemple.

A la base, CHEMMAP n'est pas un modèle spécifiquement atmosphérique. Le rendu d'une simulation n'est donc d'une extrême précision pour notre étude. Malgré tout, les résultats obtenus donnent une idée du comportement du nuage toxique dans les 3 dimensions et devraient pouvoir être comparés aux résultats des campagnes POLLUTMAR. Ces résultats pourraient également permettre d'établir des recommandations pour l'intervention en mer.

En conclusion, le modèle de simulation le plus adapté pour reprendre les résultats des campagnes POLLUTMAR est le logiciel CHEMMAP. En effet, la possibilité d'intégrer de nombreuses données environnementales rend les résultats plus proches de la réalité.

Cependant un besoin de l'étude concerne l'influence des turbulences d'un hélicoptère en vol stationnaire sur le comportement du nuage toxique.

Ce facteur, est à l'heure actuelle difficilement modélisable. Il faudra donc, jouer avec les différents paramètres que proposent CHEMMAP pour pouvoir simuler les effets de cet élément.



### **3. Vérifications des résultats expérimentaux sur le comportement du nuage toxique en mer**

#### **3.1. Objectifs**

Cette partie de l'étude permet donc de confronter les résultats expérimentaux issues de la campagne POLLUTMAR 5 aux valeurs trouvées, au moyen de la modélisation.

L'interprétation de cette confrontation permettra de valider ou non les conclusions des campagnes expérimentales.

Cette confrontation a pour objectif de vérifier particulièrement les valeurs physiques permettant de déterminer :

- l'extension **verticale** d'un nuage gazeux en cas de déversement accidentel en mer.
- L'influence d'un hélicoptère sur le comportement du nuage.

L'utilisation des données toxicologiques n'entrent donc pas en jeu pour cette partie de l'étude. L'étude de l'exposition des intervenants fera l'objet de la deuxième partie de l'étude.

#### **3.2. Méthodologie**

##### **3.2.1. Choix du modèle**

L'objectif est de visualiser le comportement d'un nuage gazeux à la surface de la mer suite à un déversement de produit chimique évaporant en mer. Un intérêt particulier vise à étudier le développement vertical de nuage et l'influence que pourrait avoir un hélicoptère en vol stationnaire au dessus de la nappe de produit chimique.

Le cadre de l'étude ne nécessite donc pas de visualiser le comportement du produit chimique dans la colonne d'eau et au niveau des sédiments.

Par conséquent il n'est pas nécessaire d'intégrer dans le logiciel les données bathymétriques.

De la même manière, il n'est pas indispensable de visualiser la dérive de la nappe, on s'intéresse essentiellement à l'élévation du nuage gazeux, les données liées aux courants ne sont donc pas utiles pour cette étude.

Le logiciel CHEMMAP permet de choisir entre deux modèles pour la simulation :

- un modèle complet présentant l'évolution de la concentration en polluant dans la colonne d'eau et dans l'atmosphère.
- Un modèle atmosphérique qui présente uniquement l'évolution de la concentration en polluant dans l'atmosphère.

Cette dernière option ne prend pas en compte l'influence des courants et de la bathymétrie.

Lors de cette étude nous utiliserons uniquement le modèle atmosphérique de CHEMMAP. Cette option a l'avantage de réduire les éléments à intégrer au logiciel qui sont inutiles à l'étude, ce qui rend les calculs plus rapides.

##### **3.2.2. Choix des conditions**

Lors des expérimentations en mer, les produits chimiques qui ont servi de base à l'élaboration des scénarios sont au nombre de 20. Nous avons effectué une sélection des produits que l'on modélisera dans CHEMMAP afin qu'il concordent avec ceux retenus dans le projet GALERNE.

La sélection s'est basée sur des éléments étudiés dans le projet GALERNE:

- L'analyse du trafic maritime qui avait pour objectif de sélectionner les produits chimiques régulièrement transportés et donc, en terme de probabilité, produits les plus susceptibles d'être déversés en cas d'accident;
- L'analyse de l'accidentologie afin d'identifier les substances qui ont été le plus souvent déversées;
- Leur comportement une fois déversé dans l'environnement marin.

Les substances retenues pour l'étude de comparaison entre les campagnes POLLUTMAR et les simulations avec le logiciel CHEMMAP sont :

- Ammoniac (substance gazeuse qui se dissout)
- Benzène (substance liquide évaporante)
- Butane (gaz)
- Styrène (flottant, évaporant)

De même, les scénarios élaborés à l'issue des campagnes expérimentales mettent en jeu trois surfaces : des nappes de produits chimiques de 100 m<sup>2</sup>, 1000 m<sup>2</sup>, 10 000m<sup>2</sup>.

Etant donné que les simulations établies à partir d'une nappe de 100 m<sup>2</sup> ne sont pas significatives (concentrations dans l'atmosphère très faibles), on retiendra seulement les nappes de produits chimiques de 1000 m<sup>2</sup> et 10 000m<sup>2</sup>.

### 3.2.3. Eléments des scénarios

Le logiciel CHEMMAP requiert peu de données d'entrées dans sa version atmosphérique, ces données sont toutefois primordiales afin d'obtenir une modélisation réaliste.

#### - Localisation du site

Les expérimentations POLLUTMAR 5 se sont déroulées les 1, 2, 3 juin 1992 sur la base aéronavale de Fréjus.

Le logiciel CHEMMAP intègre une carte de la France où l'on précise le lieu de déversement du produit.

Il n'est pas nécessaire de retrouver la localisation exacte du site de déversement de la campagne POLLUTMAR 5 étant donné que les données bathymétriques et de courant n'entrent pas en compte dans la modélisation. Cependant, il est plus simple de prendre pour référence un point de rejet qui sera le même pour tous les produits chimiques scénarisés.

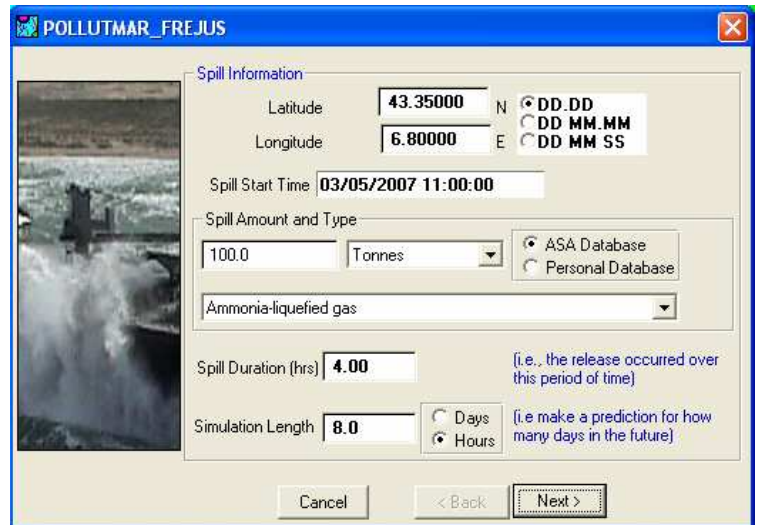


Figure 9 : Site des essais en mer POLLUTMAR  
Site de référence pour les simulations

- *Informations sur le rejet*

On entre ici différentes données :

- Lieu, date et heure du rejet ;
- Quantité du déversement et sélection du toxique dans une base de données incluse dans le logiciel.
- Durée du rejet.
- Durée de la simulation.

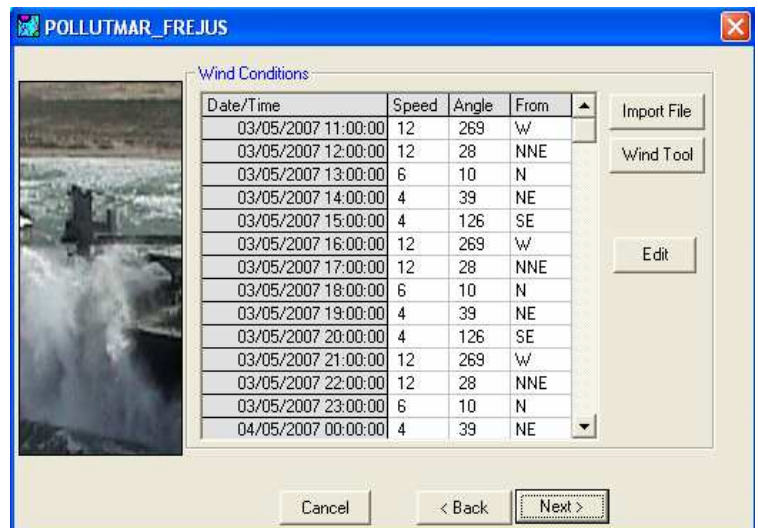


- *Conditions de vent*

- Intégration de la vitesse et de l'orientation du vent.

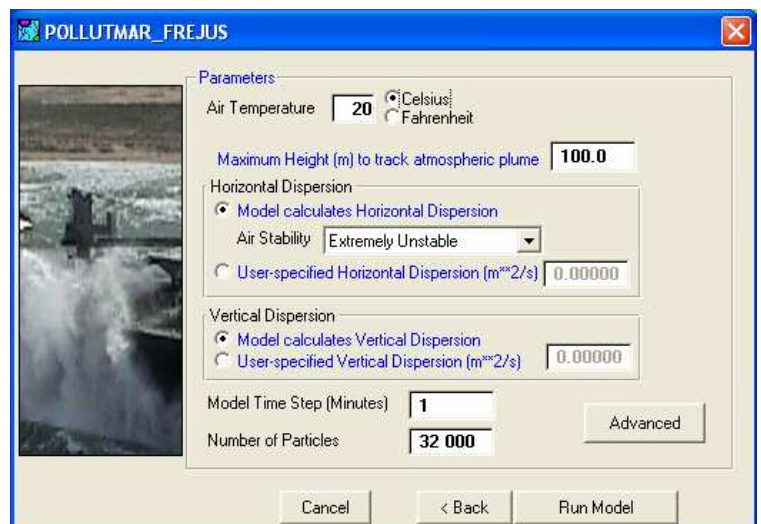
Dans le logiciel, il y a possibilité d'entrer des données de vent différentes pour chaque heure. Or l'étude des conditions météorologiques des expérimentations POLLUTMAR a montré une variabilité très rapide de la direction du vent.

On ne peut donc pas retranscrire dans le logiciel cette variation car le nuage gazeux subirait un vent pendant une heure dans la simulation alors qu'en réalité il n'aurait subi ce vent que pendant 15 minutes. Nous avons donc choisi d'appliquer à tous les scénarios un vent faible (2m/s) afin de se placer dans les conditions les plus défavorables. En effet les turbulences seront moins fortes, le nuage sera d'autant plus concentré.



- *Paramètres météorologiques*

- Température de l'air ;
- Hauteur de suivi des particules : c'est l'altitude maximale à laquelle le modèle peut « suivre » les particules.
- Stabilité atmosphérique : on peut choisir entre 5 classes de stabilité.
- Précision du modèle : enfin, on entre le pas de temps du modèle ainsi que la précision du résultat interprétée par le nombre de particules modélisées.



### 3.2.4. Définition de la méthode

- *Etude des résultats issus des campagnes POLLUTMAR 5 :*

Comme vu précédemment, les campagnes POLLUTMAR ont consisté à mesurer des CTA (Coefficient de Transfert Atmosphérique) à partir d'une nappe d'épandage de SF<sub>6</sub> (gaz traceur). Ces essais ont été réalisés avec et sans présence d'un hélicoptère en vol stationnaire au dessus de la nappe.

Les mesures décrivant le développement vertical d'un nuage gazeux sont présentés par des CTA à différentes altitudes. Afin de rendre exploitables ces données, une conversion des valeurs en concentrations a été nécessaire. La figure ci dessous montrent les concentrations pour les produits que nous avons sélectionnés pour une nappe de 1000m<sup>2</sup>. Ces valeurs ont été déterminées à partir des mesures effectuées pendant la durée des essais à différents points de la source. Elles déterminent les concentrations atmosphériques maximales qui ont été atteintes.

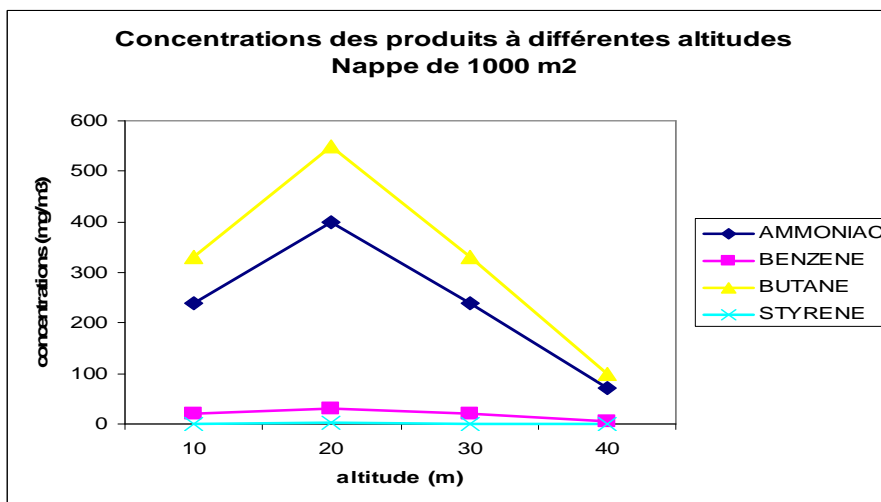


Figure 10 : Comparaison des concentrations maximales atteintes en fonction de l'altitude pour 4 produits testés lors des campagnes POLLUTMAR 5

La figure 10 nous montre que l'ammoniac et le butane sont présents dans l'atmosphère à plus fortes concentrations que les deux autres produits. Ceci peut se démontrer en comparant les tensions de vapeur (facteur qui détermine la nature évaporante de la substance) de chacun des produits. On s'aperçoit ainsi que ces deux substances sont celles qui sont les plus évaporantes. D'autre part, ce graphe confirme le fait, qu'en mer, la distribution verticale d'un nuage gazeux n'est pas homogène. Ainsi, à 20m d'altitude on obtient un pic de concentrations pour tous les produits considérés.

De la même manière, voici les concentrations obtenues en présence d'un hélicoptère survolant une nappe de 1000m<sup>2</sup>:

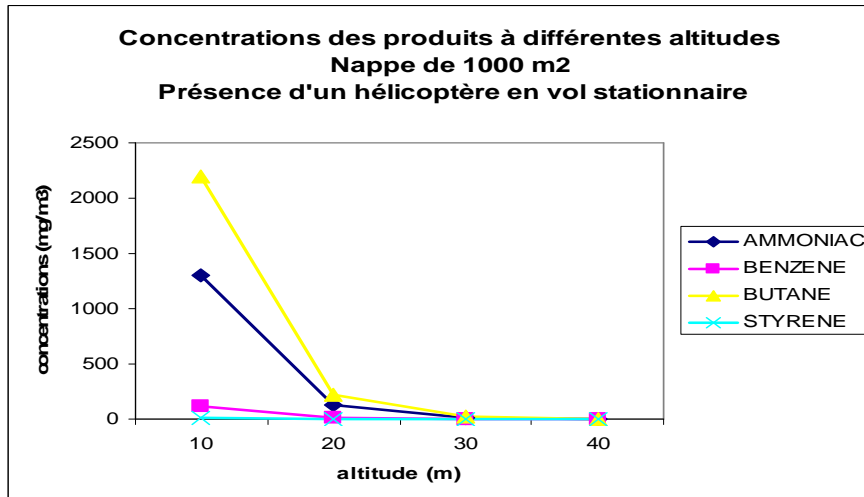


Figure 11 : Comparaison des concentrations maximales atteintes pour une nappe de produit survolé par un hélicoptère – campagnes POLLUTMAR 5

La figure 11 montre que les plus fortes concentrations se situent à l'altitude de 10 mètres. Ceci démontre l'influence du flux d'air descendant généré par les pales de l'hélicoptère qui font maintenir les volumes de toxique à basse altitude.

Ces constats sont les même s'il l'on prend en compte une nappe de produit chimique de 10 000 m2. Il est des lors intéressant de créer des scénarios, sur le logiciel, similaires à ceux élaborés lors des campagnes POLLUTMAR afin d'observer ou non les même constats.

- La modélisation sur le logiciel CHEMMAP

Après avoir entré les paramètres nécessaires à la modélisation des scénarios, le logiciel donne une représentation du panache gazeux vue de dessus. Les concentrations sont déterminées au moyen d'un dégradé de couleurs descriptible d'après une légende :

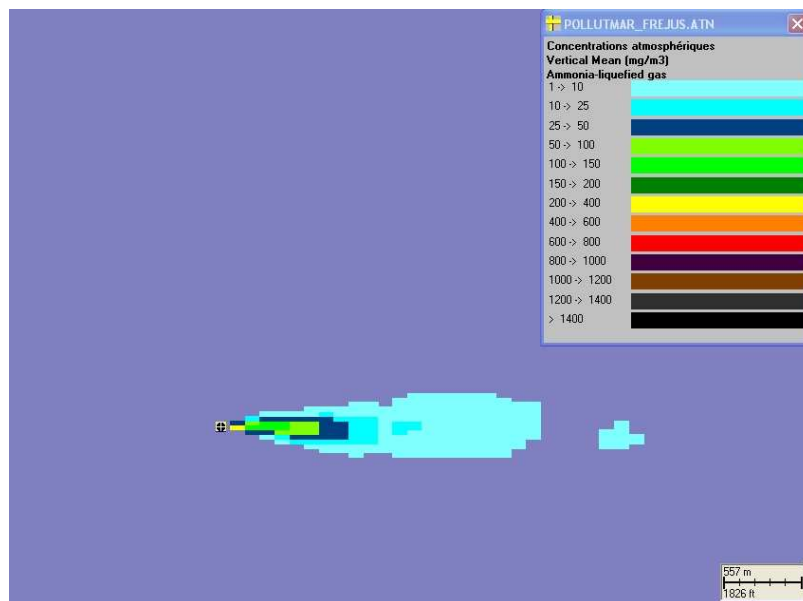


Figure 12 : Nuage d'ammoniac produit à partir d'un déversement représentant 10 000 m2 de surface avec un vent de 2 m/s.

L'interprétation de ces résultats en fonction de plusieurs éléments:

- Choix de l'échelle de concentrations

Selon la nature du produit et la surface de la nappe, on obtient des nuages plus ou moins concentrés en toxique. Etant donné que la détermination de ces concentrations se fait à partir de la lecture de l'échelle de concentrations, il est important de choisir une échelle adéquate. L'échelle choisie doit permettre de couvrir la totalité des concentrations susceptibles d'être obtenues, car si une plage de concentration n'est pas précisée dans l'échelle elle n'est pas visible sur le panache obtenu. L'échelle doit également permettre une lecture assez précise des concentrations.

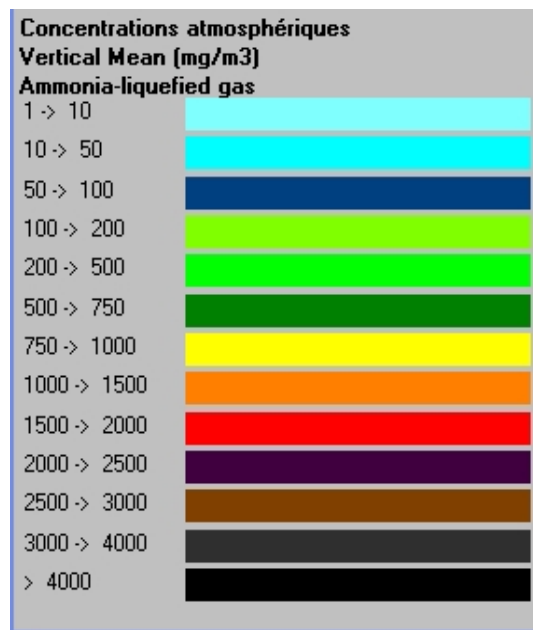


Figure 13.a : Echelle utilisée pour la lecture des concentrations d'un panache d'ammoniac.

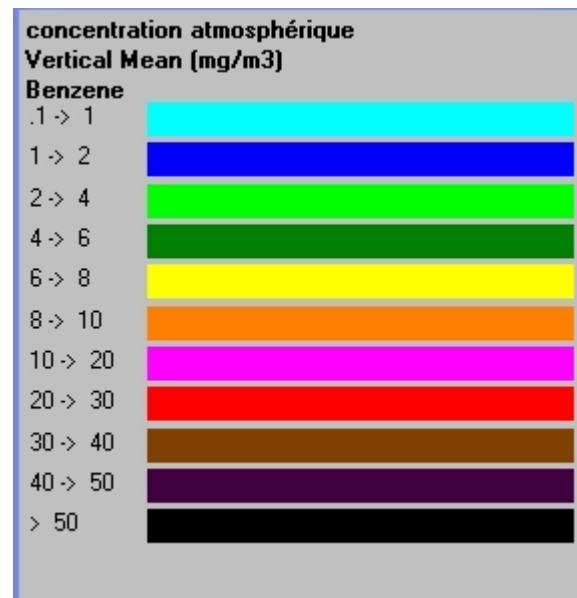


Figure 13.b : Echelle utilisée pour la lecture des concentrations d'un panache de benzène.

Dans ces deux exemples, on constate que les propriétés physiques des produits influent sur le choix de l'échelle. En effet, on obtient un nuage d'ammoniac avec des teneurs plus élevées que le benzène (l'ammoniac ayant une tension de vapeur supérieure à celle du benzène). L'unité de mesure prise en compte est le « mg/m<sup>3</sup> » afin de faciliter les comparaisons avec les résultats des campagnes POLLUTMAR qui sont présentés avec cette unité.

- Simulation de l'influence d'un hélicoptère

Afin de recréer, sur le logiciel, les turbulences générées par les pales d'un hélicoptère en vol stationnaire au dessus d'une nappe de produit, on considère une atmosphère très instable. En effet une forte instabilité atmosphérique est signe de fortes turbulences qui peuvent se rapprocher de celles générées par un hélicoptère. De ce fait, pour chaque scénario intégrant les produits et surfaces de nappes retenus, les influences de deux types de stabilité atmosphérique sur le comportement du nuage gazeux ont été comparées :

- Atmosphère neutre : représentant les classes « C » et « D » dans le modèle de Pasquill.
- Atmosphère très instable : représentant la classe de stabilité « A » dans le modèle de Pasquill

- *Lecture des concentrations*

La détermination de la distribution verticale des concentrations se fait en créant des coupes verticales du nuage gazeux :

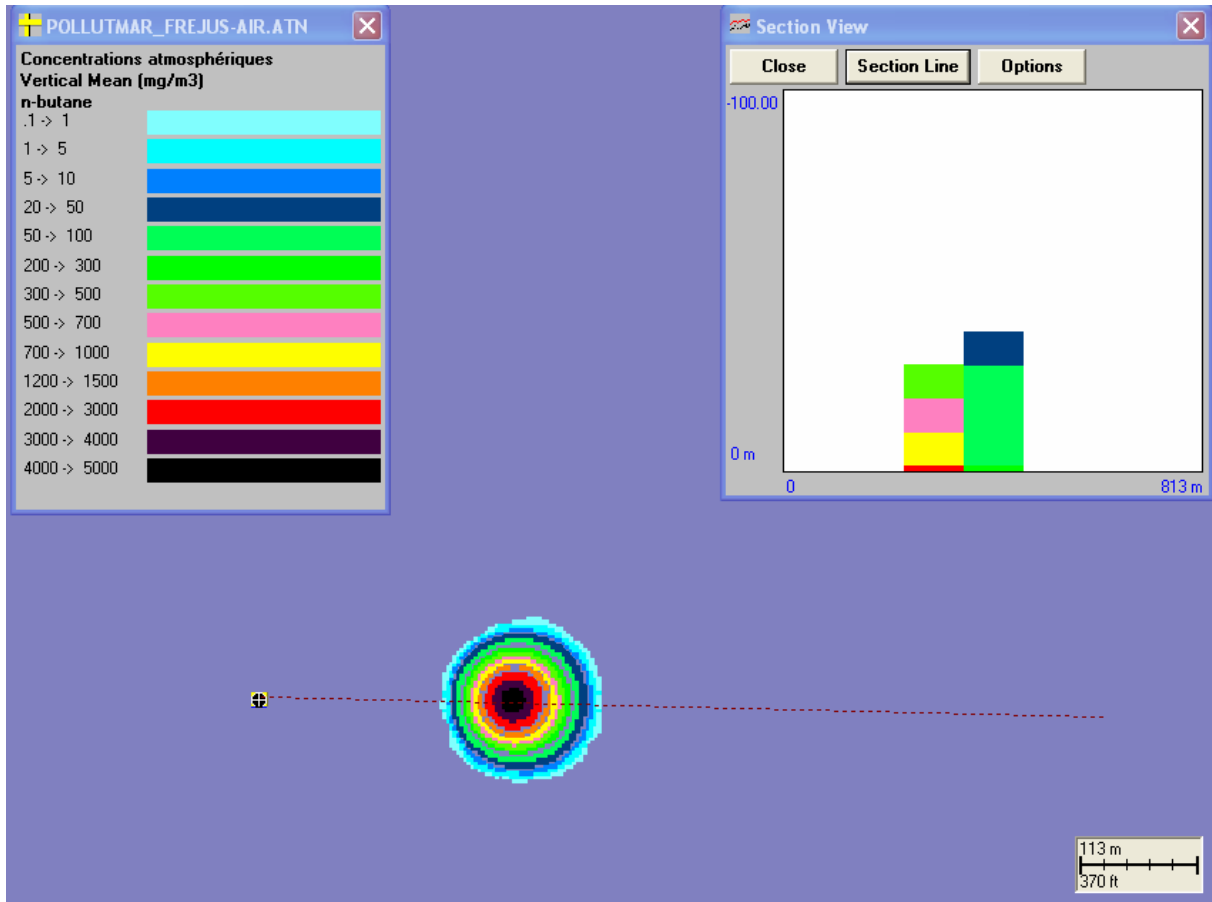


Figure 14 : Visualisation horizontale et verticale des concentrations d'un nuage de butane

Les concentrations ne sont pas les mêmes en fonction du temps. Pour déterminer celles qui seront comparées aux valeurs des expérimentations, on retient seulement les concentrations maximales à chaque altitude. De cette façon, on se place dans les conditions les plus défavorables, ce qui permet d'obtenir la marge de sécurité la plus grande.

### 3.3. Résultats et discussion

Les résultats des quatre produits modélisés dans le logiciel ont été comparés aux résultats des essais en mer.

Les valeurs comparées ont été établies à partir des éléments suivants :

- nappe de 1000 m<sup>2</sup>
- nappe de 10 000 m<sup>2</sup>
- nappe de 1000 m<sup>2</sup>, survolée par un hélicoptère
- nappe de 10 000 m<sup>2</sup>, survolée par un hélicoptère



Cette comparaison est présentée dans les tableaux suivants pour les deux produits qui donnent les résultats les plus représentatifs des observations générales: l'Ammoniac et le Styrène. (L'ensemble des résultats obtenus est représenté sous forme de graphique en [annexe 4](#))

- Ammoniac

Altitude (m)	Concentrations maximales (mg/m3)			
	Nappe 1000 m2		Nappe 10 000m2	
	CHEMMAP	POLLUTMAR 5	CHEMMAP	POLLUTMAR 5
10	1500	240	8000	2400
20	1000	400	5000	4000
30	750	240	4000	2400
40	500	70	2500	710

Tableau 4.a : Concentrations atmosphériques maximales d'un nuage gazeux d'ammoniac. Valeurs du logiciel CHEMMAP et des essais en mer POLLUTMAR 5

Le tableau 4.a montre, quelque soit la surface de la nappe, que les valeurs calculées par le modèle sont nettement supérieures à celle des essais en mer. (Dans le tableau, les valeurs surlignées en jaune sont les plus grandes). On observe également que les concentrations en ammoniac issues du modèle sont fonction de l'altitude. En effet, plus l'altitude est basse, plus les concentrations sont élevées. Ceci n'est pas le cas pour les expérimentations POLLUTMAR 5 qui avaient mis en évidence des « bulles » de fortes concentrations à 20 m d'altitude.

Altitude (m)	Concentrations maximales (mg/m3)			
	Nappe 1000 m2		Nappe 10 000m2	
	CHEMMAP	POLLUTMAR 5	CHEMMAP	POLLUTMAR 5
10	300	1300	10000	15000
20	300	130	10000	1600
30	300	13	3000	160
40	300	0	3000	0

Tableau 4.b : Concentrations atmosphériques maximales d'un nuage gazeux d'ammoniac soumis aux turbulences d'un hélicoptère. Valeurs du logiciel CHEMMAP et des essais en mer POLLUTMAR 5

Le tableau 4.b montre l'influence des turbulences d'un hélicoptère sur l'évolution des concentrations maximales en ammoniac dans l'atmosphère. Tout d'abord on constate pour des nappes de 1000m2 et 10 000m2, que les plus fortes concentrations, à 10m d'altitude, ont été enregistrées lors des essais en mer POLLUTMAR 5. En effet les courants descendants générés par l'hélicoptère au dessus de la nappe concentrent le polluant à basse altitude, d'où de fortes concentrations. Ce constat n'est pas représenté dans CHEMMAP. On observe que les concentrations maximales en ammoniac sont constantes quelque soit l'altitude pour une nappe de 1000m2 d'ammoniac.



- *Styrène*

Altitude (m)	Concentrations maximales (mg/m <sup>3</sup> )			
	Nappe 1000 m <sup>2</sup>		Nappe 10 000m <sup>2</sup>	
	CHEMMAP	POLLUTMAR 5	CHEMMAP	POLLUTMAR 5
10	20	1	75	15
20	50	2	150	25
30	20	1	75	15
40	10	0	10	4

Tableau 5.a : Concentrations atmosphériques maximales d'un nuage gazeux de styrène. Valeurs du logiciel CHEMMAP et des essais en mer POLLUTMAR 5

Le tableau 5.a montre tout d'abord, que les concentrations maximales en styrène déterminées par CHEMMAP sont beaucoup plus élevées que celles des essais en mer, et ce, quelle que soit l'altitude et la surface de la nappe. On remarque aussi dans ce tableau que le nuage de styrène a le même comportement au vu des résultats du modèle et des expérimentations. En effet, pour les résultats issus de POLLUTMAR 5 et CHEMMAP, on observe les plus fortes concentrations à 20 m d'altitude.

Altitude (m)	Concentrations maximales (mg/m <sup>3</sup> )			
	Nappe 1000 m <sup>2</sup>		Nappe 10 000m <sup>2</sup>	
	CHEMMAP	POLLUTMAR 5	CHEMMAP	POLLUTMAR 5
10	100	10	100	100
20	75	1	125	10
30	25	0	25	1
40	25	0	20	0

Tableau 5.b : Concentrations atmosphériques maximales d'un nuage gazeux de styrène soumis aux turbulences d'un hélicoptère. Valeurs du logiciel CHEMMAP et des essais en mer POLLUTMAR 5

Le tableau 5.b montre l'influence des turbulences d'un hélicoptère sur l'évolution des concentrations maximales en styrène dans l'atmosphère.

Pour une nappe de 1000m<sup>2</sup> de styrène, le logiciel CHEMMAP fait état de concentrations maximales en styrène nettement supérieures à celle des expérimentations POLLUTMAR 5. Lors de ces essais en mer, les relevés des mesures n'avaient pas démontré la présence de styrène au delà de 20m d'altitude. En comparaison, CHEMMAP donne des concentrations maximales en styrène représentant 25 mg/m<sup>3</sup> jusqu'à 40 m d'altitude.

Pour une nappe de 10 000 m<sup>2</sup>, les valeurs trouvées par le logiciel se rapprochent des valeurs des expérimentations. Concernant les résultats de CHEMMAP, on note que l'augmentation de la surface de la nappe n'a pas fait augmenter les concentrations de styrène qui reste sensiblement identiques aux concentrations du scénario intégrant une nappe de 1000 m<sup>2</sup>.

- *Discussion*

Les observations de ces résultats montrent donc deux principales incohérences :

- Le logiciel CHEMMAP dans son ensemble est fortement majorant pour ces conditions de simulation.
- La simulation des turbulences générées par l'hélicoptère dans le logiciel ne confirme la réalité. L'instabilité atmosphérique (choisie pour remplacer les turbulences de l'hélicoptère) homogénéise et disperse le panache alors que l'effet constaté sur le terrain est un courant descendant qui concentre le nuage gazeux à basse altitude.

La faible fiabilité de ces résultats peut être expliquée par le grand nombre d'approximations effectuées lors de :

- La lecture des graphes POLLUTMAR : Ces expérimentations étant anciennes, les seules traces des valeurs de concentrations sont présentées sous forme de graphes avec une échelle logarithmique qui n'est pas graduée. La lecture est donc peu précise, et peut ne pas refléter la réelle valeur.
- La lecture des coupes dans CHEMMAP : les coupes du nuage utilisées pour déterminer les concentrations dans l'atmosphère sont également peu précises de part :

- L'échelle représentant l'altitude qui ne permet de considérer une concentration à une altitude donnée mais seulement une approximation car l'échelle n'est pas échelonnée.
- L'échelle des concentrations qui ne donne qu'un écart de valeurs.
- la sélection des concentrations maximales qui s'est faite en choisissant les valeurs les plus grandes parmi celles données à chaque pas de temps du logiciel.

Au vu de ces résultats peu cohérents et de plusieurs problèmes d'ordre technique concernant le logiciel, nous avons pris contact avec le conseiller technique de la société ASA qui commercialise CHEMMAP. Il est sorti de cet entretien que le modèle atmosphérique du logiciel utilisé dans sa version seule est très peu fiable. Il est donc nécessaire de reprendre les scénarios de validations des essais en mer sur la base du modèle complet de CHEMMAP. (Modèle atmosphérique + modèle hydrodynamique)

En conclusion, les modélisations sur le logiciel CHEMMAP ne permettent pas de vérifier les observations issues des campagnes en mer POLLUTMAR. De même, la simulation des turbulences générées par un hélicoptère en changeant de classe de stabilité atmosphérique n'est pas fidèle à la réalité.

Cependant CHEMMAP a l'avantage de majorer les résultats, cela donne une marge de sécurité qui est préférable pour la prise de décision.

## **CHAPITRE IV APPLICATION : MODELISATION DES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT MARITIME METTANT EN CAUSE DU BENZENE**

---

Les simulations sur le logiciel CHEMMAP se sont jusqu'à présent focalisées sur l'étude du comportement physique du nuage gazeux. Ce chapitre, complémentaire au précédent, a pour objectif l'étude d'un scénario d'accident maritime impliquant une substance dangereuse évaporante, le benzène, afin d'évaluer le risque auquel est exposé le personnel intervenant.

### **1. Ce qu'il faut savoir sur le benzène.**

#### **1.1. Définition**

Le benzène est un liquide incolore, facilement inflammable (point d'éclair :  $-11,1^{\circ}\text{C}$ ) qui brûle en produisant des vapeurs toxiques d'oxyde de carbone. C'est un produit volatil (pression de vapeur : 10 kPa à  $20^{\circ}\text{C}$ ) dont le point d'ébullition est de  $80,1^{\circ}\text{C}$ . Ses vapeurs peuvent exploser.

#### **1.2. Utilisations**

Le benzène est principalement utilisé pour produire de l'éthylbenzène servant à la synthèse du styrène destiné à la fabrication de matières plastiques et d'élastomères. Il est également utilisé pour produire :

- du cumène destiné à la fabrication du phénol servant à produire des résines phénoliques et du nylon ;
- de l'acétone employée comme solvant ou utilisé dans l'industrie pharmaceutique ;
- du cyclohexane destiné à la fabrication de résines ;
- du nitrobenzène servant à fabriquer l'aniline ;
- de l'anhydride maléique ;
- des chlorobenzènes.

Comme sous produit du pétrole, le benzène entre naturellement dans la composition de l'essence automobile.

#### **1.3. Risques**

##### **1.3.1. Toxicité**

Le benzène est cancérigène pour l'homme. Il est aussi toxique quelle que soit la voie d'absorption. Il est irritant pour les yeux et les voies respiratoires. En cas de fortes concentrations, les vapeurs de benzène ont une action anesthésiante et peuvent avoir des effets sur le système nerveux central. Le personnel intervenant lors des opérations de secours sont susceptibles d'être exposés au benzène sur de courtes durées, on s'intéresse plus particulièrement aux effets toxicologiques aigus.

Le benzène peut avoir des conséquences sur la santé en fonction des concentrations auxquelles sont exposés les intervenants et les voies de pénétration dans l'organisme :

- Par inhalation :

<b>Concentrations dans l'atmosphère (ppm)</b>	<b>Effets observés</b>
25 ppm	Pas d'effet
50 à 100 ppm	Céphalées et asthénie
500 ppm	Symptômes plus accentués
3000 ppm	Tolérance pendant 30 à 60 minutes
20 000 ppm	Mort en 5 à 15 minutes

Figure 15 : Effets du benzène, inhalé, sur l'organisme

- Par contact cutané : le benzène peut être absorbé par la peau et provoquer des irritations.
- Par ingestion : douleurs abdominales, maux de gorge, vomissements, troubles digestifs, troubles neurologiques (pouvant aller jusqu'au coma), pneumopathie, convulsions, vertiges, somnolence, maux de tête, essoufflement, perte de conscience.
- Par contact oculaire : sensation de brûlure modérée, mais provoque seulement des lésions peu importantes et transitoires de cellules épithéliales.

### 1.3.2. Incendie

Le chauffage d'une cuve de benzène pourrait provoquer une augmentation de pression avec risque d'éclatement et possibilité d'explosion.

D'autre part, les risques liés à l'inflammation sont susceptibles de s'accroître (boule de feu). Le benzène peut former des mélanges explosifs avec l'air :

La limite inférieure d'explosivité (LIE) = 1.2% dans l'air soit 12 000 ppm

La limite supérieure d'explosivité (LES) = 8% dans l'air soit 80 000 ppm

Les vapeurs sont invisibles et plus lourdes que l'air.

### 1.4. Comportement du benzène lors d'un déversement en milieu aquatique

- Lors d'un déversement de benzène en mer, celui-ci se présente sous forme de nappes incolores à la surface de l'eau. Compte tenu de sa faible solubilité, de sa densité inférieure à celle de l'eau et d'une tension de vapeur élevée, le produit reste en surface et s'évapore dans l'atmosphère.

- Les vapeurs de benzène sont plus lourdes que l'air dans une atmosphère stable. Le nuage aura donc tendance à rester à la surface de l'eau les premières minutes après le déversement.

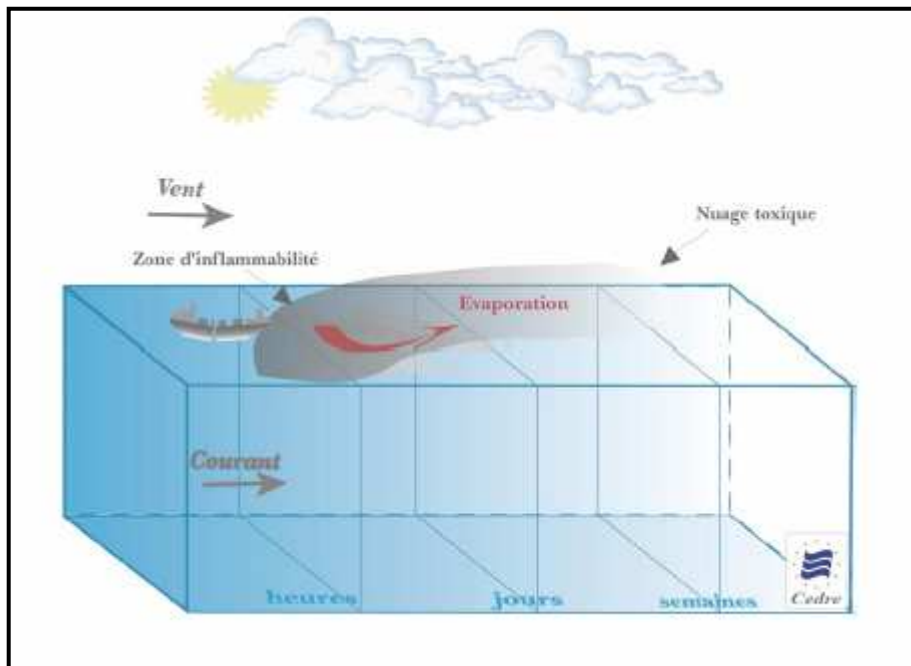


Figure 16 : Comportement du benzène lors d'un déversement en milieu aquatique

## 2. Le scénario d'accident

### 2.1. Données de l'accident

On considère l'abordage latéral d'un chimiquier. Ceci provoque une brèche dans l'une de ses citernes latérales contenant du benzène. A partir de cette hypothèse un scénario de déversement de benzène gazeux est défini avec une quantité de 500 tonnes de produit déversé instantanément (10 min).

Les éléments du scénario sont les suivants :

- Localisation 50°N ; 1°W (60km au nord de Cherbourg)
- Température de l'eau et de l'air : 10°C
- Vitesse de vent : 2m/s orienté NW
- Classes de stabilité : E (stable) ; B (instable)
- Le point de fuite est considéré à 1m au dessus de la mer

Ces éléments sont des données types déterminées à partir du guide d'intervention chimique du Benzène élaboré par le CEDRE en novembre 2004. La diffusion des scénarios GALERNE (cf. II.1.4.5) n'étant pas encore terminé lors de la rédaction de ce rapport, il n'a pas été possible de prendre en compte ces données. La mise à jour de ce scénario sera effectuée une fois la diffusion faite.

## 2.2. Comportement du benzène

Le logiciel donne une première représentation, sous forme de graphique, du devenir du benzène suite au déversement. (Voir figure 17 ci-dessous)

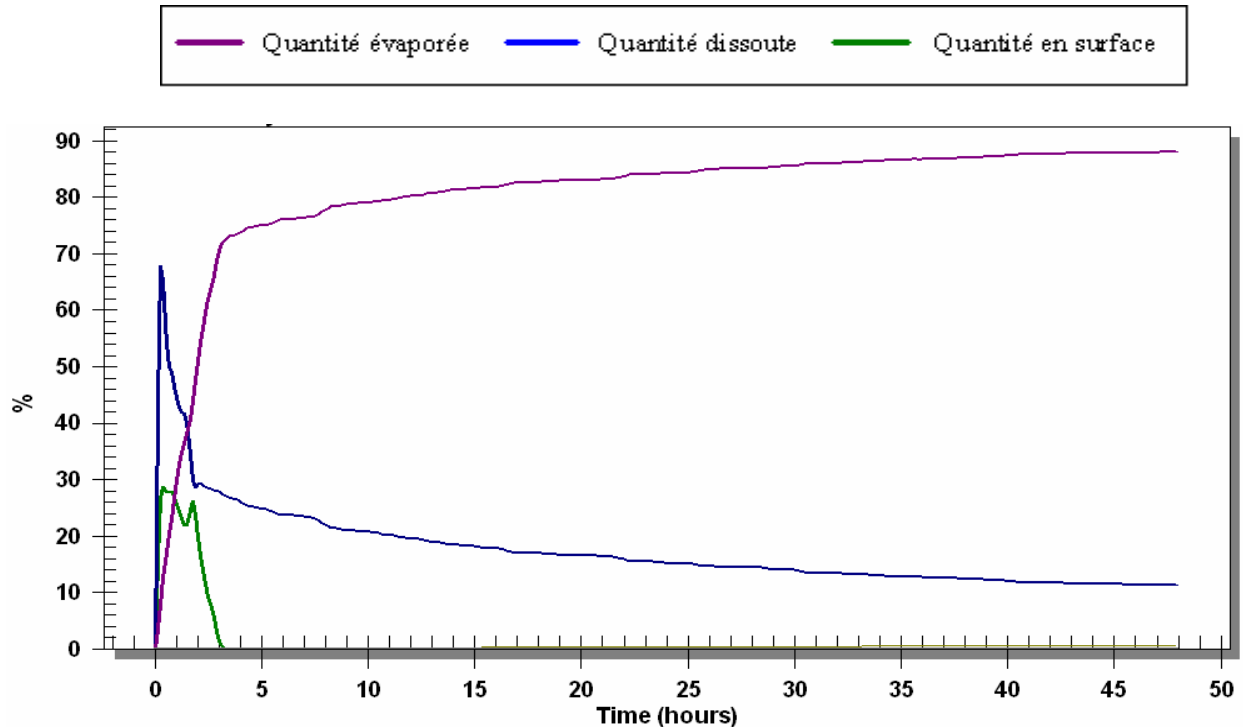


Figure 17 : Comportement de 500 tonnes de Benzène déversés instantanément avec un vent de 2 m/s

La figure 17 montre que le benzène déversé à 1 mètre sous la surface forme une nappe qui s'évapore totalement 3h après le déversement. A l'instant  $t + 3h$ , 70% de benzène est évaporé dans l'atmosphère tandis 30% se retrouve dans la colonne d'eau.

## 2.3. Etude des concentrations en benzène à différentes altitudes

On détermine ici l'étendue horizontale et verticale du nuage de benzène en fonction des limites correspondant aux seuils de gênes pour les pilotes d'avions et d'hélicoptère et les seuils d'explosivité.

### 2.3.1. Risque de toxicité

La concentration prise comme référence est 50 ppm. Cette valeur est la concentration atmosphérique de benzène, au-dessus de laquelle on peut observer des troubles de la santé pouvant incommoder les sujets exposés. C'est un seuil très bas en comparaison des valeurs toxicologiques habituellement prises comme référence dans les évaluations des risques (IDLH, VLE, ERPG...). Cependant, on s'intéresse aux personnels d'intervention « volants ». Leur vulnérabilité est donc accrue en cas d'exposition au nuage de benzène. Le malaise d'une personne exposée aux vapeurs de benzène, qui, à terre serait facilement prise en charge, aurait une ampleur totalement différente en vol et pourraient générer un sur-accident.

Les figures suivantes représentent le comportement du nuage de benzène 30 minutes après le début du déversement. Ces représentations montrent pour différentes plages d'altitudes, le nuage de benzène vu de dessus. Les concentrations supérieures à 50 ppm sont représentées en rouge et celles inférieure à 50 ppm sont en vert.

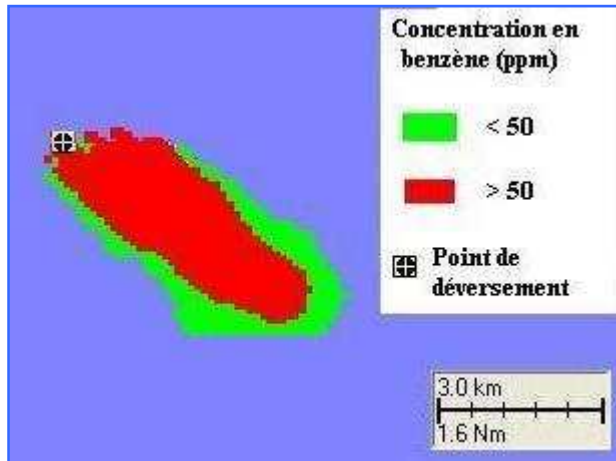


Figure 18.a : Risque de toxicité : Concentrations en benzène dans l'atmosphère entre 0 et 20 m d'altitude et 30 min après le déversement

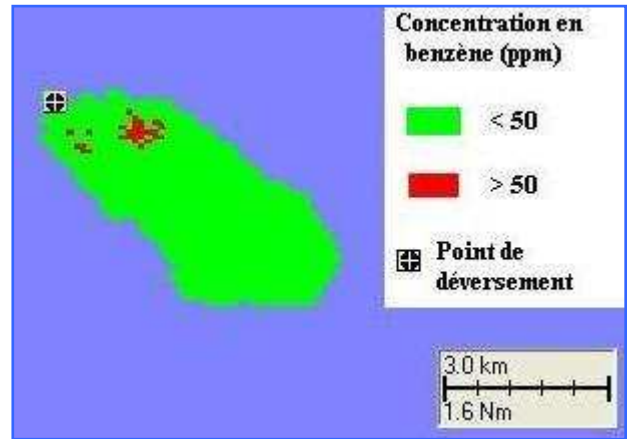


Figure 18.b : Risque de toxicité : Concentrations en benzène dans l'atmosphère entre 20 et 40 m d'altitude et 30 min après le déversement

- Entre 0 et 20 m d'altitude

Figure 18.a : Entre 0 et 20m d'altitude et 30 min après le déversement, la zone représentant un danger pour le personnel d'intervention (concentrations atmosphériques supérieures à 50 ppm) s'étend sur 12 km<sup>2</sup> (2km EW sur 6 km NS).

Une heure après le déversement, la zone "dangereuse" atteint ses dimensions maximales. Elle s'étend sur 16 km<sup>2</sup> (2 km EW sur 8 km NS)

Quatre heures après le déversement, les concentrations atmosphériques en benzène à tous points sont inférieures à 50 ppm.

- Entre 20 et 40 m d'altitude

Figure 18.b : Entre 20 et 40m d'altitude et 30 min après le déversement, on retrouve des concentrations supérieures à 50 ppm jusqu'à 2 km du point de déversement.

Une heure après le déversement, la zone "dangereuse" atteint ses dimensions maximales. Elle s'étend sur 1.5 km<sup>2</sup> (1.5 km EW sur 1 km NS)

Trois heures après le déversement, les concentrations atmosphériques en benzène reste inférieures à 50 ppm.

Au delà de 40 m d'altitude, les concentrations supérieures à 50 ppm sont nulles quelque soit le temps passé après le déversement.

Le panache de benzène est soumis à l'influence du vent (orienté NO) mais également aux courants de surface et de marée qui font dériver la nappe. En conséquence la localisation et les dimensions du panache de benzène évolue au fil du temps.

Cette évolution est représentée dans la figure suivante.

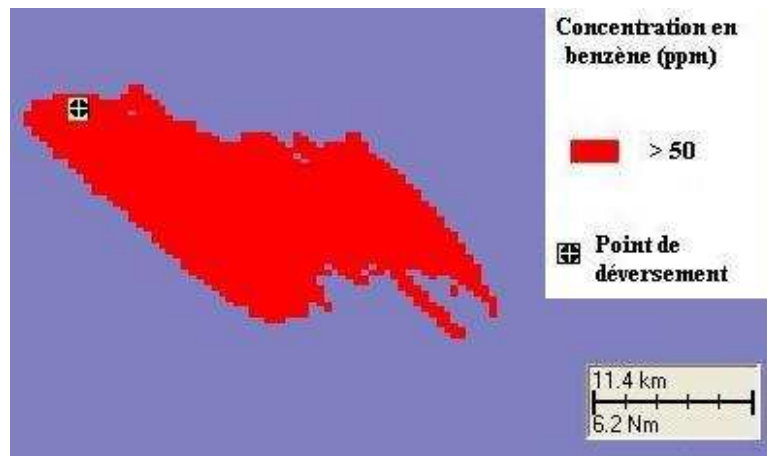


Figure 19 : Répartition des concentrations atmosphériques en benzène moyennées sur la durée du scénario.

La figure 19 représente, pour toute la durée du scénario et quelque soit l'altitude, le tracé des concentrations atmosphériques en benzène supérieures à 50 ppm. Le panache est représenté vu de dessus. On remarque que le vent oriente le panache vers le Sud Est et que les courants décalent la nappe vers l'Est.

Le panache ainsi obtenu s'étend sur 750 km<sup>2</sup> (25 km EW sur 30 km NS).

### 2.3.2. Risque d'inflammabilité

Le benzène est un produit facilement inflammable. Les vapeurs peuvent former des mélanges explosifs avec l'air si les concentrations atmosphériques sont supérieures à 12 000 ppm (LIE) et inférieure à 80 000 ppm (LSE).

La LIE représente la concentration minimale du composé dans l'air au-dessus de laquelle les vapeurs s'enflamment.

La LSE est la concentration maximale du composé dans l'air au-dessus de laquelle les vapeurs ne s'enflamment plus par manque d'oxygène.

Entre la LIE et la LSE, se situe la plage d'explosivité, le mélange air-benzène est alors susceptible d'exploser si il est en présence d'une source d'ignition. Les turbines et moteurs des aéronefs d'intervention peuvent être une source d'ignition.

Le risque d'inflammabilité et/ou d'explosion est donc accru pour des concentrations atmosphériques en benzène se situant dans la plage d'explosivité. Ce risque est également important si les concentrations sont supérieures à la LSE car après mélange avec l'air, les concentrations en benzène vont diminuer. On atteindra alors la plage d'explosivité.

De ce fait, on considère que la zone représentant un risque d'explosion se situe lorsque les concentrations en benzène dépassent la LIE soit 12 000 ppm.



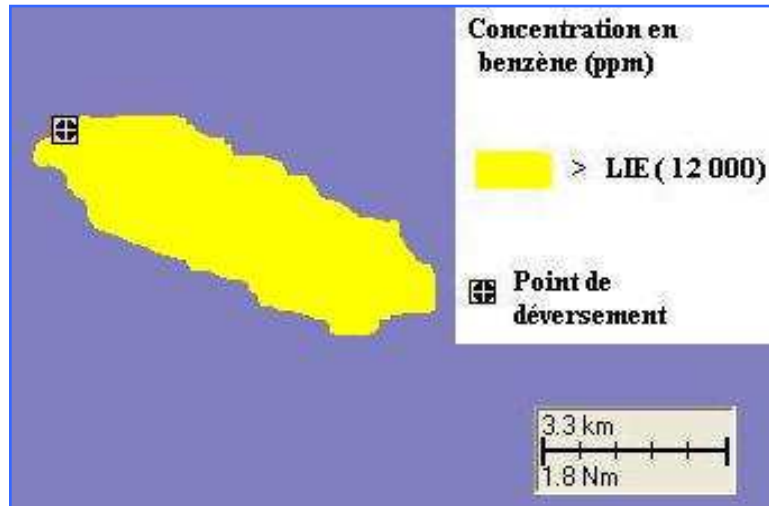


Figure 20 : Risque d'explosivité : Répartition des concentrations atmosphériques en benzène moyennées sur la durée du scénario.

Au même titre que la figure 19, la figure 20 représente la localisation des points pour lesquelles les concentrations en benzène ont dépassé la valeur de la LIE soit 12 000 ppm, et ce, pour une altitude située entre 0 et 40 m. Le panache est représenté vu de dessus. Le logiciel ne met pas en évidence des concentrations supérieures à la LIE au delà de 40 m d'altitude. Le panache obtenu s'étend sur 14 km<sup>2</sup> (7 km EW sur 2 km NS).

En conclusion, les résultats conséquents à un déversement de 500 tonnes de benzène avec un vent de 2 m/s ont mis en évidence deux constats:

- Les concentrations atmosphériques "dangereuses" pour les intervenants, en terme de toxicité (à partir de 50 ppm), peuvent être atteintes sur une surface globale de 750 km<sup>2</sup> et jusqu'à 40 m d'altitude.
- Les concentrations dangereuses en terme d'explosivité peuvent être atteintes sur une surface globale de 14 km<sup>2</sup> et jusqu'à 40 m d'altitude.

### 3. Recommandations pour l'intervention

Les résultats obtenus permettent d'émettre des recommandations relatives à l'intervention lors d'un accident maritime impliquant du benzène.

#### Approche du lieu de déversement

Les résultats modélisés à l'aide du logiciel CHEMMAP, ont montré que la dérive de la nappe et le vent favorisent l'extension horizontale du panache. Ceci est d'une importance majeure pour l'intervention car il faudra anticiper la dérive de la nappe afin d'adapter des zones d'exclusion. L'approche du lieu de l'accident doit être effectuée au vent et, si possible, en amont du courant.

#### L'hélicoptère

Concernant la hauteur atteinte par le nuage, on constate que les limites toxicologiques et d'explosivité ne sont jamais dépassées au delà d'une altitude de 40 m. L'hélicoptère en vol stationnaire au-dessus de la nappe de benzène ne descendra pas à une altitude inférieure à 40 m. Le personnel hélicoptériste devra être muni d'une protection des voies respiratoires et d'un vêtement de protection approprié.

## **CHAPITRE V LIMITES DE L'ETUDE**

---

### **1. La pénétration des gaz dans les avions**

Les recherches effectuées afin d'obtenir des données nouvelles sur la pénétration d'un gaz dans l'habitacle d'un avion ont été peu fructueuses. On ne sait toujours pas avec précision quelle est la cinétique de pénétration. Cependant, nous nous sommes appuyés sur les résultats des expérimentations POLLUTMAR 5 et sur les réponses des divers organismes spécialisés, pour considérer que, les concentrations atmosphériques en polluant en dehors et à l'intérieur de l'habitacle étaient les mêmes. On considère alors que la pénétration du gaz est instantanée. Ce principe a été utilisé dans l'élaboration des scénarios.

Néanmoins, il est vrai que les connaissances en ce domaine sont rares et les seuls résultats d'expérimentations qui aient traité le sujet ont 15 ans d'ancienneté. Une nouvelle campagne d'expérimentations en mer qui aborderait la même problématique que la campagne POLLUTMAR 5 serait utile pour combler le manque d'informations, d'autant plus, que les méthodes d'analyses actuelles permettraient de meilleurs résultats.

### **2. Simulation des turbulences d'un hélicoptère**

Lors de l'utilisation du logiciel CHEMMAP, nous nous sommes confrontés au problème de la simulation des turbulences générées par un hélicoptère. Cet élément est important à prendre en compte, car ces turbulences ont une influence non négligeable sur le comportement du nuage gazeux.

En effet, ces turbulences pourraient entraîner une remontée des gaz toxiques dans l'habitacle. L'équipage serait alors exposé à de fortes concentrations en gaz toxique.

Afin de simuler ce facteur sur le logiciel, nous avons choisi dans les paramètres, une forte instabilité atmosphérique qui engendre de fortes turbulences. L'effet obtenu n'a pas été celui qui était attendu puisque cela favorisait la dispersion du nuage gazeux contrairement aux observations issues des expérimentations.

### **3. Le logiciel de modélisation**

Le logiciel CHEMMAP, utilisé lors de cette étude a montré ces limites, notamment concernant la mesure de l'étendue verticale d'un nuage gazeux. En effet la lecture des concentrations atmosphériques est peu précise. Actuellement, nous sommes à la recherche d'un logiciel plus adapté aux conditions de notre étude.

Pour ce faire, nous avons pris contact avec la société HOMANN Associates qui développe le logiciel de modélisation atmosphérique « EPI Code ». Actuellement, nous sommes en train de définir si les possibilités de ce logiciel peuvent correspondre aux attentes de l'étude.

De même, une préparation similaire concernant un autre outil de modélisation, le logiciel PHAST développé par la société DNV Software, sera effectuée.

## CHAPITRE VI UTILISATION DU LOGICIEL PHAST

---

Dans le cadre de la modélisation d'un déversement en mer de produits évaporants, nous avons pu en collaboration avec l'INERIS, utiliser le logiciel PHAST pendant 3 jours.

L'utilisation de ce logiciel avait pour objectif de reprendre les modélisations déjà menées avec le logiciel CHEMMAP et d'analyser les résultats obtenus.

Ces modélisations ont consisté à étudier le comportement vertical d'un nuage gazeux à la surface de la mer. Le but étant de déterminer des concentrations atmosphériques maximales de polluant à différentes altitudes et ainsi de comparer les résultats trouvés aux conclusions des expérimentations POLLUTMAR 5.

### 1. Méthodologie

#### 1.1. Présentation

La coopération avec le personnel de l'unité EDIS (Explosion DISpersion) de l'INERIS nous a permis de prendre en main rapidement le logiciel PHAST.

Les simulations comportaient 2 parties :

- Le calcul du terme source
- La dispersion atmosphérique avec utilisation du terme source.

##### 1.1.1. Le terme source

Nous avons choisi comme terme source pour les modélisations sur PHAST, le taux d'évaporation d'une nappe de produit évaporant. Ce taux est exprimé en kg/s.

##### 1.1.2. Rejet et dispersion

La seconde phase a été d'utiliser le terme source obtenu auparavant et de déterminer les concentrations du polluant dans l'atmosphère.

PHAST ne permet pas de simuler un rejet surfacique, nous avons donc été obligé de considérer le taux d'évaporation de la nappe en un seul point. Les concentrations atmosphériques aux abords de la source seront donc élevées. Par conséquent notre étude sera majorante.

#### 1.2. Eléments d'entrée

Les scénarios sont composés de plusieurs critères :

##### 1.2.1. Surfaces de nappe :

On considère l'évaporation d'une nappe de produits évaporant de plus ou moins grande surface. Deux scénarios seront définis sur ce point :

- Déversement d'une nappe de 1000 m<sup>2</sup> correspondant à 1000 kg de produits
- Déversement de 10 000 m<sup>2</sup> correspondant à 10 000 kg de produits

### 1.2.2. Type de surface de rejet :

La surface de rejet privilégiée pour notre étude est la mer. Cependant nous prendrons comme référence également un autre de type de surface. En effet, dans les différents scénarios, les produits seront également déversés sur une surface lisse comme le béton. Nous comparerons ainsi les taux d'évaporation sur ces 2 types de surface.

### 1.2.3. Conditions météorologiques :

Trois conditions météorologiques seront utilisés lors des scénarios afin de déterminer leur influence sur le comportement du nuage gazeux et de déterminer la plus défavorable.

B/C4 : classe de stabilité atmosphérique B/C\* correspondant à une atmosphère relativement instable et un vent de 4 m/s.

D3 : classe de stabilité atmosphérique D\* correspondant à une atmosphère modérément stable et un vent de 3 m/s.

F2 : classe de stabilité atmosphérique F\* correspondant à une atmosphère stable et un vent de 2 m/s.

(\* Classes de stabilité de Pasquill)

### 1.2.4. Produits pris en compte

Les produits pris en compte sont les même que ceux déjà modélisés sur CHEMMMAP.

- Ammoniac
- Benzène
- Butane
- Styrène

## 2. Résultats

### 2.1. Taux d'évaporation

Pour chaque produit, 12 taux d'évaporation ont été définis correspondant à 12 scénarios différents. Ces scénarios diffèrent sur la quantité déversée, le type de surface sur laquelle se déverse le produit, les conditions météorologiques.

Ci-dessous, sont présentés les taux d'évaporation pour l'ammoniac :

<b>AMMONIAC</b>			
<b>Scénarios</b>	<b>Taux d'évaporation moyen (kg/s) sur 120s</b>		
	<i>BC4</i>	<i>D3</i>	<i>F2</i>
1t (w)	7	5	4
1t (bé)	3	3	2.5
10t (w)	45	40	35
10t (bé)	25	25	23

Tableau : Taux d'évaporation moyen de l'ammoniac établi selon différents paramètres : type de surface (w = pleine mer ; bé = béton), quantité déversée (en tonnes) ; conditions météorologiques

Les produits retenus pour l'étude s'évaporent plus ou moins rapidement selon leur propriété physico-chimique. D'autres paramètres (grandeur de surface, type de surface, conditions météorologiques) ont un rôle dans l'évaporation. On a constaté que ces paramètres influent sur le taux d'évaporation de la même manière pour tous les produits.

En effet, un produit rejeté en pleine mer va s'évaporer plus rapidement que le même produit rejeté sur un sol lisse comme le béton. Plus les surfaces de nappe sont grandes, plus le taux d'évaporation global est important. Enfin, une météo se caractérisant par une forte instabilité atmosphérique et un vent fort favorise l'évaporation du produit.

Les taux d'évaporation les plus importants (conditions météorologique « BC4 » et type de surface « pleine mer ») ont été sélectionnés pour le calcul des concentrations atmosphériques afin se positionner dans les conditions les plus défavorables.

## **2.2. Modélisation de la dispersion atmosphérique et détermination des concentrations atmosphériques.**

Les résultats correspondant aux concentrations atmosphériques verticales sont présentés pour chaque produit testé. Les simulations correspondent à des rejets en mer et sur surface lisse de quantité d'1 tonne et 10 tonnes. Le terme source pris comme référence lors de l'établissement des scénarios relatifs à la dispersion atmosphérique sont les taux d'évaporation déterminés lors de conditions météorologiques de type « BC4 ».

En ce qui concerne la dispersion atmosphérique, les conditions météorologiques prises comme éléments d'entrée pour la définition des scénarios ont été : « BC 4 », « D3 » et « F2 ». Pour chaque produit nous avons déterminé des valeurs de concentrations atmosphériques à ne pas dépasser. Ces limites prennent compte de la toxicité du produit et de son inflammabilité. En terme de toxicité, nous avons pris comme limite les concentrations atmosphériques qui, absorbées par inhalation, provoquent les premiers signes de gênes pour les pilotes d'aéronef (maux de tête, irritations....).

Pour l'inflammabilité, nous avons pris comme référence la LIE de chaque produit et nous avons choisis une limite correspondant à un dixième de celle-ci pour plus de sécurité.

Ces valeurs sont énoncées dans le tableau suivant :

<b>SEUILS RETENU</b>		
	Toxicité*	Inflammabilité (1/10 LIE)
AMMONIAC	100 ppm	15500 ppm
BENZENE	50 ppm	1200 ppm
BUTANE		1400 ppm
STYRENE	50 ppm	900 ppm

Tableau : Seuils de toxicité et d'inflammabilité appliqués à l'étude

\* Les valeurs de toxicité ont été sélectionnées à partir des guides d'intervention chimique établis par le CEDRE pour l'Ammoniac, le Benzène et le Styrène (Pour ce produit la valeur correspond au Seuil des Effets Réversibles, SER, pour une exposition de 120 min, Ineris).

### 2.2.1. L'Ammoniac

Les valeurs de concentrations atmosphériques déterminées d'après la modélisation sont résumées dans le tableau suivant.

<b>AMMONIAC</b>														
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)													
	BC4				D3				F2					
	10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	700	280	140	80		700	280	150	90		750	220	80	50
1t (Qbé)	350	120	70	40		400	150	75	45		450	100	40	20
10t (Qw)	1800	800	450	300		1800	800	450	300		1900	700	300	150
10t (Qbé)	1500	500	300	200		1500	500	300	200		1500	500	200	100

Tableau : Valeurs des concentrations verticales atmosphériques en Ammoniac relevées d'après la simulation d'un déversement d'Ammoniac pour 3 conditions météorologiques différentes (BC4, D3, F2), 2 quantités (1t, 10t) et 2 types de surfaces (pleine mer (ow), béton (bé))

D'après ce tableau nous observons que les valeurs sont plus élevées lors d'un déversement en pleine mer (ow), ceci est surtout dû à la valeur du terme source. En effet, on a remarqué précédemment que les taux d'évaporation étaient plus élevés en pleine mer. Ainsi les concentrations atmosphériques affichent des valeurs maximales élevées par rapport à un déversement sur sol lisse (béton).

Les valeurs pour les conditions atmosphériques BC 4 et D3 sont relativement semblables. Par contre pour F2, on observe de plus fortes concentrations à basses altitudes. L'extension horizontale du nuage gazeux est plus importante pour des conditions de type F2, à l'inverse l'extension verticale est faible.

Dans le tableau, les valeurs surlignées correspondent au dépassement du seuil de toxicité qui est de 100 ppm.

Pour un déversement d'1 tonne d'Ammoniac, ce seuil est atteint jusqu'à 30 m d'altitude. Pour un déversement de 10 tonnes, on observe des concentrations 2 à 3 fois supérieures au seuil choisi (selon les conditions météorologiques) jusqu'à 40 m d'altitude. Le seuil des 100 ppm est atteint jusqu'à une altitude de 85 m pour un déversement de 10 t en pleine mer et des conditions météorologiques « BC4 » et « D3 » (50m pour conditions F2). Pour les mêmes conditions, mais le déversement se déroulant sur un sol en béton, le seuil est atteint jusqu'à 65 m d'altitude (40 m pour conditions F2).

### 2.2.2. Le Benzène

<b>BENZENE</b>													
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)												
	BC4				D3				F2				
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	
1t (Qw)	30	10	4	1	30	10	5	1	18	4	2	1	
1t (Qbé)	27	7	4	2	25	8	4	2	15	4	1.5	1	
10t (Qw)	100	40	20	14	100	40	22	14	40	12	6	3	
10t (Qbé)	100	38	22	14	100	38	22	14	40	12	5	3	

Tableau : Valeurs des concentrations verticales atmosphériques en Benzène relevées d'après la simulation d'un déversement de Benzène pour 3 conditions météorologiques différentes (BC4, D3, F2), 2 quantités (1t, 10t) et 2 types de surfaces (pleine mer (ow), béton (bé))

Pour le Benzène la différence remarquée précédemment relative au type de surface du rejet est moindre.

Quelque soit le type de surface et la quantité déversée, on observe une différence significative entre les concentrations obtenues lors de conditions météorologiques de type « BC4 », « D3 » et celles de type « F2 ». Ces dernières étant beaucoup plus faibles en altitude.

La valeur limite correspondant au seuil de toxicité du Benzène (50 ppm) est atteinte pour un rejet de 10 tonnes et pour des conditions de type « BC4 » et « D3 ». Ce seuil est dépassé à l'altitude de 10 m.

### 2.2.3. Le Butane

<b>BUTANE</b>													
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)												
	BC4				D3				F2				
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	
1t (Qw)	500	200	120	70	500	200	110	70	200	60	30	15	
1t (Qbé)	250	100	50	35	260	100	55	32	150	35	15	8	
10t (Qw)	1000	550	320	230	750	350	230	160	250	130	70	40	
10t (Qbé)	700	400	240	150	640	320	180	120	250	110	55	30	

Tableau : Valeurs des concentrations verticales atmosphériques en Butane relevées d'après la simulation d'un déversement de Butane pour 3 conditions météorologiques différentes (BC4, D3, F2), 2 quantités (1t, 10t) et 2 types de surfaces (pleine mer (ow), béton (bé))

concentrations atmosphériques en altitude sont presque deux fois supérieures à celles obtenues à partir d'un rejet sur sol lisse (béton).

En ce qui concerne les conditions météorologiques, nous observons les mêmes résultats que pour les produits précédents. En effet pour des conditions « BC4 » et « D3 » les valeurs obtenues sont sensiblement identiques alors qu'elles sont plus faibles lors de conditions « F2 ».

Le butane n'est pas directement dangereux pour la santé. En ce qui concerne le risque d'incendie et d'explosion, le seuil du 1/10 de la LIE soit 1400 ppm n'est jamais atteint au dessus de 10 m d'altitude et dans les conditions des scénarios.

#### 2.2.4. Le Styène

STYRENE												
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)											
	BC4				D3				F2			
	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m	10 m	20 m	30 m	40 m
10t (Qw)	30	9	4	2.5	31	10	5	3	15	4	1.5	0.75
500t(w)	180	70	40	25								

Tableau : Valeurs des concentrations verticales atmosphériques en Styène relevées d'après la simulation d'un déversement en pleine mer de 10 tonnes et 500 tonnes de Styène dans 3 conditions météorologiques différentes.

Les scénarios pour le styrène se sont limités aux conditions les plus défavorables.

En effet, le styrène est un produit faiblement évaporant du fait de tension de vapeur (0.6-0.7 kPa à 20°C , guide d'intervention chimique du styrène, CEDRE). Les déversements d'une tonne, le logiciel n'a pas pu afficher les concentrations atmosphériques, celle-ci étant trop faible, nous avons donc défini un scénario avec déversement en pleine mer de 10 tonnes de styrène dans 3 conditions météorologiques et un scénario avec déversement en pleine mer de 500 tonnes de styrène dans les conditions de type « BC 4 ».

Nous avons constaté que pour un déversement de 500 tonnes, les valeurs pouvant être dangereuses pour la santé des intervenants étaient présentes jusqu'à 30 m d'altitude.

### 2.3. Comparaison des résultats PHAST et des valeurs de POLLUTMAR 5

Les valeurs des concentrations atmosphériques déterminées précédemment avec le logiciel PHAST sont maintenant comparées avec celles qui ont été mesurées lors des essais en mer POLLUTMAR 5. Pour cette comparaison, nous avons sélectionnées les plus fortes concentrations calculées par le logiciel PHAST. Celles-ci correspondent à un rejet en pleine mer et à des conditions atmosphériques de type BC4. Les valeurs déterminées à partir du logiciel CHEMMAP sont également intégrées à cette comparaison.



<b>AMMONIAC</b>														
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)													
	PHAST (BC4)					POLLUTMAR					CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	700	280	140	80		360	570	360	100		2200	1500	1100	800
10t (Qw)	1800	800	450	300		3400	5700	3400	1000		11500	7200	5800	3600

<b>BENZENE</b>														
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)													
	PHAST (BC4)					POLLUTMAR 5					CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	30	10	4	1		7	10	7	2		310	310	160	40
10t (Qw)	100	40	20	14		60	100	60	20		240	620	70	70

<b>BUTANE</b>														
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)													
	PHAST (BC4)					POLLUTMAR 5					CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m
1t (Qw)	500	200	120	70		150	230	150	42		4200	2600	210	210
10t (Qw)	1000	550	320	230		1400	2300	1400	420		37800	16800	3400	2600

<b>STYRENE</b>														
Scénarios	concentrations atmosphériques verticales (ppm)													
	PHAST (BC4)					POLLUTMAR 5					CHEMMAP			
	10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m		10 m	20 m	30 m	40 m
10t (Qw)	30	9	4	2.5		3.5	6	3.5	1		18	35	18	3

Globalement, on constate que le logiciel PHAST donne des valeurs qui restent dans le même ordre de grandeur que les valeurs mesurées sur le terrain (POLLUTMAR 5) d'où une certaine pertinence dans la réalité des résultats. Cependant, pour les rejets de 10 tonnes, le logiciel PHAST est minorant en comparaison aux valeurs des essais en mer.

A l'inverse, les données déterminées à partir du logiciel CHEMMAP sont largement majorantes. Malgré tout, elles sont cohérentes par rapport au comportement de chaque produit.

### 3. Conclusion

Phast a permis de mettre en évidence les produits présentant les risques les plus importants pour le personnel intervenant. En effet, l'ammoniac, de part ses propriétés physico-chimiques et sa toxicité pour l'homme engendre le plus de contraintes quant à l'intervention. Avec des concentrations dangereuses jusqu'à 85 m d'altitude, l'hélicoptère devient une opération risquée.

Pour les autres produits, d'une façon générale et dans les conditions de rejets présentées ci-dessous, l'hélicoptère peut s'effectuer au dessus des 30 m d'altitude.

On retrouve sur ce point les recommandations qui ont été établis à la suite des expérimentations POLLUTMAR 5.

Cependant, il est un point, qui est difficile à éclaircir par la simple utilisation d'un logiciel de modélisation. En effet, l'influence des turbulences d'un hélicoptère sur le développement d'un nuage gazeux n'a pu être modélisé par le biais des différents modèles utilisés. L'avancement sur ce point peut éventuellement se faire en faisant appel à des techniques de modélisation plus lourdes ou idéalement par le biais de nouvelles expérimentations.

## CONCLUSION

---

L'intervention sur un navire transportant des substances dangereuses évaporantes et gazeuses et plus particulièrement la pénétration des gaz dans les aéronefs d'intervention sont des sujets peu traités dans la littérature.

La recherche de données récentes à ce sujet a permis de prendre conscience de ce manque. Cependant nous avons pu avancer dans ce projet en nous focalisant sur les essais en mer, effectués par le CEDRE au début des années 90. Ces essais portaient sur l'approche par hélicoptère d'un chimiquier en difficulté.

La validation des données, issus de ces expérimentations, par la modélisation n'a pas pu se faire car le logiciel utilisé offrait un rendu peu fiable pour cet usage.

Néanmoins, ce logiciel a permis l'élaboration de scénarios qui permettent de définir les risques qu'encourt le personnel intervenant lors d'accidents maritimes mettant en cause des substances évaporantes. Ces scénarios aboutissent à des recommandations pour chaque accident impliquant un produit évaporant (E) ou gazeux (G).

Afin d'optimiser les recherches sur ce sujet, plusieurs axes d'études sont à mener :

- *Recherche d'un logiciel de modélisation qui offre les résultats les plus réalistes. Les sociétés qui développent les logiciels les plus intéressants seront contactées. Ensuite nous évaluerons les performances de chaque logiciel et nous les comparerons à nos attentes.*
- *Achèvement de la comparaison des résultats des expérimentations en mer POLLUTMAR 5 avec la modélisation, en optimisant la méthode et en utilisant le nouveau logiciel s'il est obtenu par le CEDRE.*
- *Elargissement des scénarios d'accidents à plusieurs produits, sélectionnés au préalable, avec l'objectif d'émettre des recommandations quant à l'intervention.*

## **BIBLIOGRAPHIE**

---

### **OUVRAGES**

#### **Accord de Bonn**

*Guide pratique de l'accord de Bonn sur la surveillance aérienne.*  
, mai 2006

#### **CEDRE Guide d'intervention chimique : Styrène.**

, mars 2004

#### **CEDRE Guide d'intervention chimique : Benzène.**

, novembre 2004

#### **CEDRE Guide opérationnel : l'observation aérienne des pollutions pétrolières en mer.**

, juillet 2004.

#### **C.E.D.R.E / Marine Nationale Poursuite des études consécutives à l'adaptation des plans POLMAR MER au risque chimique.**

, décembre 1991.

#### **C.E.D.R.E / Marine Nationale Etude expérimentale de l'approche par hélicoptère d'un chimiquier en difficulté « POLLUTMAR 4 » ; « POLLUTMAR 5 »**

, décembre 1992.

#### **Det Norske Veritas (USA) - Consequence of LNG Marine Incidents – Conference and Workshop on Chemical Accident Investigations**

2, 5, 6 October 2000 – Orlando, Florida, US – Organization for economic co-operation and development – 2002 – 25p.

#### **Gaz de France, Direction de la recherche, Le transport de Gaz Naturel Liquéfié par navire.**

mai 2006.

#### **KANTIN R, MARCHAND Michel**

*Contaminants chimiques en milieux aquatiques.*

Institut océanographique, 2000, 179 p. (OCEANIS, volume 23, n°4,1997)

#### **INERIS- DRA (Direction des risques accidentels)**

*Méthode pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels - Dispersion atmosphérique (Mécanismes et outils de calcul)*

, décembre 2002.

#### **NIOSH Publications Niosh Pocketguide To Chemical Hazards - DHHS (NIOSH) Publication**

No. 2005-149., septembre 2005.

## **LIENS INTERNET**

**ASA (APPLIED SCIENCE ASSOCIATES INC.)**. Page d'accueil du site de présentation du logiciel *CHEMMAP*.

<<http://www.chemmap.com/>>

**BONN AGREEMENT**. Page d'accueil de l'accord de Bonn

[<<http://www.bonnagreement.org/fr/html/welcome.html>

**C.E.D.R.E.** Page d'accueil du CEntre de Documentation de Recherche et d'Expérimentation sur les pollutions accidentelles des eaux

<<http://www.le-cedre.fr/>>

**C.E.D.R.E** Page de présentation du projet Galerne.

<http://www.cedre.fr/fr/cedre/galerie.html>

**EPI Code**. Page d'accueil du logiciel de modélisation EPICode.

<http://www.epicode.com/>

**IFREMER**. Page d'accueil de l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

<<http://www.ifremer.fr/francais/>>

**INRS**. Dossier d'information présentant une sélection de sites Web intéressant pour le préventeur en matière de risque chimique.

<[http://www.inrs.fr/hm/risque\\_chimique\\_sources\\_d\\_information\\_sur\\_le\\_web.html](http://www.inrs.fr/hm/risque_chimique_sources_d_information_sur_le_web.html)>

**MARINE NATIONALE** Présentation d'un drone de détection de produits nucléaires, radiologiques et chimiques (NRC).

<[http://www.defense.gouv.fr/marine/base/breves/un\\_marin\\_au\\_concours\\_lepine](http://www.defense.gouv.fr/marine/base/breves/un_marin_au_concours_lepine)>

**METEO FRANCE**. La prévision du déplacement des pollutions marines accidentelles: le dispositif opérationnel français

< [http://www.meteorologie.eu.org/mothy/plaquette\\_fr.html](http://www.meteorologie.eu.org/mothy/plaquette_fr.html)>

**NIOSH**. International chemical safety cards

<<http://www.cdc.gov/niosh/ipcs/french.html>>

**ONERA**. Page d'accueil de l'Office national d'études et recherches aérospatiales

<http://www.onera.fr/>

**TOTAL PETROCHEMICALS** (liste des fiches de données de sécurité des produits de Total Petrochemicals en Europe)

[http://www.totalpetrochemicals.biz/extraside/msds\\_list.asp?lg=fr&biz=b6](http://www.totalpetrochemicals.biz/extraside/msds_list.asp?lg=fr&biz=b6)

## TABLE DES MATIERES

---

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I ORGANISATION DE L'ETUDE</b> .....	<b>2</b>
<b>1. CONTEXTE DE L'ETUDE</b> .....	<b>2</b>
<b>1.1. LE TRANSPORT MARITIME DES MATIERES DANGEREUSES</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2. L'INTERVENTION SUR NAVIRE EN DIFFICULTE</b> .....	<b>3</b>
1.2.1. LA PROTECTION DES PREMIERS INTERVENANTS : LA PHASE REFLEXE .....	3
1.2.2. LA PROTECTION DES POPULATIONS ET LA PRISE DE DECISION .....	4
<b>1.3. LES MISSIONS AERIENNES EN MER</b> .....	<b>6</b>
1.3.1. L'OBSERVATION AERIENNE .....	6
1.3.2. LES MISSIONS D'HELITREUILLAGE .....	7
<b>1.4. DANGERS ET CIBLES LORS D'INTERVENTIONS EN MER IMPLIQUANT DES SUBSTANCES DANGEREUSES.</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJECTIFS ET CONTENU</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1. OBJECTIF DE LA TACHE 2 DU PROJET GALERNE</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2. OBJECTIF ET CONTENU DE L'ETUDE</b> .....	<b>9</b>
<b>CHAPITRE II RECHERCHE DE DONNEES RECENTES</b> .....	<b>11</b>
<b>1. PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>11</b>
<b>2. CONTACTS AVEC DES SPECIALISTES EXTERIEURS</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1. CADRAGE DU SUJET</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2. RETOUR D'EXPERIENCE IEVOLI SUN</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3. RECHERCHE DE DONNEES RECENTES</b> .....	<b>12</b>
<b>3. LES EXPERIMENTATIONS POLLUTMAR</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1. OBJET</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2. METHODOLOGIES UTILISEES</b> .....	<b>13</b>
3.2.1. TRAÇAGE AU SF6 .....	13
3.2.2. LE COEFFICIENT DE TRANSFERT ATMOSPHERIQUE (CTA) .....	13
<b>3.3. RESULTATS, OBSERVATIONS</b> .....	<b>14</b>
3.3.1. LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE EN MER .....	14
3.3.2. COMPORTEMENT DU PANACHE .....	15
3.3.3. INFLUENCE DE L'HELICOPTERE SUR LE PANACHE .....	15
<b>3.4. CONCLUSIONS</b> .....	<b>17</b>
<b>CHAPITRE III UTILISATION DE L'OUTIL DE MODELISATION CHEMMAP</b> .....	<b>18</b>
<b>1. LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1. DEFINITIONS</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2. OBJECTIF ET ELEMENTS DE L'ETUDE</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3. TYPES D'EMISSIONS</b> .....	<b>19</b>
<b>1.4. PARAMETRES</b> .....	<b>19</b>
1.4.1. NATURE DU REJET .....	19
1.4.2. METEOROLOGIE .....	19
1.4.3. NATURE DU TERRAIN.....	20

<b>2. LA MODELISATION DES POLLUTIONS ACCIDENTELLES.....</b>	<b>20</b>
2.1. INTRODUCTION .....	20
2.2. LES OUTILS DE MODELISATION UTILISES PAR LE CEDRE.....	21
2.3. CHOIX DU LOGICIEL .....	28
<b>3. VERIFICATIONS DES RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LE COMPORTEMENT DU NUAGE TOXIQUE EN MER .....</b>	<b>29</b>
3.1. OBJECTIFS.....	29
3.2. METHODOLOGIE.....	29
3.2.1. CHOIX DU MODELE.....	29
3.2.2. CHOIX DES CONDITIONS .....	29
3.2.3. ELEMENTS DES SCENARIOS .....	30
3.2.4. DEFINITION DE LA METHODE.....	32
3.3. RESULTATS ET DISCUSSION .....	35
<b>CHAPITRE IV APPLICATION : MODELISATION DES CONSEQUENCES D'UN ACCIDENT MARITIME METTANT EN CAUSE DU BENZENE .....</b>	<b>39</b>
1. CE QU'IL FAUT SAVOIR SUR LE BENZENE.....	39
1.1. DEFINITION .....	39
1.2. UTILISATIONS.....	39
1.3. RISQUES.....	39
1.3.1. TOXICITE .....	39
1.3.2. INCENDIE.....	40
1.4. COMPORTEMENT DU BENZENE LORS D'UN DEVERSEMENT EN MILIEU AQUATIQUE .....	40
2. LE SCENARIO D'ACCIDENT.....	41
2.1. DONNEES DE L'ACCIDENT .....	41
2.2. COMPORTEMENT DU BENZENE .....	42
2.3. ETUDE DES CONCENTRATIONS EN BENZENE A DIFFERENTES ALTITUDES .....	42
2.3.1. RISQUE DE TOXICITE .....	42
2.3.2. RISQUE D'INFLAMMABILITE.....	44
3. RECOMMANDATIONS POUR L'INTERVENTION.....	45
<b>CHAPITRE V LIMITES DE L'ETUDE.....</b>	<b>46</b>
1. LA PENETRATION DES GAZ DANS LES AERONEFS .....	46
2. SIMULATION DES TURBULENCES D'UN HELICOPTERE.....	46
3. LE LOGICIEL DE MODELISATION .....	46
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>56</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>58</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>60</b>

## **LISTE DES ANNEXES**

---

**ANNEXE 1 : ORGANIGRAMME DU CEDRE**

**ANNEXE 2 : CODE IMDG - Chapitre 2.10 - Polluants marins**

**ANNEXE 3 : CLASSIFICATION MARPOL**

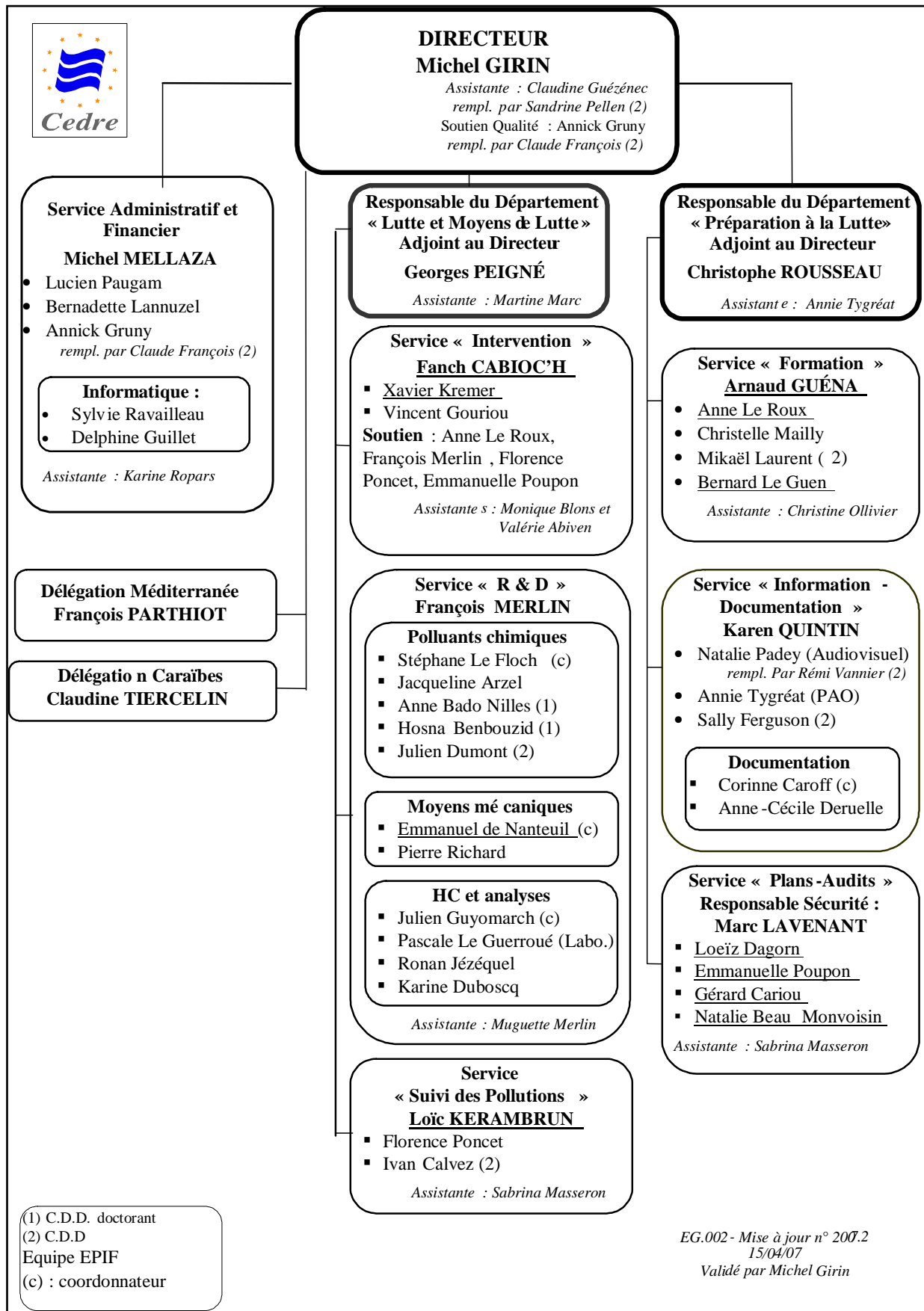
**ANNEXE 4 : CLASSIFICATION SEBC**

**ANNEXE 5 : NOMENCLATURE NST/R**

**ANNEXE 6 : COMPARAISON DES RESULTATS POLLUTMAR ET CHEMMAP SUR  
LE DEVELOPPEMENT VERTICAL D'UN NUAGE TOXIQUE**



## ANNEXE 1 ORGANIGRAMME DU CEDRE



## **ANNEXE 2 CODE IMDG - Chapitre 2.10 - Polluants marins**

2

### **Chapitre 2.10**

#### **Polluants marins**

##### **2.10.1 Définition**

Les polluants marins sont des matières qui peuvent être bioaccumulées dans les aliments d'origine marine, ou qui présentent un degré de toxicité élevé pour la vie aquatique et qui, de ce fait, relèvent des dispositions de l'Annexe III de MARPOL 73/78, tel que modifié.

##### **2.10.2 Propriétés**

**2.10.2.1** Les substances nuisibles pour le milieu marin (polluants marins) doivent être transportées conformément aux dispositions de l'Annexe III de MARPOL 73/78, tel que modifié.

**2.10.2.2** On trouvera dans l'Index la liste complète des substances, matières et objets identifiés comme polluants marins comme suit :

- .1 les substances, matières et objets ayant un pouvoir de pollution (polluants marins) sont identifiés dans l'Index par la lettre «P», dans la colonne «PM»; et;
- .2 les substances, matières et objets ayant un pouvoir de pollution extrêmement élevé (polluants marins présentant des risques graves) sont identifiés dans l'Index par les lettres «PP», dans la colonne «PM».

**2.10.2.3** L'Index comprend également les rubriques N.S.A. dont pourraient relever des substances, matières et objets ayant un pouvoir de pollution, identifiées dans l'Index par l'indication «●», dans la colonne «PM».

**2.10.2.4** Les polluants marins et les polluants marins présentant des risques graves doivent être transportés au titre de la rubrique appropriée en fonction des propriétés qu'ils présentent s'ils répondent aux critères de l'une des classes 1 à 8. S'ils ne répondent aux critères d'aucune de ces classes, leur transport doit s'effectuer au titre de la rubrique MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, SOLIDE, N.S.A., N° ONU 3077, ou MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, LIQUIDE, N.S.A., N° ONU 3082, selon le cas, à moins qu'il n'existe une rubrique spécifique dans la classe 9.

**2.10.2.5** La colonne (4) de la Liste des marchandises dangereuses fournit également des renseignements sur les polluants marins, comme suit :

- «P» si la rubrique vise un polluant marin ou, dans le cas des rubriques génériques, si la majorité des substances, matières ou objets visés par cette rubrique sont des polluants marins;
- «PP» si la rubrique vise un polluant marin présentant des risques graves ou, dans le cas des rubriques génériques, si la majorité des substances, matières ou objets visés par cette rubrique sont des polluants marins présentant des risques graves;
- «●» si la rubrique vise une substance, matière ou objet N.S.A. et prévoit d'inclure les marchandises qui sont des polluants marins ou des polluants marins présentant des risques graves.

**2.10.2.6** Lorsqu'on a des raisons de penser qu'une substance, qu'une matière ou qu'un objet présente des propriétés qui peuvent satisfaire aux critères d'un polluant marin ou d'un polluant marin présentant des risques graves mais n'est pas identifié dans le présent Code, cette substance, cette matière ou cet objet peut être transporté en tant que polluant marin ou polluant marin présentant des risques graves, conformément aux dispositions du présent Code. Toutes les données pertinentes doivent être soumises au GESAMP lorsqu'il y a lieu.

**2.10.2.7** Avec l'approbation de l'autorité compétente, les substances, matières ou objets qui sont identifiés comme étant des polluants marins dans le présent Code mais qui, d'après le profil de risques révisé du GESAMP ne répondent plus aux critères nécessaires pour être désignés comme polluants marins ou polluants marins présentant des risques graves, n'ont pas à être transportés conformément aux dispositions du présent Code applicables aux polluants marins.

##### **2.10.3 Classement des solutions, mélanges et isomères**

**2.10.3.1** Une solution ou un mélange contenant 10 % ou plus d'un (de) polluant(s) marin(s) est un polluant marin.

**Chapitre 2.10 - Polluants marins**

- 2.10.3.2** Une solution ou un mélange contenant 1 % ou plus d'un (de) polluant(s) marin(s) présentant des risques graves est un polluant marin.
- 2.10.3.3** Une solution ou un mélange qui ne répond pas aux critères des classes 1 à 8, mais qui répond aux critères applicables aux polluants marins en vertu de 2.10.3.1 ou 2.10.3.2 doit être présenté au transport en tant que MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, SOLIDE, N.S.A. ou MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, LIQUIDE, N.S.A. au titre des rubriques de la classe 9, même s'il n'est pas nommément désigné dans les rubriques correspondantes de l'Index.
- 2.10.3.4** Un isomère qui a été identifié comme polluant marin et qui est visé par une rubrique générique des classes 1 à 8 mais qui ne répond pas aux critères de ces classes, doit être présenté au transport en tant que MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, SOLIDE, N.S.A. ou MATIÈRE DANGEREUSE DU POINT DE VUE DE L'ENVIRONNEMENT, LIQUIDE, N.S.A. au titre des rubriques de la classe 9, même s'il n'est pas énuméré dans l'Index.

**2.10.4 Directives pour l'identification des substances nuisibles transportées en colis (polluants marins)**

**2.10.4.1** Aux fins de l'Annexe III de MARPOL 73/78, les substances ci-après sont identifiées comme étant des substances nuisibles\* :

- .1 On considère qu'une substance a un pouvoir de pollution en tant que polluant marin (P) si :
  - elle est bloaccumulée dans une mesure considérable et on sait qu'elle présente un danger pour la vie aquatique ou pour la santé de l'homme (degré de risque «+» dans la colonne A); ou
  - elle est bloaccumulée et présente donc un risque pour les organismes aquatiques ou pour la santé de l'homme, mais a une persistance toutefois brève, de l'ordre d'une semaine ou moins (degré de risque «Z» dans la colonne A); ou
  - elle est fortement toxique pour la vie aquatique et est définie par une CL<sub>50</sub> inférieure à 1 mg/l (degré de risque «4» dans la colonne B\*).

Profils de risques du GESAMP				
A	B	C	D	E
+				
Z	4			

- .2 On considère qu'une matière a un pouvoir de pollution extrêmement élevé en tant que polluant marin présentant des risques graves (PP) si :
  - elle est bloaccumulée dans une mesure considérable et on sait qu'elle présente un danger pour la vie aquatique ou pour la santé de l'homme (degré de risque «+» dans la colonne A), elle est fortement toxique pour la vie aquatique et est définie par une CL<sub>50</sub><sup>†</sup> inférieure à 1 mg/l (degré de risque «4» dans la colonne B); ou
  - elle est extrêmement toxique pour la vie aquatique et est définie par une CL<sub>50</sub><sup>†</sup> inférieure à 0,01 mg/l (degré de risque «5» dans la colonne B).

Profils de risques du GESAMP				
A	B	C	D	E
+	4			
	5			

\* Se reporter à la *Liste composite des profils de risques* établie par le Groupe EHS du GESAMP, que l'Organisation diffuse chaque année sous couvert de circulaires BLG adressées à tous les États Membres de l'OMI.

<sup>†</sup> Concentration d'une substance qui, dans un espace de temps déterminé (généralement 96 h), entraîne la mort de 50 % des organismes soumis aux essais. La CL<sub>50</sub> est souvent spécifiée en milligrammes par litre ou parts par million (ppm).

## **ANNEXE 3 Classification MARPOL**

### **ANNEXE NOUVELLE CLASSIFICATION DES SUBSTANCES LIQUIDES NOCIVES**

#### **Révision de l'annexe II de la classification MARPOL (OMI, 2005)**

Cette révision, adoptée en octobre 2004, inclut une nouvelle classification sur les dangers des substances liquides nocives transportées par voie maritime et entrera en vigueur le 1<sup>er</sup> janvier 2007.

Ces nouvelles catégories sont :

**Catégorie X** – Substances liquides nocives qui, si elles sont rejetées à la mer lors d'opérations de nettoyage des citernes ou de déballastage, présentent un risque grave pour les ressources marines ou pour la santé de l'homme et qui justifient leur interdiction de déversement dans le milieu marin.

**Catégorie Y** – Substances liquides nocives qui, si elles sont rejetées à la mer lors d'opérations de nettoyage des citernes ou de déballastage, présentent un risque pour les ressources marines ou pour la santé de l'homme ou nuisent sérieusement à l'agrément des sites ou aux autres utilisations légitimes de la mer et qui justifient une limitation qualitative et quantitative de leur déversement dans le milieu marin.

**Catégorie Z** – Substances liquides nocives qui, si elles sont rejetées à la mer lors d'opérations de nettoyage des citernes ou de déballastage, présentent un risque mineur pour les ressources marines ou pour la santé de l'homme ou nuisent sérieusement à l'agrément des sites ou aux autres utilisations légitimes de la mer et qui justifient une restriction qualitative et quantitative de leur déversement dans le milieu marin.

**Autres catégories** – Substances liquides évaluées mais non prises en compte par les autres catégories X, Y et Z car, si elles sont rejetées à la mer lors d'opérations de nettoyage des citernes ou de déballastage elles ne présentent pas de risque pour les ressources marines ou pour la santé de l'homme.

La révision de cette annexe est basée sur la modification d'autres classifications telles que la classification GESAMP et peut entraîner la révision de la classification IBC.

## ANNEXE 4 Classification SEBC : (European Behaviour Classification System)

La classification « SEBC » est établie en fonction des paramètres suivants :

### La densité :

Un produit déversé en mer flotte si sa densité est plus faible que celle de l'eau de mer, sinon il coule.

### La pression de vapeur :

La pression de vapeur est utilisée seulement pour les liquides. Au-dessous de 0.3 kpa, une substance flottante ne s'évapore pas. Au-dessus de 3 kpa, l'évaporation est rapide. Une substance dissoute s'évapore si la pression de vapeur est supérieure à 10 kpa.

### La solubilité :

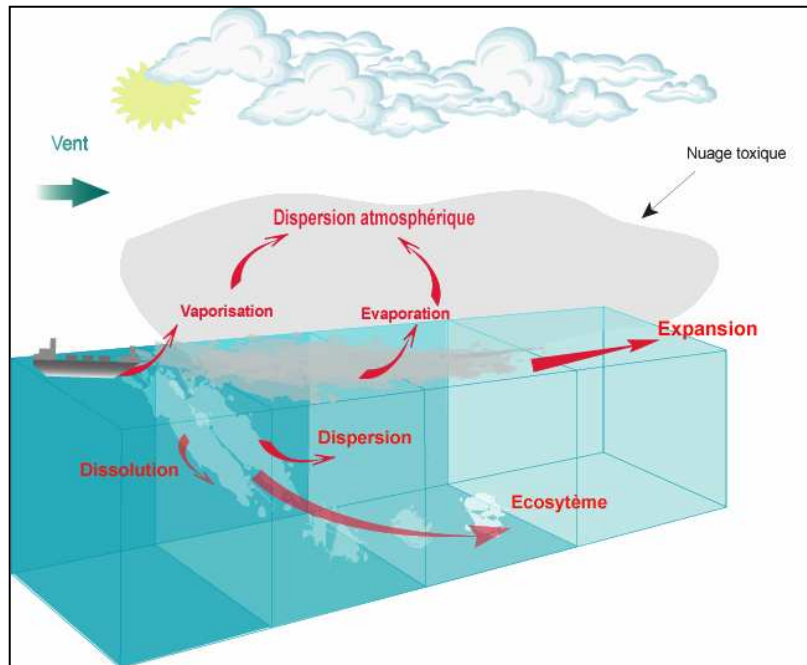
La solubilité est la quantité maximale d'un corps pouvant être dissoute par litre d'un solvant donné. Les substances sont considérées comme insolubles quand la solubilité est inférieure à 10 g.L<sup>-1</sup> pour les liquides et 100 g.L<sup>-1</sup> pour les solides. Le procédé de dissolution est prédominant au-delà d'une solubilité de 50 g.L<sup>-1</sup> pour les liquides et de 1000 g.L<sup>-1</sup> pour les solides.

### La viscosité :

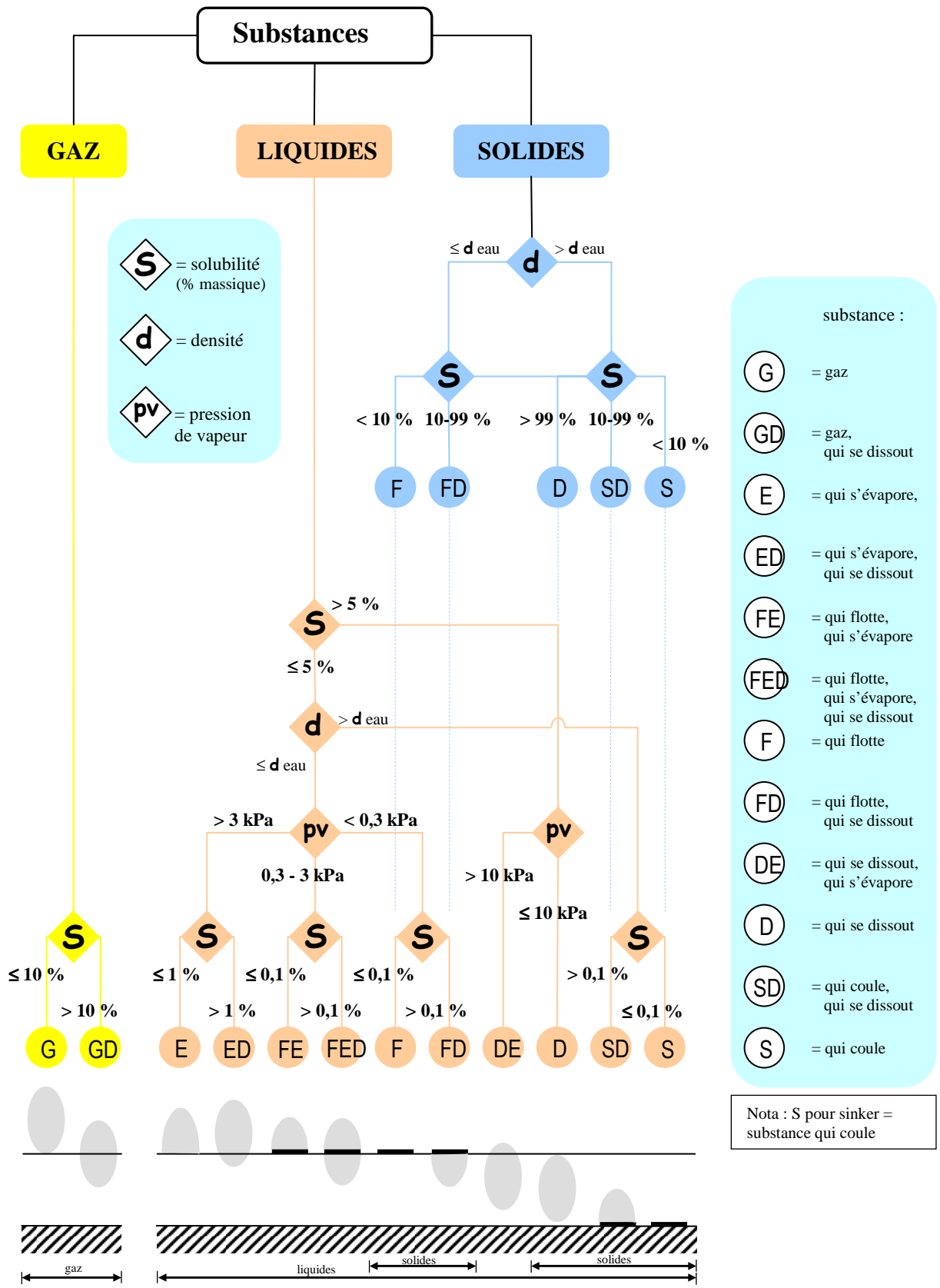
Le paramètre de viscosité est utilisé pour différencier les liquides flottants, ne se prêtant pas à une évaporation rapide, ou qui se dissolvent (caractérisés par une viscosité inférieure à 10 cSt), des produits flottants persistants (dont la viscosité est supérieure à 10 cSt).

Suivants la valeur de leurs propriétés physico-chimiques, les produits sont répartis en 12 groupes :

Groupe principal		Sous-groupe	
G	Gaz	GD	Gaz / Qui se dissout
E	Evaporateur	ED	Evaporateur / Qui se dissout
F	Flotteur	FE	Flotteur / Evaporateur
		FD	Flotteur / Qui se dissout
		FED	Flotteur / Evaporateur / Qui se dissout
D	Qui se dissout	DE	Qui se dissout / Evaporateur
S	Qui coule	SD	Qui coule / Qui se dissout



Evaluation du risque pour le personnel d'intervention aéroporté lors d'accidents maritimes impliquant des substances dangereuses évaporantes



## **ANNEXE 5 NOMENCLATURE NST/R**

### **Nomenclatures: NST/R**

#### **Standard goods classification for transport statistics**

##### **Codes and descriptions**

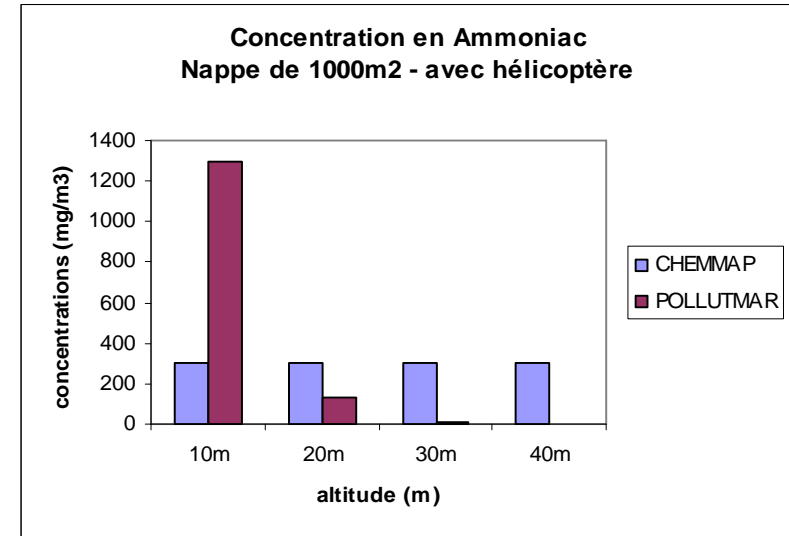
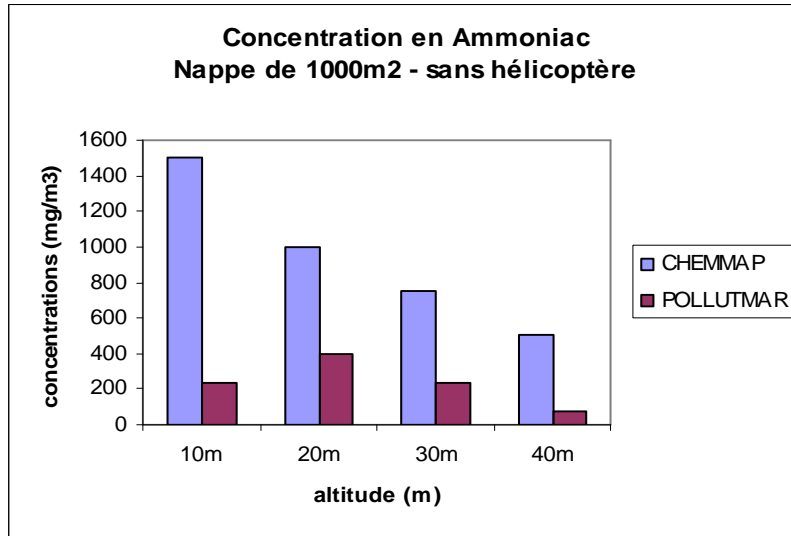
Groups of goods	NST/R Chapter	NST/R groups	Description
1	0	01	Cereals
2		02, 03	Potatoes, other fresh or frozen fruit and vegetables
3		00, 06	Live animals, sugar beet
4		05	Wood and cork
5		04, 09	Textiles, textile articles and man-made fibres, other raw animal and vegetable materials
6	1	11, 12, 13, 14, 16, 17	Foodstuffs and animal fodder
7		18	Oil seeds and oleaginous fruits and fats
8	2	21, 22, 23	Solid mineral fuels
9	3	31	Crude petroleum
10		32, 33, 34	Petroleum products
11	4	41, 46	Iron ore, iron and steel waste and blast furnace dust
12		45	Non-ferrous ores and waste
13	5	51, 52, 53, 54, 55, 56	Metal products
14	6	64, 69	Cement, lime, manufactured building materials
15		61, 62, 63, 65	Crude and manufactured minerals
16	7	71, 72	Natural and chemical fertilizers
17	8	83	Coal chemicals, tar
18		81, 82, 89	Chemicals other than coal chemicals and tar
19		84	Paper pulp and waste paper
20	9	91, 92, 93	Transport equipment, machinery, apparatus, engines, whether or not assembled, and parts thereof
21		94	Manufactures of metal
22		95	Glass, glassware, ceramic products
23		96, 97	Leather, textile, clothing, other

**ANNEXE 6 COMPARAISON DES RESULTATS POLLUTMAR  
ET CHEMMAP SUR LE DEVELOPPEMENT VERTICAL D'UN  
NUAGE TOXIQUE**

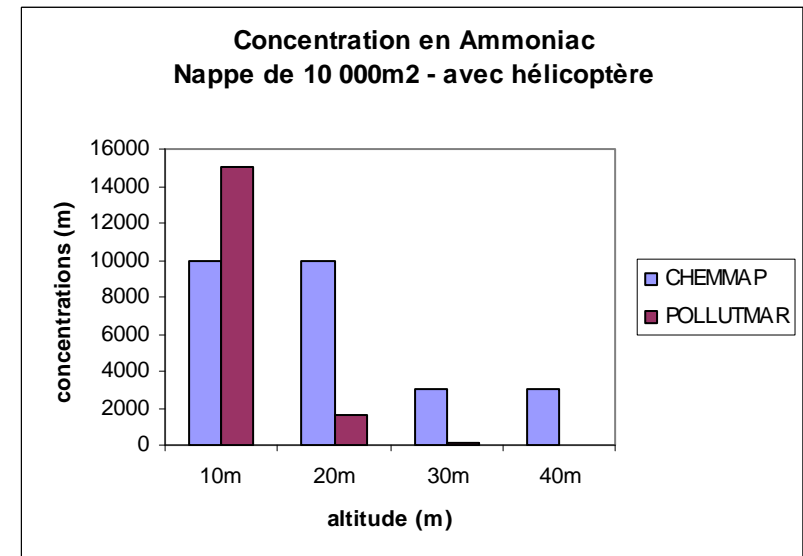
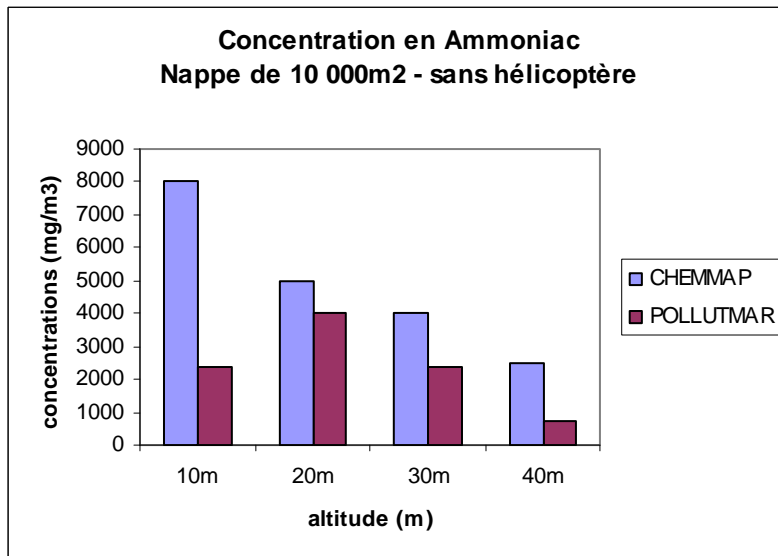


# AMMONIAC

## NAPPE DE 1000 m2

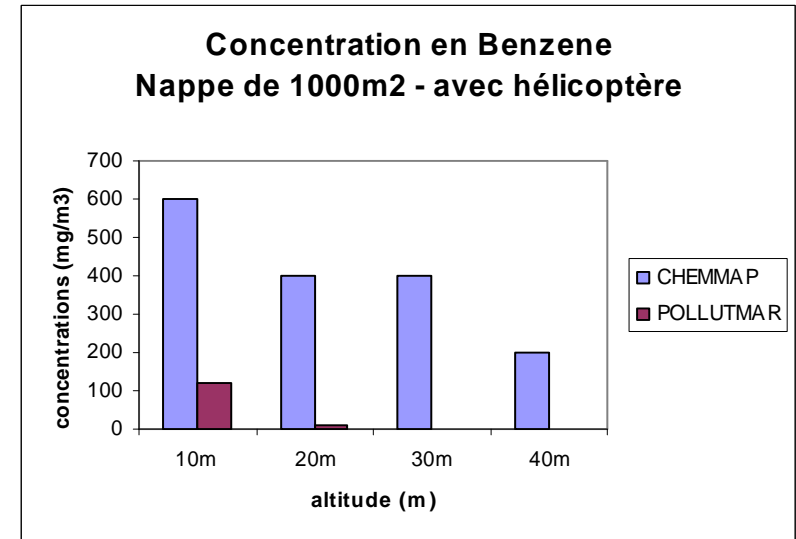
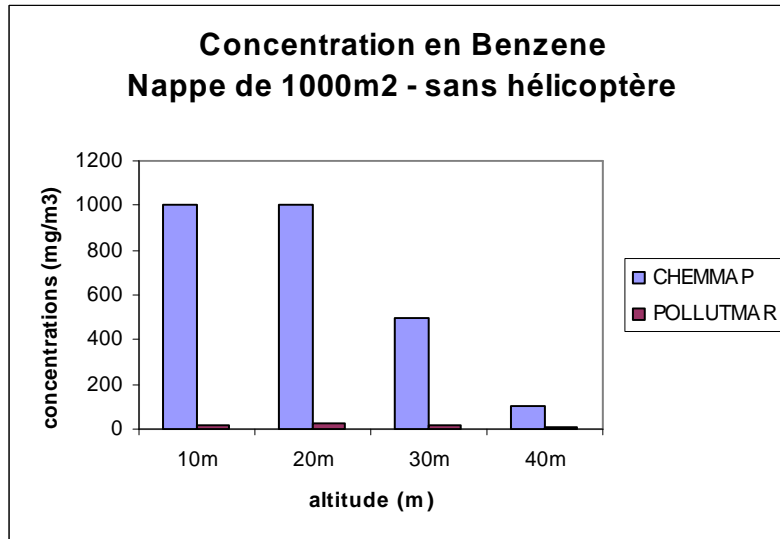


## NAPPE DE 10 000 m2

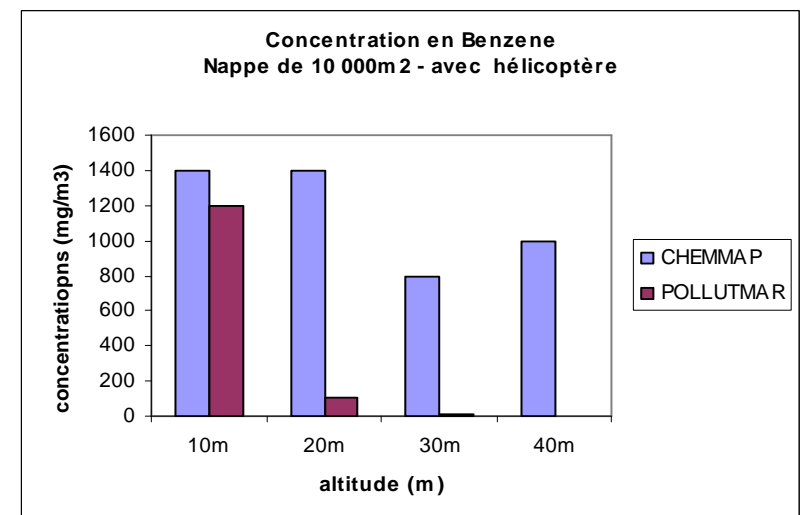
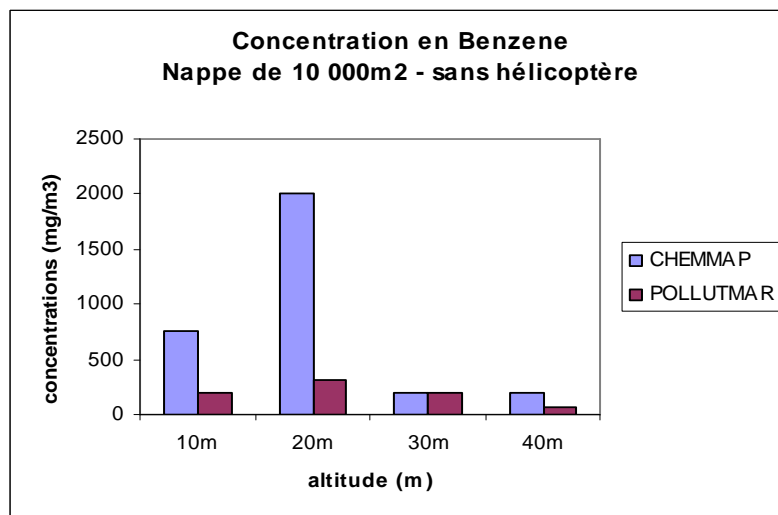


# BENZENE

## NAPPE DE 1000 m<sup>2</sup>

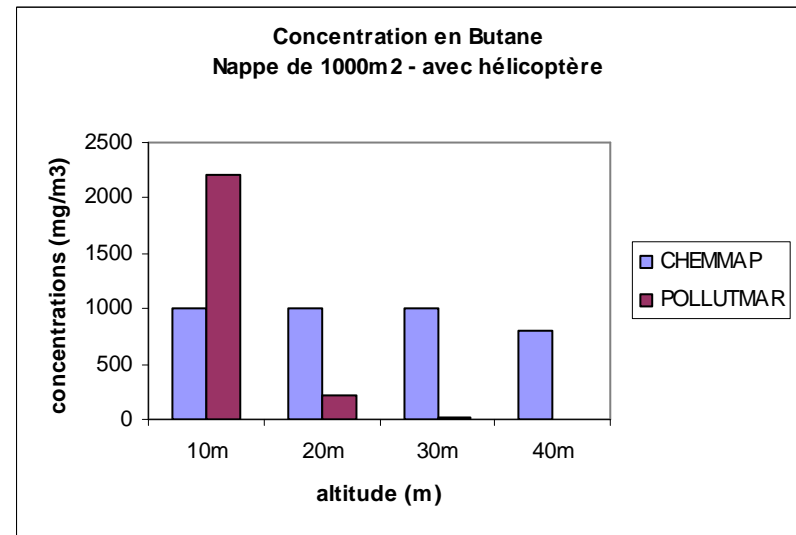
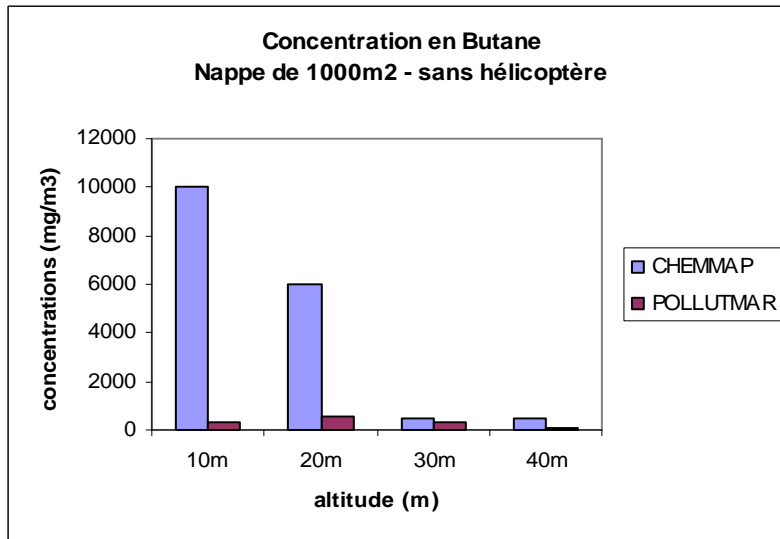


## NAPPE DE 10 000 m<sup>2</sup>

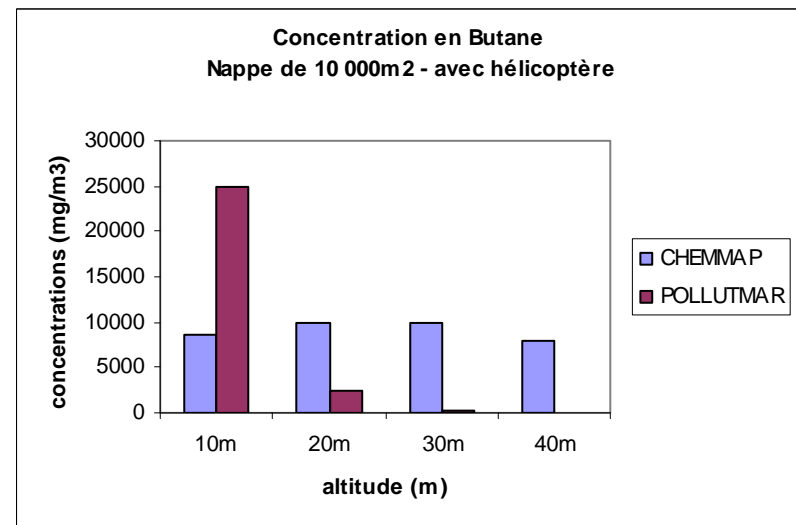
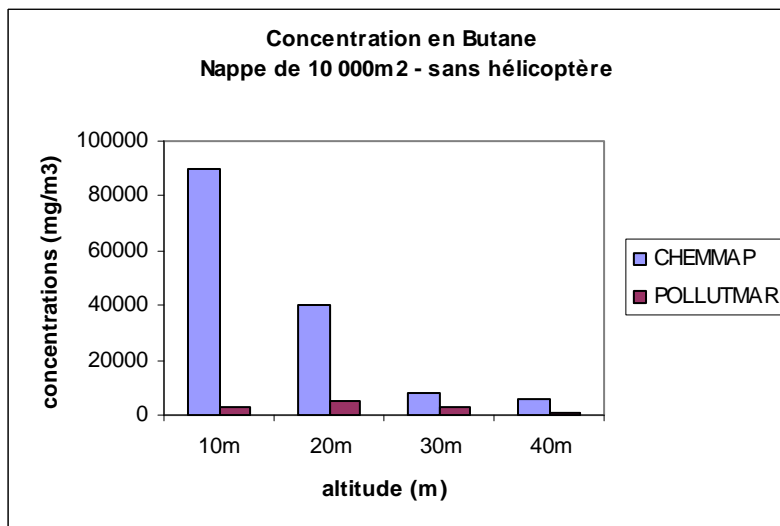


# BUTANE

## NAPPE DE 1000 m<sup>2</sup>

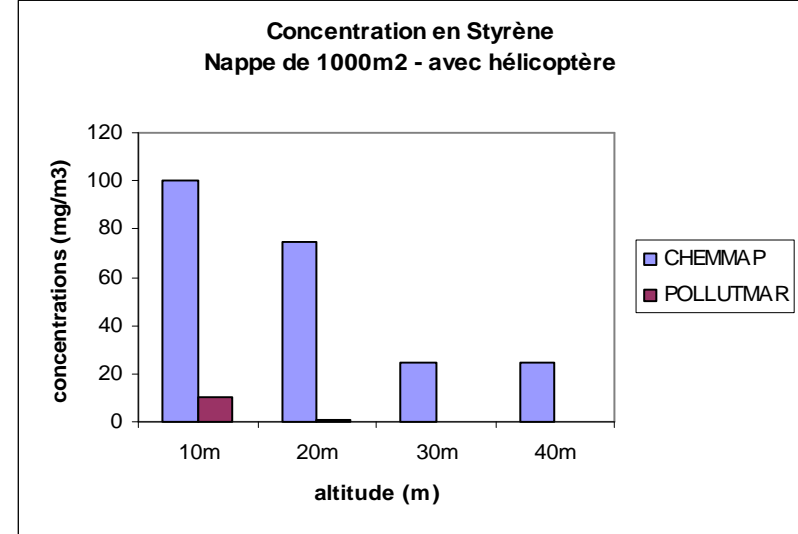
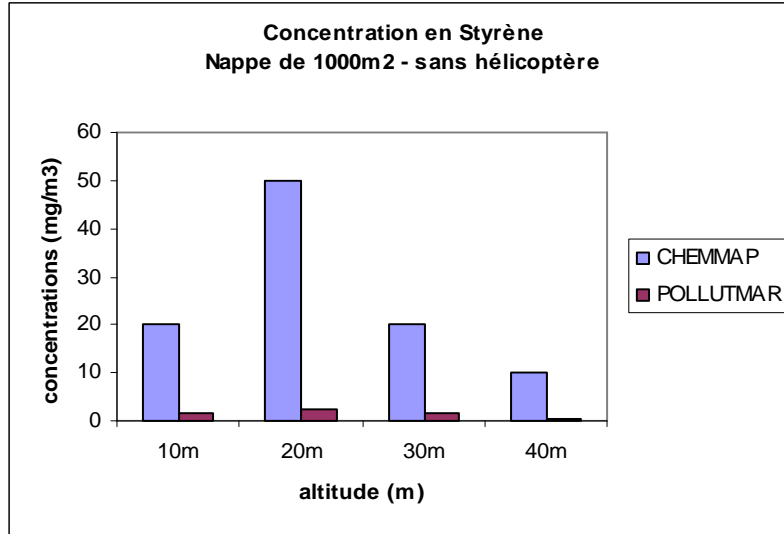


## NAPPE DE 10 000 m<sup>2</sup>

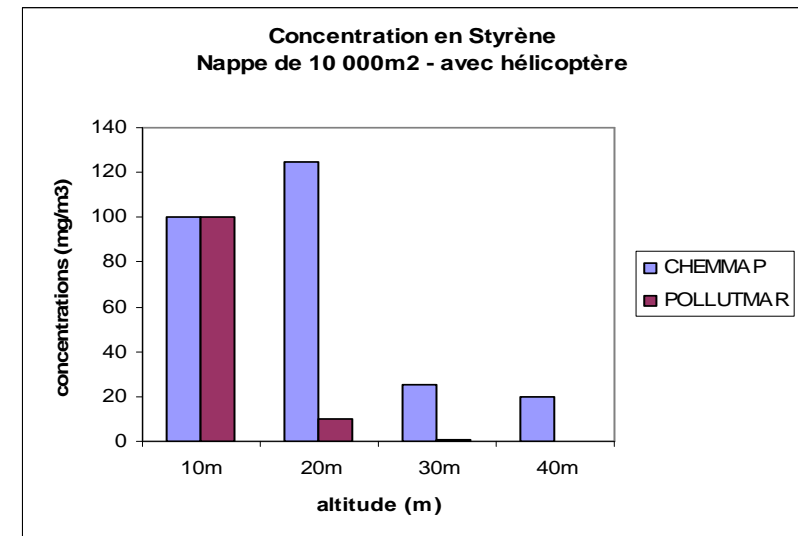
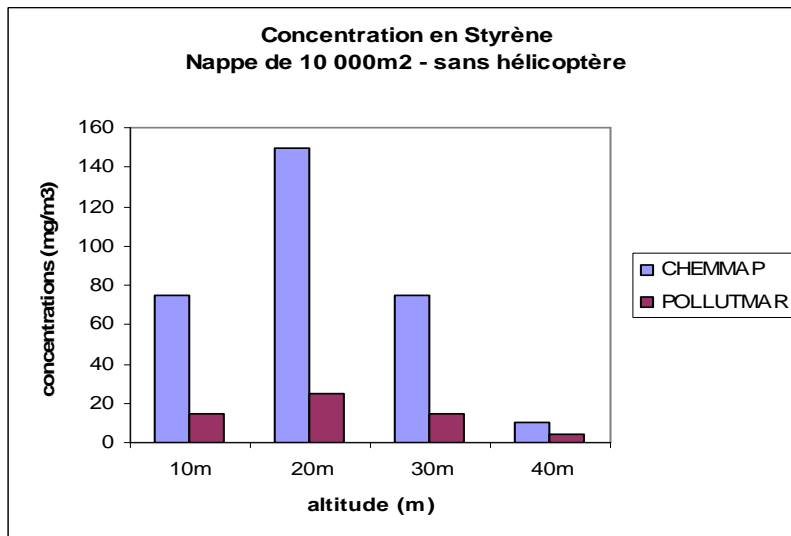


# STYRENE

## NAPPE DE 1000 m<sup>2</sup>



## NAPPE DE 10 000 m<sup>2</sup>



# CONCLUSION

## CONCLUSION DE LA TACHE 2

Au terme de cette Tâche 2 attribuée aux simulations et aux expérimentations destinées à mieux comprendre le comportement des gaz liquéfiés et des substances évaporantes, nous avons pu lever des incertitudes et mettre en évidence des lacunes dans la connaissance de certains mécanismes fondamentaux.

Comme nous pouvions nous y attendre, les modèles les plus simples de dispersion atmosphérique (CHEMMAP, ALOHA) prennent en compte un coefficient de sécurité important par rapport aux modèles plus complexes tels PHAST et EVOLCODE. MERCURE dans un autre registre, majore également les zones dangereuses (GNL uniquement), par rapport à PHAST.

Ces modélisations donnent des résultats qui ne prennent pas en compte une quelconque réaction du produit avec l'eau de mer ou la pluie telle qu'elle peut être imaginée avec un gaz soluble tel l'ammoniac, dont les modèles donnent des zones dangereuses très importantes. Il est certain que des expérimentations sur ces produits dangereux permettraient de lever ces inconnues mais ceci nécessiterait un équipement (labo, pilote) spécifique et très onéreux.

Le couplage entre deux modèles -champ proche avec PHAST et champ lointain avec PERLE- est bénéfique à la précision des résultats. Reste à rendre opérationnel ce couplage, ainsi que celui de MOTHY (dérive surfacique) et de PERLE.

Les expérimentations en bassin sur des produits réfrigérés inertes ont permis d'observer « *in situ* » les étapes de l'évaporation, même si les processus (influence des vagues notamment) restent très mal connus et en tout cas non expliqués et non pris en compte par les algorithmes des modèles actuels. De même, le cône de mélange observé sous la surface de l'eau a une influence directe sur les caractéristiques du nuage dans le champ proche. Ce phénomène n'est pas pris en compte dans les modèles et mériterait d'être creusé.

D'un point de vue opérationnel, thème qui sera l'objet de la tâche 3, les zones dangereuses n'ont pas de rapport direct avec la zone visible du fait de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. L'approche par aéronefs des navires montrant des fuites avérées de produits toxiques tels l'ammoniac ou le chlorure de vinyle monomère est remise en cause par les résultats des modélisations et des expérimentations Pollutmar (1990). Cependant ici aussi de nouvelles données de terrain s'avèrent être indispensables du fait de l'évolution des techniques de détection en particulier.

Cedre  
715, rue Alain Colas, CS 41836  
29218 BREST CEDEX 2 - FRANCE

Tél : 33 (0)2 98 33 10 10  
Fax : 33 (0)2 98 44 91 38  
Courriel : [contact@cedre.fr](mailto:contact@cedre.fr)  
Internet : <http://www.cedre.fr>

Références du contrat : Convention ANR 0594C0065

# GALERNE

## TACHE 3 : LES METHODES D'INTERVENTION

**Coordonné par :**  
Fanch Cabioc'h

Validé

**Relu par :**  
Xavier Kremer

Validé

**Contrôlé par :**  
Georges Peigné,  
Adjoint au Directeur

Validé

**Mots clefs :** Fiches-intervention ; Détection à distance ; Transmission ; Données ; Cartographie internet.

**Nombre de pages :** 77

**Diffusion : Envoi informatique**

-Total Gaz  
-TPC  
-DSC  
-Météo France  
-Bureau Véritas  
-BEA Mer  
-INERIS  
-GDF Suez

Marine Nationale:  
-Ceppol  
-Marins-Pompiers  
-Service Environnement Marine nationale.

**Classement / copies internes :**  
INTERVENTION, DOCUMENTATION

*Références Cedre, date : R.09.46.C / 3278, octobre 2009.*



## **TÂCHE 3**

### **LES METHODES D'INTERVENTION**



## RÉSUMÉ OPÉRATIONNEL

La Tâche 3 de GALERNE consacrée aux méthodes d'intervention met à disposition des intervenants les « fiches-intervention » relatives à l'intervention **d'urgence** en mer sur quelques gaz liquides et deux substances liquides évaporantes.

Il s'agit des substances suivantes :

- Gaz Naturel Liquéfié (GNL)
- Propane
- Ethylène
- Ammoniac
- Chlorure de Vinyle Monomère (CVM)
- Benzène
- Xylènes

Le choix de ces produits découle directement des scénarios définis dans la Tâche 1.

Ces fiches sont précédées d'une « Fiche-Généralités » destinée à recueillir le maximum d'informations pertinentes sur le navire et l'accident, afin d'aborder toute la chaîne d'intervention dans les conditions optimales ;

- Envoi d'une Equipe Evaluation Intervention (EEI)
- Composition de l'EEI
- Conditions de sécurité de l'EEI,
- Zones d'exclusion
- Possibilités d'atteinte des populations côtières.

La fiche « moyens disponibles » n'a pas donné lieu à des commentaires particuliers faute de temps pour réaliser une étude critique approfondie de ces moyens en adéquation avec la problématique des gaz liquéfiés et des produits liquides évaporants.

Ce travail restera cependant à compléter au vu des nouveaux moyens de détection autonomes disponibles sur le marché, des possibilités de traitement des données à bord du navire commandant des opérations sur zone », de transfert de ces données par satellite vers un PC à terre pour être incluses dans un système cartographique complet transférable par Internet.

## SOMMAIRE

<b>3-1 Fiches matériels disponibles</b> .....	<b>1</b>
<b>3-2 Fiches intervention sur navires</b> .....	<b>4</b>
<b>3-3 Mise à disposition des données : outil de cartographie dynamique sur internet</b> .....	<b>61</b>
<b>3-4 Conclusion</b> .....	<b>77</b>

## GALERNE – TÂCHE 3

### **3-1 FICHES MATÉRIELS DISPONIBLES**

## 3-1.1 FICHE MATERIELS

Les matériels sont regroupés en fonction du type d'intervention. Pour un même type d'intervention, les matériels sont regroupés en lot afin d'être projetés plus facilement sur le lieu d'intervention. Ce principe est celui utilisé par les Marins Pompiers de Brest.

Nom équipement	Code Lot
<b>Evaluation chimique</b>	
Navire en avarie transportant des matières dangereuses	
Pas de rejet extérieur	
Appareils respiratoires	A
Bouteilles de recharge pour ARI	A
Maques A3P avec cartouches de combat	A
Sous-vêtements coton	B
Tenues de proximité	B
Tenues GRII SOL	B
Tenues TYVECK	B
Documentation + Ordinateur	C
Matériel de détection	C
Matériel de prélèvement	C
Poste de transmission	C
Trousse à outils	C
<b>Intervention chimique</b>	
Navire en avarie transportant des matières dangereuses	
Suspicion de rejet extérieur	
Matériel de décontamination	D
Nourrices d'air MATISEC	D
Appareils respiratoires	A
Bouteilles de recharge pour ARI	A
Maques A3P avec cartouches de combat	A
Sous-vêtements coton	B
Tenues de proximité	B
Tenues GRII SOL	B
Tenues TYVECK	B
Documentation + Ordinateur	C
Matériel de détection	C
Matériel de prélèvement	C
Poste de transmission	C
Trousse à outils	C
<b>Feu</b>	
Incendie à bord du navire	
Collecteur incendie en service	
Caméra thermique	E
Poste de transmission	E
Appareil respiratoire Triplair avec recharges	E
Caisse outillage	F
Commandes	F
Matériel d'explosimétrie	F
Trousse de 1er secours	F
Bidons émulseur	G
Inhalateur O2	G
Cordage	H
Equipements individuels (tenue intervention sécurité feu + sous vêtements coton)	H
Filet avec mousquetons	H
GMF (Groupe Moyen Foisonnement)	H
Lance TURBO PONS	H
Lance ULTIMATIC + Embout BF (Bas Foisonnement) MF (Moyen Foisonnement)	H
Manchon DN 45 mm x 2 m	H
Paires de botte	H
Pièces de jonction	H
Prémélangeur 200 l/min	H
Projecteurs portatifs	H
Raccords NATO ANGLAIS	H
Appareil respiratoire Triplair avec recharges	H
Tuyau DN 45 mm x L 20 m	H
Tuyau DN 70 mm x L 20 m	H

Nom équipement	Code Lot
Feu + Pompage Incendie à bord Collecteur incendie hors service	
Caméra thermique	E
Poste de transmission	E
Appareil respiratoire Triplair avec recharges	E
Caisse outillage	F
Commandes	F
Matériel d'explosimétrie	F
Trousse de 1er secours	F
Bidons émulseur	G
Inhalateur O2	G
Moto-pompe incendie 500 l/min à 10 bars	I
Jerrycan 20 l gasoil	J
Tuyau DN 70 mm x L 20 m	J
Electropompe	K
Groupe électrogène	K
Commandes	L
Tuyau d'aspiration DN 70 avec crépine	L
Cordage	H
Equipements individuels (tenue intervention sécurité feu + sous vêtements coton)	H
Filet avec mousquetons	H
GMF (Groupe Moyen Foisonnement)	H
Lance TURBO PONS	H
Lance ULTIMATIC + Embout BF (Bas Foisonnement) MF (Moyen Foisonnement)	H
Manchon DN 45 mm x 2 m	H
Paires de botte	H
Pièces de jonction	H
Prémélangeur 200 l/min	H
Projecteurs portatifs	H
Raccords NATO ANGLAIS	H
Appareil respiratoire Triplair avec recharges	H
Tuyau DN 45 mm x L 20 m	H
Tuyau DN 70 mm x L 20 m	H
Matériel éclairage	M
Epuisement lourd Voie d'eau importante Débit > 30 m3/h	
Jerrycan 20 l gasoil	J
Tuyau souple DN 70 x 20 m	J
Electropompe FLYGT 40 m3/h	N
Groupe électrogène 9 kVa	N
Rallonge 50 m	N
Moto-pompe d'épuisement 55 m3/h	O
Projecteurs portatifs	L
Tuyau d'aspiration DN 70 avec crépine	L
Bidons de ciment prompt	P
Caisse outillage	P
Cloche à étrier	P
Coins	P
Etais	P
Jeu de paillets COLOMES	P
Jeu de plaques à fissures	P
Plaques pliantes	P
Tampons simples ou double	P

## **3-2 LES FICHES - INTERVENTION SUR NAVIRES**

## 3-2.1 FICHE GENERALITES

### NAVIRE

Informations TRAFIC 2000			
Nom navire		MMSI	
Indicatif d'appel		Pavillon	
OMI		Type Commerce	
Immatriculation		Type Flotteur	
M.D.		POB	
Latitude		Longitude	
Cap		Vitesse	
Remorque			
Type de remorque		Identifiant de remorque	
Longueur de remorque			

### ACCIDENT



QUESTIONS TYPES			
Contexte préalable			
Parlez-vous français ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Quelqu'un parle-t-il français ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Accident / Description générale			
Type accident ?	Fuite <input type="checkbox"/>	Incendie <input type="checkbox"/>	Explosion <input type="checkbox"/>
	Collision <input type="checkbox"/>	Echouement <input type="checkbox"/>	Envahissement <input type="checkbox"/>
Heure du sinistre (GMT)			
Commentaire sur l'accident			
Accident / Conséquence vis-à-vis du navire			
Stabilité / flottabilité du navire menacée ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Apte à manœuvrer ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Alimentation électrique	Alimentation normale ?	Oui	Non <input type="checkbox"/>
	Groupe de secours ?	Oui	Non <input type="checkbox"/>
Information stockage			
Quantité totale transportable		tonne	<input type="checkbox"/> m <sup>3</sup>
Quantité transportée		tonne	<input type="checkbox"/> m <sup>3</sup>
Quantité de la plus grosse capacité impactée		tonne	<input type="checkbox"/> m <sup>3</sup>
Etat physique des produits stockés ?	Solide	<input type="checkbox"/>	Liquide <input type="checkbox"/>
	Gaz liqu. cryogéné	<input type="checkbox"/>	Gaz liqu. sous pression <input type="checkbox"/>
Mode de stockage des produits ?		Conteneur	<input type="checkbox"/> Gazeux <input type="checkbox"/>
			Vrac <input type="checkbox"/>
Nombre capacités endommagés			
Plus grosse capacité impactée ?	Vide nettoyée	<input type="checkbox"/>	Vide non nettoyée <input type="checkbox"/>
			Pleine <input type="checkbox"/>
Information générale sur la gestion du sinistre			
Nombre de victimes			
Nationalité(s) des victimes			
Combien de personnes évacuées ?			
Et par quels moyens ?			
Personnel sur place pour guider intervention externe ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>
Possibilité de confinement de la zone sinistrée ?	Oui	<input type="checkbox"/>	Non <input type="checkbox"/>

# ACCIDENT

QUESTIONS TYPES									
Information en cas de fuite									
Observation suite à fuite ?			Explosion ?	Oui	<input type="checkbox"/>			Non	<input type="checkbox"/>
			Flamme ?	Oui	<input type="checkbox"/>			Non	<input type="checkbox"/>
Localisation de la fuite ?			Citerne					Canalisation	
Fuite / ligne de flottaison ?			Au-dessous					Au-dessus	
Fuite en phase ?			Solide	<input type="checkbox"/>	Liquide	<input type="checkbox"/>	Gaz	<input type="checkbox"/>	
Destination de la fuite			Interne au navire ?		Oui	<input type="checkbox"/>			Non
			Sur pont ?		Oui	<input type="checkbox"/>			Non
			A la mer ?		Oui	<input type="checkbox"/>			Non
			A l'atmosphère ?		Oui	<input type="checkbox"/>			Non
Taille de la fuite ?	Données qualitatives		Goutte à goutte		<input type="checkbox"/>	Filet			Rupture franche
	Données quantitatives		Surface		mm	cm	m	pouce	
			Diamètre		mm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	dm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	
Capteurs à dispositions ?									
Si capteurs : localisation									
Si capteurs : valeurs mesurées									
Information en cas d'incendie / gestion des fumées									
Localisation de l'incendie									
Intervention en cours ?									
Si oui, de quel type ?									
Risques de propagation du sinistre ?									
Ventilateurs de surpression à disposition ?									
Collecteur incendie alimenté ?									
Cheminement des fumées									
Identification des accès au point d'attaque									
Météo sur zone									
Couverture nuageuse ?									
Force et direction du vent									
Vent établi ou rafales ?									
Correspondance avec classe météo des fiches intervention									
Mer									
Etat de la mer									
Houle (direction et hauteur)									
T° de l'eau (°C)									
Profondeur (m)									
Distance à la côte (mille)									
Vitesse et direction du courant									



## CARGAISON

Localisation cargaison endommagée et schéma sommaire des capacités	
Position Longitudinale	
	
Position Latérale	
	
Précisions supplémentaires	
Tirant d'eau (m)	
Tirant d'air (m)	

Identification substance			
Nom			
Nom commercial		Product Name (Angl)	
Synonymes		Nom chimique	
Numéro d'identification			
N° CAS		CODE ONU	
N° EINECS		Classification MARPOL	
Classification SEBC	G <input type="checkbox"/> GD <input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> FD <input type="checkbox"/>	E <input type="checkbox"/> ED <input type="checkbox"/> DE <input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/>	FE <input type="checkbox"/> FED <input type="checkbox"/> SD <input type="checkbox"/> S <input type="checkbox"/>
Etat physique substance étudiée	Solide <input type="checkbox"/> Gaz liquéfié cryogéné <input type="checkbox"/>	Liquide <input type="checkbox"/> Gaz liquéfié. sous pression <input type="checkbox"/>	Gazeux <input type="checkbox"/>

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
Indice (1 à 4)					
0 : Pas ou très peu de danger / 1 : Peu dangereux / 2 : Dangereux / 3 : Très dangereux / 4 : Excessivement dangereux					

Code du travail					
E - Explosif <input type="checkbox"/>	F - Facilement inflammable <input type="checkbox"/>	T - Toxique <input type="checkbox"/>	Xi - Irritant <input type="checkbox"/>	Xi - Irritant <input type="checkbox"/>	Nature des risques particuliers (phrases R) :
F+ - Extrêmement inflammable <input type="checkbox"/>	T+ - Très toxique <input type="checkbox"/>	Xn - Nocif <input type="checkbox"/>	C - Corrosif <input type="checkbox"/>	N - Dangereux pour l'environnement <input type="checkbox"/>	Conseils de prudence (phrases S) :

Transport						
N°1* Explosif <input type="checkbox"/>	N°2 Gaz non inflammable <input type="checkbox"/>	N°2 Gaz inflammable <input type="checkbox"/>	N°3 Liquide inflammable <input type="checkbox"/>	N°4.1 Solide inflammable <input type="checkbox"/>	N°4.2 Inflammable spontanément <input type="checkbox"/>	N°4.3 Hydroréactif <input type="checkbox"/>
N°5 Comburant <input type="checkbox"/>	N°6.1 Toxique <input type="checkbox"/>	N°6.2 Infectieux <input type="checkbox"/>	N°7 Radioactif <input type="checkbox"/>	N°8 Corrosif <input type="checkbox"/>	N°9 Divers <input type="checkbox"/>	Chaud <input type="checkbox"/>

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP		Code fiche CHRIS MANUAL	
N°fiche CANUTEC		N°fiche INRS	
Code fiche IMDG			

Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

Explication cotation NFPA		
<b>Health - Blue</b>		
4	<b>Danger</b>	May be fatal on short exposure. Specialized protective equipment required.
3	<b>Warning</b>	Corrosive or toxic. Avoid skin contact or inhalation.
2	<b>Warning</b>	May be harmful if inhaled or absorbed.
1	<b>Caution</b>	May be irritating.
0		No unusual hazard.
<b>Flammability - Red</b>		
4	<b>Danger</b>	Flammable gas or extremely flammable liquid.
3	<b>Warning</b>	Flammable liquid flash point below 38 C.
2	<b>Caution</b>	Combustible liquid flash point between 38 and 93 C.
1		Combustible if heated.
0		Not combustible.
<b>Reactivity - Yellow</b>		
4	<b>Danger</b>	Explosive material at room temperature.
3	<b>Danger</b>	May be explosive if shocked, heated under confinement or mixed with water.
2	<b>Warning</b>	Unstable or may react violently if mixed with water.
1	<b>Caution</b>	May react if heated or mixed with water but not violently
<b>Special Notice - White</b>		
W	Water Reactive.	W
OXY	Oxidizing Agent.	OXY

Classification SEBC												
	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	G	GD	E	ED	FE	FED	F	FD	DE	D	SD	S
Atmosphère												
Surface												
Fond												


## 3-2.2 FICHE GNL


**PRODUIT : FICHE INFORMATION**  
**GNL Produit et Scénario**

**FAMILLE : GNL**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	METHANE LIQUIDE (Réfrigéré)	Product Name (Angl)	Methan Liquid (refrigerated)
Synonymes	GNL	Nom chimique	Méthane
Numéro d'identification			
N°CAS	74-82-8	CODE ONU	1972
N°EINECS	200-812-7		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
	■	■	■	■	■
Indice (1 à 4)	1 (peu dangereux)	4 (Excessivement dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	0 (Pas ou très peu de danger)	3 (Très dangereux)

Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
 F+ - Extrêmement inflammable	Nature des risques particuliers (phrases R) :
	Conseils de prudence (phrases S) :
	R12 : Extremely flammable. S2 : Keep out of the reach of children. S9 : Keep container in a well-ventilated place. S16 : Keep away from sources of ignition - No smoking. S33 : Take precautionary measures against static discharges.

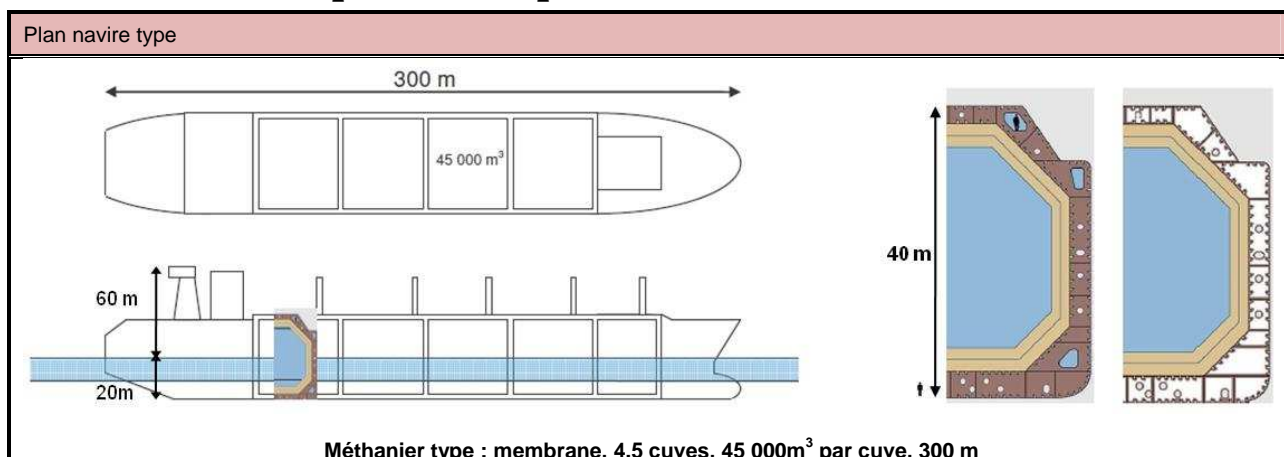
Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
	N°2 Gaz inflammable	223	Gaz réfrigérés inflammables

**Risque spécifique lié au transport maritime**

Le LNG est transporté liquide à une température de -162°C. Déversé en mer il se vaporise très rapidement. En cours de vaporisation, le gaz froid est plus lourd que l'air et partiellement visible du fait de la condensation de l'humidité atmosphérique (couleur blanche). Le produit froid se déversant dans l'eau peut provoquer des explosions froides (Transition Rapide de Phase). L'eau se déversant dans une cuve va entraîner une vaporisation rapide (TRP) du liquide dans la cuve provoquant une surpression interne potentiellement destructrice (1m<sup>3</sup> liquide = 630 m<sup>3</sup> gaz). Risque de fragilisation des coques acier au contact du liquide.

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP	1972a	Code fiche CHRIS MANUAL	LNG
N°fiche CANUTEC	115	N°fiche INRS	-
Code fiche IMDG	F-D ; S-U		

## 1 Caractéristiques techniques du navire



Informations techniques générales utiles	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargaison transportée en légère surpression par rapport à la pression atmosphérique (pression maximum de service : en général 0,25 bar, pouvant aller jusqu'à 0.7 bar)</li> <li>• Vapeurs de cargaison utilisées comme combustible dans les chaudières du navire ou dans des moteurs pouvant brûler du gaz naturel. Nécessite des compresseurs, des évaporateurs et des tuyauteries pour amener le gaz jusqu'aux locaux de machines. Certains méthaniers sont cependant équipés d'installations de reliquéfaction implantées dans la tranche de cargaison.</li> <li>• En général, 4 à 5 citernes indépendantes sphériques ou citernes prismatiques à membranes pour une capacité de transport totale entre 75 000 m3 et 270 000 m3</li> <li>• Double-fonds, double-coque et ballast latéraux</li> <li>• L'isolation thermique est située à l'extérieur des citernes indépendantes (sphères) et à l'intérieur de la structure des citernes pour les navires à membranes.</li> </ul>	
Informations techniques particulières	

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	CH4 / CH4	Densité de vapeur relative	0,6
Masse molaire	16 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	Du monoxyde de carbone peut se former par combustion incomplète
Etat physique (à 20°C)	Gaz	Comportement en cas de	<ul style="list-style-type: none"> <li>• choc</li> <li>• contact avec l'air</li> <li>• contact avec l'eau</li> </ul>
Etat physique transporté	Gaz liquéfié réfrigéré		
Couleur	Incolore		Pas de réaction
Odeur	Inodore		Pas de réaction
pH			Flotte et bout sur l'eau
Température d'ébullition	-161 °C	Matières incompatibles : Oxygène et autres comburants Réactions chimiques dangereuses (explosion) avec : brome ; trifluorure d'azote ; oxygène liquide ; chlore (oxyde mercurique jaune) ; pentafluorure de brome ; tétrafluoroborate de dioxygène ; trifluorure de chlore ; fluor liquide ; difluorure de dioxygène ; difluorure de trioxygène ; heptafluorure d'iode	
Point éclair	-188°C		
Température d'auto-ignition	595°C		
Limites d'explosivité (air)	5 % -15 %		
Tension de vapeur	Non applicable		
Densité liquide relative à 20°C	0,42		
Solubilité dans l'eau	Pratiquement insoluble		
Classification SEBC	G (Gaz)		

TOXICITE		
Sur l'homme		
Effets sur l'homme	Gaz très peu toxique : asphyxiant et faiblement narcotique	
Voies d'exposition	Inhalation	En s'échappant de son contenant, ce gaz peut provoquer l'asphyxie par réduction de la teneur en oxygène de l'air à l'intérieur d'un espace confiné (anoxie)
	Peau	La faible température du liquide peut provoquer des gelures
	Ingestion	
Sur l'environnement		
Classification MARPOL	NR	
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 0,65 mg.m <sup>-3</sup> ) Origine des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N°DRC-08-94398-02798A		
Effets létaux (SEL 1%)	125 000 mg/m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 3
Effets irréversibles (SEI)	3 000 mg/ m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 2
Effets réversibles (SER)	2 000 mg/ m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 1
Autres seuils		
Seuil olfactif	-	
IDLH	NR	
VME	NR	

### 3 Intervention

RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            Tout vêtement gelé sur la peau devrait être dégelé avant d'être enlevé.            En cas de contact avec le gaz liquéfié, dégeler les engelures en utilisant de l'eau tiède.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUE DETECTION)</b>	
Appareils respiratoires Bonne protection contre le froid : gants épais, tablier en cuir, bottes, etc. Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE</b>	
En général	<b>NE PAS ÉTEINDRE UNE FUITE DE GAZ EN FEU, À MOINS DE POUVOIR STOPPER LA FUITE.</b> <b>ATTENTION: L'hydrogène et méthane en mélange, comprimé (UN2034) peut brûler avec une flamme invisible.</b>
Incendie mineur	Poudre chimique sèche ou CO2.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard. Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque.
Incendie Impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Ne pas appliquer d'eau au point de fuite ou sur les dispositifs de sécurité afin d'éviter l'obstruction par la glace. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. <b>TOUJOURS se tenir éloigné d'une citerne engouffrée par les flammes.</b> Pour un incendie majeur, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés; lorsqu'impossible, se retirer et laisser brûler.
<b>Mesures de protection en cas de dispersion accidentelle</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée. <b>Toujours porter des vêtements de protection thermique pour manipuler des liquides réfrigérés/cryogéniques.</b>	
<b>Mesures en cas de dispersion accidentelle</b>	
ÉLIMINER du site toute source d'allumage. Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse. Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé. Si sans risque, arrêter la fuite. Utiliser un brouillard d'eau pour détourner ou réduire les émanations. Empêcher les eaux de ruissellement d'entrer en contact avec la substance déversée. Ne pas appliquer d'eau sur le déversement ou au point de fuite. Empêcher la dispersion de vapeurs aux endroits clos. Isoler la zone jusqu'à la dispersion des gaz. <b>ATTENTION : Lors d'un contact avec des liquides réfrigérés/cryogéniques, plusieurs matériaux deviennent fragiles. Ils peuvent alors se briser facilement.</b>	



## 4 Scénarios

MODELISATIONS						
SCENARIO : Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison						
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nappe bouillonnante - Transition rapide de phase (TRP) Feu de nappe Feu flash / VCE Brûlures froides Fragilisation des matériaux au contact du liquide					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau			Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		
Rayon maximal de nappe :	5 m	20 m	125 m	5 m	20 m	130 m
Distance LIE :	120 m	250 m	2000 m	130 m	400 m	1800 m
Distance ½ LIE :	230 m	970 m	7600 m	160 m	500 m	2800 m
½ largeur LIE :	30 m	160 m	1300 m	15 m	70 m	600 m
Hauteur nuage inflammable	5 m	15 m	50 m	5 m	10 m	40 m
Distance seuil olfactif :	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>
SCENARIO : Brèche cuve pleine en dessous de la ligne de flottaison						
Un rejet de GNL sous l'eau conduit à un mélange intense du GNL avec l'eau environnante. Il est probable que ce mélange induise une vaporisation totale du GNL, avec réchauffement accru des vapeurs de GNL avant leur émission à la surface. Ces vapeurs, moins froides que lors d'un rejet à la surface de l'eau, formeront alors un nuage moins dense. Les distances d'effet associées à un scénario de rejet sous l'eau seront plus courtes que les distances associées à un rejet situé au-dessus de la ligne de flottaison.						

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

*n.c.* : non calculé



Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

## 3-2.3 FICHE PROPANE


**PRODUIT :  
PROPANE**


**FICHE INFORMATION  
Produit et Scénario**

**FAMILLE :  
GPL**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	PROPANE	Product Name (Angl)	Propane
Synonymes	propane	Nom chimique	Propane
Numéro d'identification			
N° CAS	74-98-6	CODE ONU	1978
N° EINECS	200-827-9		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
	■	■	■	■	■
Indice (1 à 4)	1 (Peu dangereux)	4 (Excessivement dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	0 (Pas ou très peu de danger)	3 (Très dangereux)

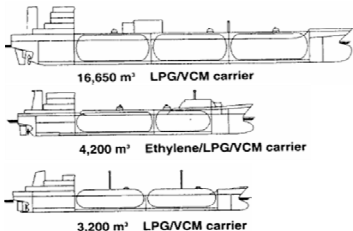
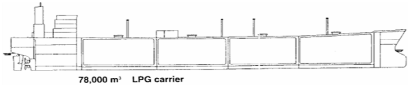
Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
	Nature des risques particuliers (phrases R) : R12 : Extrêmement inflammable.
	Conseils de prudence (phrases S) : S9 : Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé. S16 : Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.

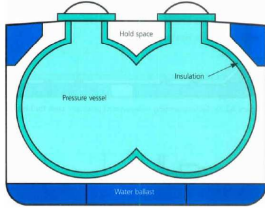
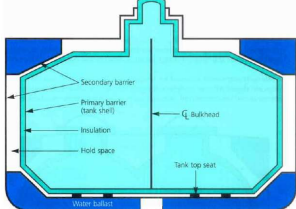
Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
 Etiquette 2.1 : gaz inflammable.	N°2 Gaz inflammable	23	Gaz inflammable

Risque spécifique lié au transport maritime
Pas de risque spécifique identifié

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP	1978	Code fiche CHRIS MANUAL	PRP
N°fiche CANUTEC	115	N°fiche INRS	-
Code fiche IMDG	F-D ; S-U		

## 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type	
 <p><b>GPL stocké en cuves de type C (pressurisées ou semi-pressurisées) (environ 5000 t)</b></p>	 <p><b>GPL stocké en cuves de type A (réfrigérées) (environ 100000 t)</b></p>

Informations techniques utiles	
	
<b>Cuves de types C (pressurisées ou semi-pressurisées)</b>	<b>Cuves de types A (réfrigérées)</b>
Informations techniques particulières	

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	C3H8 / CH3-CH2-CH3	Densité de vapeur relative	1,5
Masse molaire	44 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	Le monoxyde de carbone peut se former par combustion incomplète
Etat physique (à 20°C)	Gaz	Comportement en cas de	
Etat physique transporté	Gaz comprimé liquéfié	• choc	Pas de réaction
Couleur	Incolore	• contact avec l'air	Pas de réaction
Odeur	Douceâtre. Difficilement détectable à faible concentration. Produit d'odeur infecte souvent ajouté	• contact avec l'eau	Pas de réaction
pH		Réactions chimiques dangereuses : Stable chimiquement.	
Température d'ébullition	-42 °C		
Point éclair	-104°C		
Température d'auto-ignition	450°C		
Limites d'explosivité (air)	2,2 % - 9,5 %		
Tension de vapeur	8,3 bar		
Densité liquide relative à 20°C	0,58		
Solubilité dans l'eau	Pratiquement insoluble		
Classification SEBC	G (Gaz)		

TOXICITE		
Sur l'homme		
Effets sur l'homme	Gaz excessivement INFLAMMABLE. Forme des mélanges très EXPLOSIFS avec l'air. Gaz peu toxique : Légèrement narcotique. Asphyxiant. Risque de gelure par le liquide.	
Voies d'exposition [ICSC]	Inhalation	Somnolence. Perte de conscience.
	Peau	Lors du contact avec le liquide : Gelures.
	Ingestion	
Sur l'environnement		
Classification MARPOL	NR	
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 1,8 mg.m <sup>-3</sup> ) Origine du choix des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N°DRC-08-94398-02798A		
Effets létaux (SEL)	59 500 mg/m <sup>3</sup> (Urgence)	AEGL 3
Effets irréversibles (SEI)	30 600 mg/m <sup>3</sup> (Urgence)	AEGL 2
Effets réversibles	9 920 mg/m <sup>3</sup> (Urgence)	AEGL 1
Autres seuils		
Seuil olfactif	Entre 5000 et 20000 ppm	
IDLH	2100 ppm	
VME	Pas de VME / 8 hr Time Weighted Average (TWA): 1000 ppm	

### 3 Intervention

RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            Tout vêtement gelé sur la peau devrait être dégelé avant d'être enlevé.            En cas de contact avec le gaz liquéfié, dégeler les engelures en utilisant de l'eau tiède.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUE DETECTION)</b>	
Appareils respiratoires, gants épais, bottes. Explosimètre. Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants Si nécessaire vêtement protection thermique (type : "Excalor").	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE</b>	
En général	<b>NE PAS ÉTEINDRE UNE FUITE DE GAZ EN FEU, À MOINS DE POUVOIR STOPPER LA FUITE.</b>
Incendie mineur	Poudre chimique sèche ou CO2.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard. Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque.
Incendie impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Ne pas appliquer d'eau au point de fuite ou sur les dispositifs de sécurité afin d'éviter l'obstruction par la glace. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. TOUJOURS se tenir éloigné d'une citerne engouffrée par les flammes. Pour un incendie majeur, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés; lorsqu'impossible, se retirer et laisser brûler.
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée. Toujours porter des vêtements de protection thermique pour manipuler des liquides réfrigérés/cryogéniques.	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
ÉLIMINER du site toute source d'allumage (ex : cigarette, fusée routière, étincelles et flammes). Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse. Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé. Si sans risque, arrêter la fuite. Si possible, retourner le contenant pour laisser fuir le gaz plutôt que le liquide. Utiliser un brouillard d'eau pour détourner ou réduire les émanations. Empêcher les eaux de ruissellement d'entrer en contact avec la substance déversée. Ne pas appliquer d'eau sur le déversement ou au point de fuite. Empêcher la dispersion aux endroits clos. Isoler la zone jusqu'à la dispersion des gaz. ATTENTION: Lors d'un contact avec des liquides réfrigérés/cryogéniques, plusieurs matériaux deviennent fragiles. Ils peuvent alors se briser facilement.	

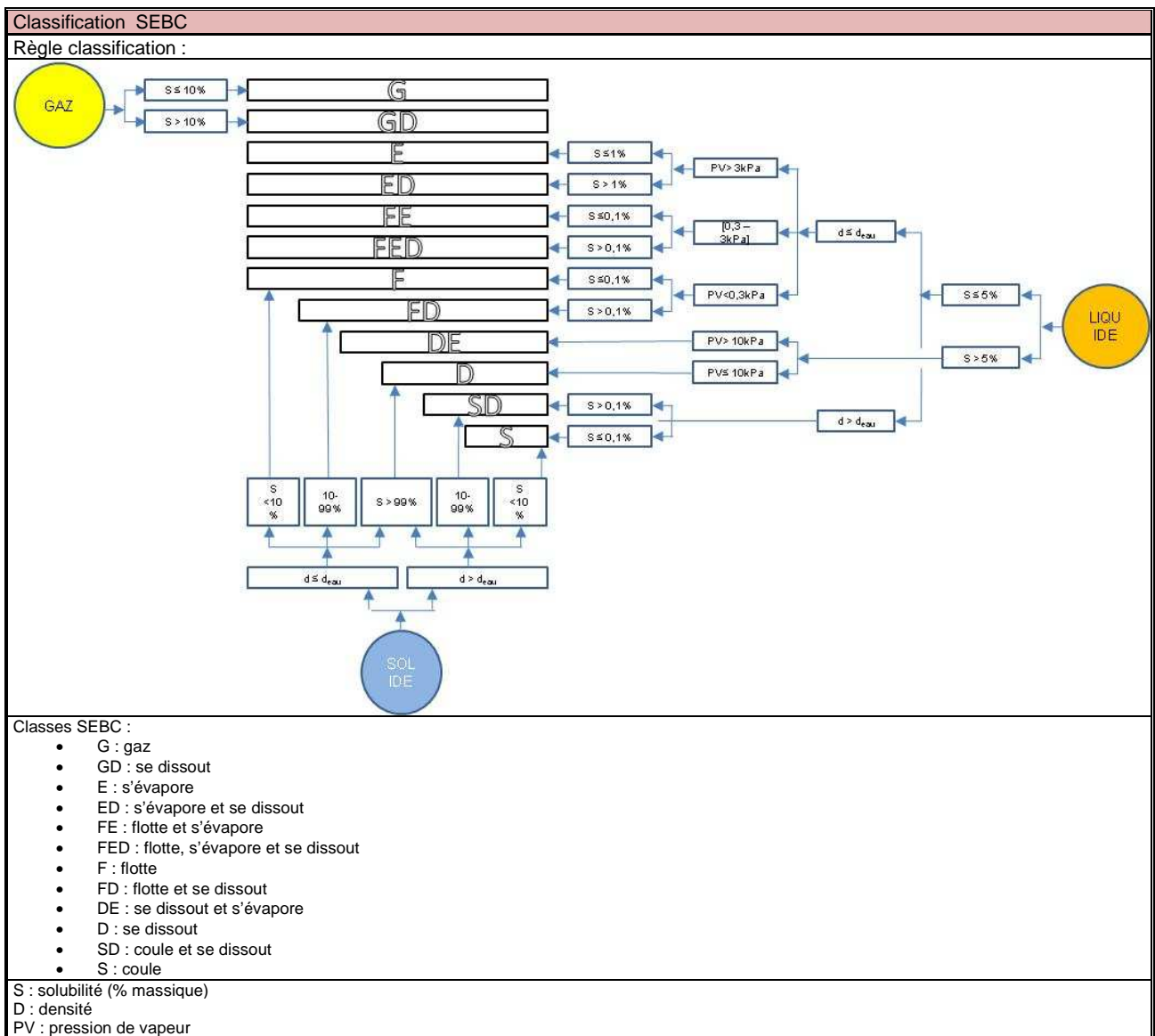
## 4 Scénarios

MODELISATIONS (Propane liquéfié sous pression à température ambiante)						
SCENARIO :	Brèche cuve pleine au-dessus ligne de flottaison					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Jet enflammé Feu flash / VCE Brûlures froides					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Rayon maximal de nappe :	-	-	-	-	-	-
Distance LIE :	100 m	470 m	2400 m	110 m	590 m	3100 m
Distance ½ LIE :	190 m	800 m	3400 m	260 m	1200 m	4000 m
Distance seuil olfactif :	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>	<i>n.c.</i>
Hauteur nuage inflammable	5 m	15 m	60 m	5 m	15 m	50 m

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	<b>0</b>	0	1	0	1	0	0,3
	<b>1</b>	1	3	1	5	0,3	1
	<b>2</b>	4	6	6	11	2	3
	<b>3</b>	7	10	12	19	3	5
Agité	<b>4</b>	11	15	20	28	6	8
	<b>5</b>	16	20	29	38	8	11
	<b>6</b>	21	26	39	49	11	14
	<b>7</b>	27	33	50	61	14	17
	<b>8</b>	34	40	62	74	17	21
	<b>9</b>	41	47	75	88	21	24
	<b>10</b>	48	55	89	102	25	28
	<b>11</b>	53	63	103	107	29	30
	<b>12</b>	64	>64	118	>118	33	>33



# 5 Annexes



**Echelle de solubilité aqueuse**

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000

Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

## 3-2.4 FICHE ETHYLENE


**PRODUIT :  
ETHYLENE**


**FICHE INFORMATION  
Produit et Scénario**

**FAMILLE :  
GL**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	ETHYLENE LIQUIDE (réfrigéré)	Product Name (Angl)	Ethylene Ethene liquid (refrigerated)
Synonymes	Ethène liquide ; Gaz oléifiant	Nom chimique	Ethylène
Numéro d'identification			
N° CAS	74-85-1	CODE ONU	1038
N° EINECS	200-815-3		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
	■	■	■	□	■
Indice (1 à 4)	1 (Peu dangereux)	4 (Excessivement dangereux)	2 (Dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	4 (Excessivement dangereux)

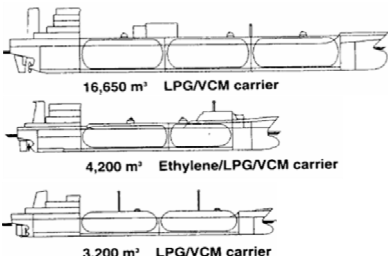
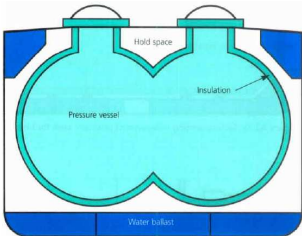
Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
 F+ : Extrêmement inflammable	Nature des risques particuliers (phrases R) : R12 : Extrêmement inflammable. R67 : L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
	Conseils de prudence (phrases S) : S9 : Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé. S16 : Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer. S33 : Eviter l'accumulation de charges électrostatiques. S46 : En cas d'ingestion, consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.

Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
 Etiquette 2.1 : gaz inflammable.	N°2 Gaz inflammable	223	Gaz réfrigéré inflammable

Risque spécifique lié au transport maritime
Compte tenu de sa température de stockage, possibilité d'explosions froides au contact de l'eau (Transition Rapide de Phase : effets de surpression locaux et projection d'éthylène dans l'air, sans effets thermiques). Le froid peut entraîner une fragilisation des matériaux sur le pont du navire.

Sélection guide intervention			
N° fiche GORSAP	1038	Code fiche CHRIS MANUAL	ETL
N° fiche CANUTEC	115	N° fiche INRS	-
Code fiche IMDG	F-D ; S-U		

## 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type	
 <p>16,650 m³ LPG/VCM carrier</p> <p>4,200 m³ Ethylene/LPG/VCM carrier</p> <p>3,200 m³ LPG/VCM carrier</p> <p><b>GPLier de type C (pressurisées ou semi-pressurisées)</b></p>	 <p style="text-align: center;"><b>Cuves de types C (pressurisées ou semi-pressurisées)</b></p>

<b>(environ 5000 t)</b>
<b>Informations techniques utiles</b>
A cause de la faible valeur de sa température critique, l'éthylène doit être réfrigéré. Il est habituellement transporté à la pression atmosphérique dans des citernes indépendantes de type C, qui peuvent être pressurisées. La capacité de transport des éthyléniers varie dans une fourchette allant de 1 000 à 12 000 m3. En Europe de l'ouest, la taille des navires habituellement rencontrés se situe dans la gamme des 5000 m3.
<b>Informations techniques particulières</b>

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit				
Formule (brute / développée)	C2H4 / CH2=CH2	Densité de vapeur relative	1	
Masse molaire	28 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	Le monoxyde de carbone peut se former par combustion incomplète	
Etat physique (à 20°C)	Gaz			
Etat physique transporté	Gaz comprimé liquéfié	Comportement en cas de	Pas de réaction	
Couleur	Gaz incolore			• choc
Odeur	Douceâtre. Difficilement détectable à l'odeur à faible concentration			• contact avec l'air
pH		• contact avec l'eau	Pas de réaction	
Température d'ébullition	-103 °C	Réactions chimiques dangereuses : Réagit violemment avec chlorure d'aluminium. Explosivement avec le chlore. Peut se polymériser.		
Point éclair	-136°C			
Température d'auto-ignition	425°C			
Limites d'explosivité (air)	2,7 % - 34 %			
Tension de vapeur à 20°C	Non applicable			
Densité liquide relative à 20°C	0,57			
Solubilité dans l'eau	Très peu soluble			
Classification SEBC	G (Gaz)			

TOXICITE		
Sur l'homme		
Effets sur l'homme	Gaz excessivement INFLAMMABLE. Forme des mélanges très EXPLOSIFS avec l'air. Gaz peu toxique: Légèrement narcotique. Asphyxiant. Risque de gelure par le liquide.	
Voies d'exposition	Inhalation	Somnolence. Perte de conscience.
	Peau	Lors du contact avec le liquide : Gelures.
	Ingestion	-
Sur l'environnement		
Classification MARPOL	NR	
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 1,15 mg.m <sup>-3</sup> ) Origine du choix des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N° DRC-08-94398-02798A		
Effets létaux (SEL 1%)	10 000 mg/m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 3
Effets irréversibles (SEI)	10 000 mg/ m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 2
Effets réversibles (SER)	600 mg/ m <sup>3</sup> (Urgence)	TEEL - 1
Autres seuils		
Seuil olfactif	NR	
IDLH	NR	
VME	Pas de VME / 8 hr Time Weighted Average (TWA): 200 ppm	

### 3 Intervention

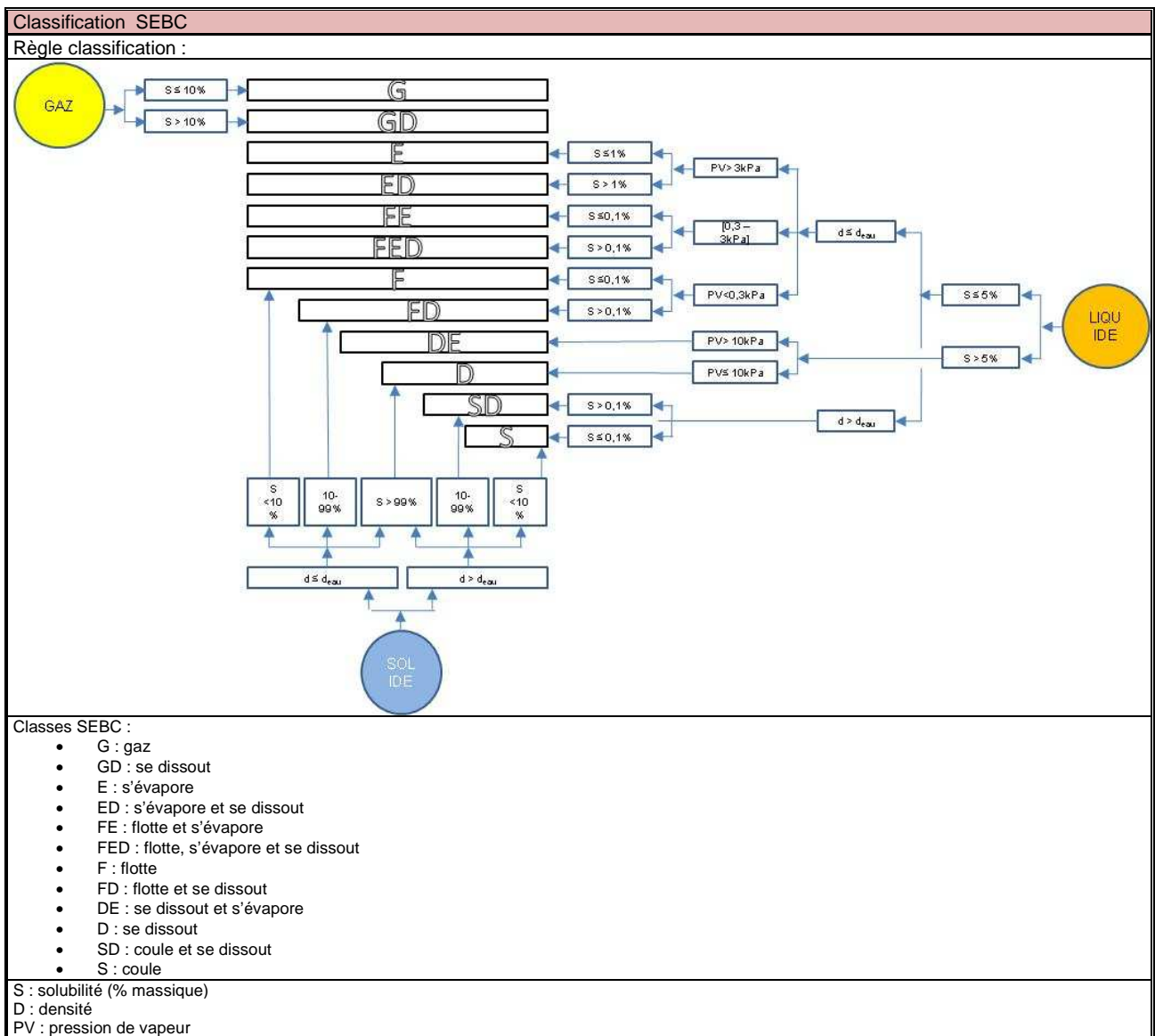
RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            Tout vêtement gelé sur la peau devrait être dégelé avant d'être enlevé.            En cas de contact avec le gaz liquéfié, dégeler les engelures en utilisant de l'eau tiède.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUE DETECTION)</b>	
Appareils respiratoires, gants épais, bottes. Explosimètre. Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants Si nécessaire vêtement de protection thermique (type : "Excalor").	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE [CANUTEC / MESURES D'URGENCE / INCENDIE]</b>	
En général	<b>NE PAS ÉTEINDRE UNE FUITE DE GAZ EN FEU, À MOINS DE POUVOIR STOPPER LA FUITE.</b>
Incendie mineur	Poudre chimique sèche ou CO2.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard. <b>Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque.</b>
Incendie impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Ne pas appliquer d'eau au point de fuite ou sur les dispositifs de sécurité afin d'éviter l'obstruction par la glace. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. <b>TOUJOURS se tenir éloigné d'une citerne engouffrée par les flammes.</b> Pour un incendie majeur, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés; lorsqu'impossible, se retirer et laisser brûler.
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée. Toujours porter des vêtements de protection thermique pour manipuler des liquides réfrigérés/cryogéniques.	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
<b>ÉLIMINER</b> du site toute source d'allumage (ex : cigarette, fusée routière, étincelles et flammes). Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse. Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé. Si sans risque, arrêter la fuite. Si possible, retourner le contenant pour laisser fuir le gaz plutôt que le liquide. Utiliser un brouillard d'eau pour détourner ou réduire les émanations. Empêcher les eaux de ruissellement d'entrer en contact avec la substance déversée. Ne pas appliquer d'eau sur le déversement ou au point de fuite. Empêcher la dispersion aux endroits clos. Isoler la zone jusqu'à la dispersion des gaz. <b>ATTENTION:</b> Lors d'un contact avec des liquides réfrigérés/cryogéniques, plusieurs matériaux deviennent fragiles. Ils peuvent alors se briser facilement.	

## 4 Scénarios

MODELISATIONS						
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nappe bouillonnante - Transition rapide de phase (TRP) Feu de nappe Feu flash / VCE Brûlures froides Fragilisation des matériaux par contact avec le liquide					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :	Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau			Fuite à très faible débit : rejet majoritaire dans le ballast et mélange avec l'eau		
Rayon maximal de nappe :	7 m	40 m	250 m	7 m	40 m	250 m
Distance LIE :	350 m	2000 m	3600 m	170 m	600 m	3700 m
Distance ½ LIE :	500 m	2700 m	4600 m	250 m	800 m	4800 m
Distance seuil olfactif :	-	-	-	-	-	-
Hauteur nuage inflammable	< 5 m	5 m	10 m	< 5 m	5 m	15 m
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine en dessous de la ligne de flottaison</b>					
Un rejet d'éthylène réfrigéré sous l'eau conduit à un mélange intense de l'éthylène avec l'eau. Il est probable que ce mélange induise une vaporisation totale de l'éthylène, avec réchauffement accru des vapeurs avant leur émission à la surface. Ces vapeurs, moins froides que lors d'un rejet à la surface de l'eau, formeront alors un nuage moins dense. Les distances d'effet associées à un scénario de rejet sous l'eau seront plus courtes que les distances associées à un rejet situé au-dessus de la ligne de flottaison.						

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

# 5 Annexes



**Echelle de solubilité aqueuse**

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000



Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

#### Explication conseil de prudence

- S1** Conserver sous clé.
- S2** Conserver hors de la portée des enfants.
- S3** Conserver dans un endroit frais.
- S4** Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
- S5** Conserver sous... (*liquide approprié à spécifier par le fabricant*).
- S6** Conserver sous... (*gaz inerte à spécifier par le fabricant*).
- S7** Conserver le récipient bien fermé.
- S8** Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
- S9** Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
- S12** Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
- S13** Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
- S14** Conserver à l'écart des... (*matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant*).
- S15** Conserver à l'écart de la chaleur.
- S16** Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
- S17** Tenir à l'écart des matières combustibles.
- S18** Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
- S20** Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
- S21** Ne pas fumer pendant l'utilisation.
- S22** Ne pas respirer les poussières.
- S23** Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols (*terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant*).
- S24** Éviter le contact avec la peau.
- S25** Éviter le contact avec les yeux.
- S26** En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
- S27** Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
- S28** Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... (*produits appropriés à indiquer par le fabricant*).
- S29** Ne pas jeter les résidus à l'égout.
- S30** Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
- S33** Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
- S35** Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
- S36** Porter un vêtement de protection approprié.
- S37** Porter des gants appropriés.
- S38** En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
- S39** Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
- S40** Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... (*à préciser par le fabricant*).
- S41** En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
- S42** Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié (*terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant*).
- S43** En cas d'incendie utiliser... (*moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"*).
- S45** En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin (*si possible lui montrer l'étiquette*) .
- S46** En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
- S47** Conserver à une température ne dépassant pas... °C (*à préciser par le fabricant*).
- S48** Maintenir humide avec... (*moyen approprié à préciser par le fabricant*).
- S49** Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
- S50** Ne pas mélanger avec... (*à spécifier par le fabricant*).
- S51** Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
- S52** Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
- S53** Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
- S56** Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
- S57** Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
- S59** Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
- S60** Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
- S61** Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
- S62** En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
- S63** En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
- S64** En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau (*seulement si la personne est consciente*)

## 3-2.5 FICHE AMMONIAC



**PRODUIT :  
AMMONIAC**



**FICHE INFORMATION  
Produit et Scénario**

**FAMILLE :  
GPL et GL**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	AMMONIAC ANHYDRE	Product Name (Angl)	Amonia anhydrous
Synonymes	AMMONIAC (GAZ)	Nom chimique	Ammoniac
Numéro d'identification			
N°CAS	7664-41-7	CODE ONU	1005
N°EINECS	231-635-3		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
	■	■	■	■	■
Indice (1 à 4)	3 (Très dangereux)	2 (Dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	2 (Dangereux)	2 (Dangereux)

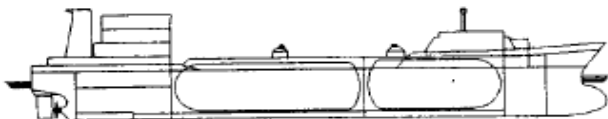
Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
 N : Dangereux pour l'environnement  T : Toxique	Nature des risques particuliers (phrases R) : R10 : Inflammable. R23 : Toxique par inhalation. R34 : Provoque des brûlures. R50 : Très toxique pour les organismes aquatiques. Conseils de prudence (phrases S) : S1/2 : Conserver sous clef et hors de portée des enfants. S9 : Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé. S16 : Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer. S26 : En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste. S36/37/39 : Porter un vêtement de protection appropriée, des gants et un appareil de protection des yeux/du visage. S45 : En cas d'accident ou de malaise, consulter immédiatement un médecin (si possible lui montrer l'étiquette). S61 : Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales/la fiche de données de sécurité.

Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
 Etiquette 2.3 : Gaz toxique.  Etiquette 8 : Matière corrosive.	N°2.3 : Gaz toxique N°8 : Matière corrosive	268	Gaz liquéfié. Toxique par inhalation. Corrosif pour les yeux, le système respiratoire et la peau

Risque spécifique lié au transport maritime
Réaction exothermique de dissolution au contact de l'eau. S'il est transporté sous forme cryogénique, possibilité d'explosions froides (effets de surpression locaux et projection d'ammoniac dans l'air, sans effets thermiques).

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP	1005	Code fiche CHRIS MANUAL	AMA
N°fiche CANUTEC	125	N°fiche INRS	FT16
Code fiche IMDG	F-C ; S-U		

### 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type
 4,200 m <sup>3</sup> Ethylene/LPG/VCM carrier

Informations techniques utiles
Cargaison à la température ambiante (mais peut aussi être transporté sous forme cryogénique, à pression atmosphérique) Pression de calcul typique : 18 bars Citernes = réservoirs sous pression indépendants en acier Type C Pas d'isolation thermique / Pas d'installation de liquéfaction Capacité maximum : environ 10 000 m <sup>3</sup>
Informations techniques particulières

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	NH <sub>3</sub>	Densité de vapeur relative	0,6
Masse molaire	17 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	Oxyde nitrique/dioxyde d'azote
Etat physique (à 20°C)	Gaz	Comportement en cas de	
Etat physique transporté	Gaz liquéfié sous pression	• choc	Pas de réaction
Couleur	Incolore	• contact avec l'air	Pas de réaction
Odeur	Ammoniacale	• contact avec l'eau	Se dissout dans l'eau en dégageant de la chaleur
pH			
Température d'ébullition	-33 °C	Réactions dangereuses :	
Point éclair	11°C	Des composés sensibles aux chocs se forment avec les oxydes de mercure, d'argent et d'or. La substance est une base forte, qui réagit violemment avec les acides et qui est corrosive. Réagit violemment avec oxydants forts et halogènes. Attaque cuivre, aluminium, zinc et alliages.	
Température d'auto-ignition	630°C		
Limites d'explosivité (air)	5 % -30 %		
Tension de vapeur (20°C)	8,6 bar		
Densité liquide relative (20°C)	0,7		
Solubilité dans l'eau	Facilement soluble		
Classification SEBC	DE (se dissout et s'évapore)		

TOXICITE						
Sur l'homme						
Effets sur l'homme	Produit dangereux pour la santé : SUFFOCANT, CAUSTIQUE. Très irritant pour les yeux et les voies respiratoires (œdème du poumon), moins pour la peau. Toxique. Risque de gelure grave par le liquide					
Voies d'exposition	Inhalation	Sensation de brûlure. Toux. Respiration difficile. Essoufflement. Mal de gorge. Symptômes d'effets retardés				
	Peau	Rougeur. Brûlures cutanées. Douleur. Ampoules. LORS DU CONTACT AVEC LE LIQUIDE: GELURES.				
	Ingestion					
Premier symptôme	Sensation de brûlure. Toux. Respiration difficile. Essoufflement. Mal de gorge. L'inhalation de concentrations élevées peut causer un œdème pulmonaire (effets retardés)					
Sur l'environnement						
Classification MARPOL	C					
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 0,7 mg.m <sup>-3</sup> )						
	1 min	3 min	10 min	20 min	30 min	60 min
Effets létaux (SEL 1%)	25300 ppm	14700 ppm	8200 ppm	5833 ppm	4767 ppm	3400 ppm
Effets irréversibles (SEI)	1500 ppm	1000 ppm	866 ppm	612 ppm	500 ppm	354 ppm
Effets réversibles (SER)	280 ppm		150 ppm		110 ppm	80 ppm
Autres seuils						
Seuil olfactif	5 à 50 ppm					
IDLH	300 ppm					
VME	10 ppm / 7 mg.m <sup>-3</sup>					

### 3 Intervention

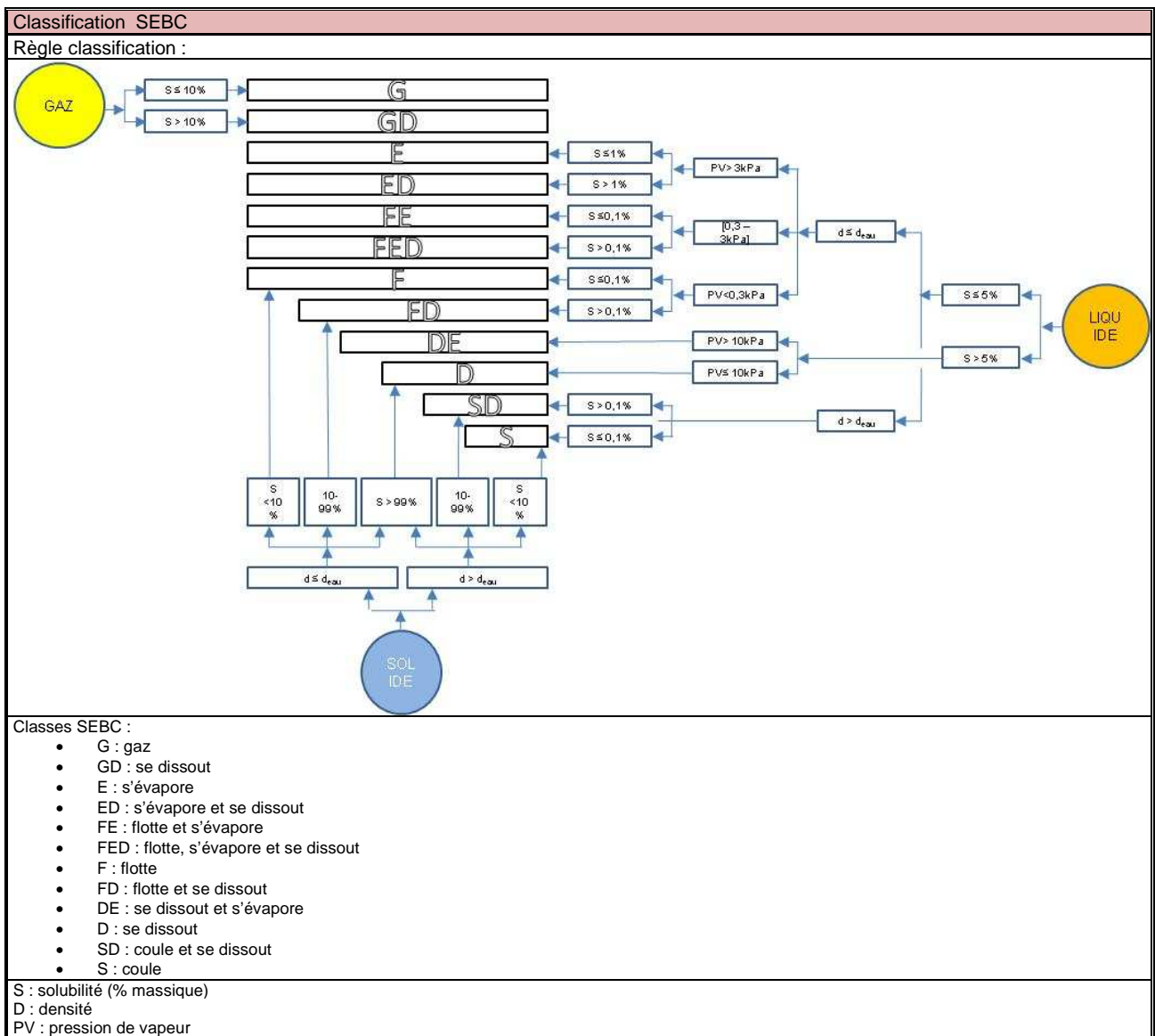
RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            Ne pas utiliser la méthode bouche-à-bouche si la victime a ingéré ou inhalé la substance, appliquer la respiration artificielle à l'aide d'un masque de poche muni d'une valve à sens unique ou autre appareil médical approprié.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            En cas de contact avec le gaz liquéfié, décongeler les engelures en utilisant de l'eau tiède.            En cas de contact avec la substance, laver les yeux ou la peau immédiatement à l'eau courante pendant au moins 20 minutes.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Garder la victime sous observation.            Les effets liés au contact ou à l'inhalation peuvent être retardés.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUÉ DETECTION)</b>	
<p>Dans tous les cas: appareil respiratoires, gants plastiques épais, bottes.            La combinaison "anti-gaz" est généralement toujours indispensable.            Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants</p>	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE</b>	
Incendie mineur	Poudre chimique sèche ou CO2.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard, ou mousse. Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque. Empêcher l'infiltration d'eau dans les contenants. Les bouteilles à gaz endommagées ne devraient être manipulées que par des spécialistes.
Incendie Impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Ne pas appliquer d'eau au point de fuite ou sur les dispositifs de sécurité afin d'éviter l'obstruction par la glace. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. TOUJOURS se tenir éloigné d'une capacité engouffrée par les flammes.
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
<p>Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive.            Porter un vêtement de protection chimique spécifiquement recommandé par le fabricant. Il peut fournir une protection thermique variant de faible à nulle.            Les vêtements de protection pour feux d'immeubles offrent une protection limitée pour les cas d'incendie SEULEMENT; ils ne sont pas efficaces en cas de déversements où un contact direct avec la substance est possible.</p>	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
<p>Une combinaison entièrement étanche aux vapeurs est recommandée pour les fuites et déversements sans feu.            Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé.            Si sans risque, arrêter la fuite.            Empêcher l'infiltration dans les endroits clos.            Ne pas appliquer d'eau sur le déversement ou au point de fuite.            Utiliser un brouillard d'eau pour détourner ou réduire les émanations. Empêcher les eaux de ruissellement d'entrer en contact avec la substance déversée.            Isoler la zone jusqu'à la dispersion des gaz.</p>	

## 4 Scénarios

MODELISATIONS (ammoniac liquéfié sous pression à température ambiante)						
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nuage toxique Feu flash / VCE Brûlure froide					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :						
Rayon maximal de nappe :	-	3 m	85 m	-	3 m	85 m
Distance LIE :	30 m	160 m	1050 m	30 m	170 m	2050 m
Distance ½ LIE :	60 m	310 m	1700 m	60 m	360 m	1800 m
Distance SEL 30'	850 m	3600 m	7900 m	800 m	3600 m	> 10 km
Distance SEI 30'	7200 m	> 10 km	> 10 km	1700 m	> 10 km	> 10 km
Distance SER 30'	> 10 km	> 10 km	> 10 km	3600 m	> 10 km	> 10 km
Distance seuil olfactif :	> 10 km	> 10 km	> 10 km	> 10 km	> 10 km	> 10 km
Hauteur nuage inflammable	< 5 m	< 10 m	20 m	< 5 m	< 10 m	20 m
Hauteur SER 30'	30 m	60 m	250 m	60 m	120 m	250 m
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine en dessous de la ligne de flottaison</b>					
Compte tenu de la forte solubilité de l'ammoniac dans l'eau, les distances associées à un rejet sous l'eau seront nettement inférieures à celles associées à un rejet sur l'eau.						

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

# 5 Annexes



**Echelle de solubilité aqueuse**

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000



Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.



Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

## 3-2.6 FICHE CVM

**PRODUIT :**  
CVM

**FICHE INFORMATION**  
**Produit et Scénario**

**FAMILLE :**  
GL

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	Chlorure de vinyle	Product Name (Angl)	Vinyle Chloride
Synonymes	Chloroéthène Chloroéthylène Monochloroéthylène	Nom chimique	Chlorure de vinyle
Numéro d'identification			
N° CAS	75-01-4	CODE ONU	1086
N° EINECS	200-831-0		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
Indice (1 à 4)	2 (Dangereux)	4 (Excessivement dangereux)	3 (Très dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	4 (Excessivement dangereux)

Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
 F+ : Extrêmement inflammable	Nature des risques particuliers (phrases R) : R12 : Extrêmement inflammable. R45 : Peut provoquer le cancer.
 T : Toxique	Conseils de prudence (phrases S) : S45 : En cas d'accident ou de malaise, consulter immédiatement un médecin (si possible lui montrer l'étiquette). S53 : Eviter l'exposition - se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.

Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
 Etiquette 2.1 : gaz inflammable.	N°2 Gaz inflammable	239	Gaz inflammable pouvant produire spontanément une réaction violente

Risque spécifique lié au transport maritime
Pas de risque spécifique identifié

Sélection guide intervention			
N° fiche GORSAP	1086	Code fiche CHRIS MANUAL	VCM
N° fiche CANUTEC	116	N° fiche INRS	FT184
Code fiche IMDG	F-D ; S-U		

## 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type	
 <b>GPLier de type C (pressurisées ou semi-pressurisées) (environ 5000 t)</b>	 <b>Cuves de types C (pressurisées ou semi-pressurisées)</b>
Informations techniques utiles	
<p>Le chlorure de vinyle ne peut être transporté que dans des citernes indépendantes (les citernes type A ou C conviennent). Sa forte réactivité avec l'oxygène (polymérisation) impose un maintien permanent des citernes en surpression, y compris lors du voyage retour sur ballasts grâce à du gaz inerte dont la teneur en oxygène ne doit pas dépasser 0.1% en volume (0.2% si un inhibiteur est utilisé).</p>	

Une autre particularité du chlorure de vinyle est sa forte densité (0.97) par rapport aux autres gaz liquéfiés, ce qui oblige à adapter la structure du navire en conséquence.
Informations techniques particulières

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl / H <sub>2</sub> C=CHCl	Densité de vapeur relative	2,2
Masse molaire	62,5 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	En cas d'incendie la décomposition thermique peut conduire aux fumées toxiques et/ou corrosives suivantes : Monoxyde de carbone, Phosgène, Chlorure d'hydrogène
Etat physique (à 20°C)	Gaz		
Etat physique transporté	Gaz comprimé liquéfié	Comportement en cas de	
Couleur	Incolore	• choc	Pas de réaction
Odeur	Douceâtre. Difficilement détectable à faible concentration.	• contact avec l'air	Pas de réaction
pH		• contact avec l'eau	Pas de réaction
Température d'ébullition	-13,7 °C	Réactions chimiques dangereuses : La substance peut dans certaines circonstances former des peroxydes instables, initiateurs d'une polymérisation explosive. La substance va polymériser facilement sous l'effet d'une forte chaleur et sous l'influence de l'air, de la lumière et en présence d'un catalyseur, d'agents oxydants et de métaux tels que le cuivre et l'aluminium, avec des risques d'incendie et d'explosion. La substance se décompose en brûlant, produisant des fumées toxiques et corrosives (du chlorure d'hydrogène et du phosgène). Attaque le fer et l'acier en présence d'humidité.	
Point éclair	-78°C		
Température d'auto-ignition	435°C		
Limites d'explosivité (air)	3,8 % - 31 %		
Tension de vapeur à 20°C	3,4 bar		
Densité liquide relative à 20°C	0,97		
Solubilité dans l'eau	Peu soluble		
Classification SEBC	G (Gaz)		

TOXICITE					
Sur l'homme					
Effets sur l'homme	Gaz irritant pour les yeux et les voies respiratoires. Narcotique. Toxicité aigue relativement faible, mais effet cumulatif dangereux. Risque de gelure par le liquide				
Voies d'exposition	Inhalation	Vertiges. Somnolence. Maux de tête. Perte de conscience			
	Peau	Lors du contact avec le liquide : Gelures.			
	Ingestion				
Sur l'environnement					
Classification MARPOL	NR				
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 2,56 mg.m <sup>-3</sup> )					
	1 min	10 min	20 min	30 min	60 min
Effets létaux SPEL (1%)	<b>603 000</b>	<b>235 000</b>	<b>176 000</b>	<b>149 000</b>	<b>112 000</b>
Autres seuils					
Origine du choix des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N°DRC-08-94398-02798A					
Effets irréversibles (SEI)	<b>5000 ppm (Urgence)</b>		ERPG2		
Effets réversibles	<b>250 ppm (Urgence)</b>		AEGL1		
IDLH	<b>NR</b>				
Seuil olfactif	<b>3000 ppm</b>				
VME	<b>1 ppm</b>				

### 3 Intervention

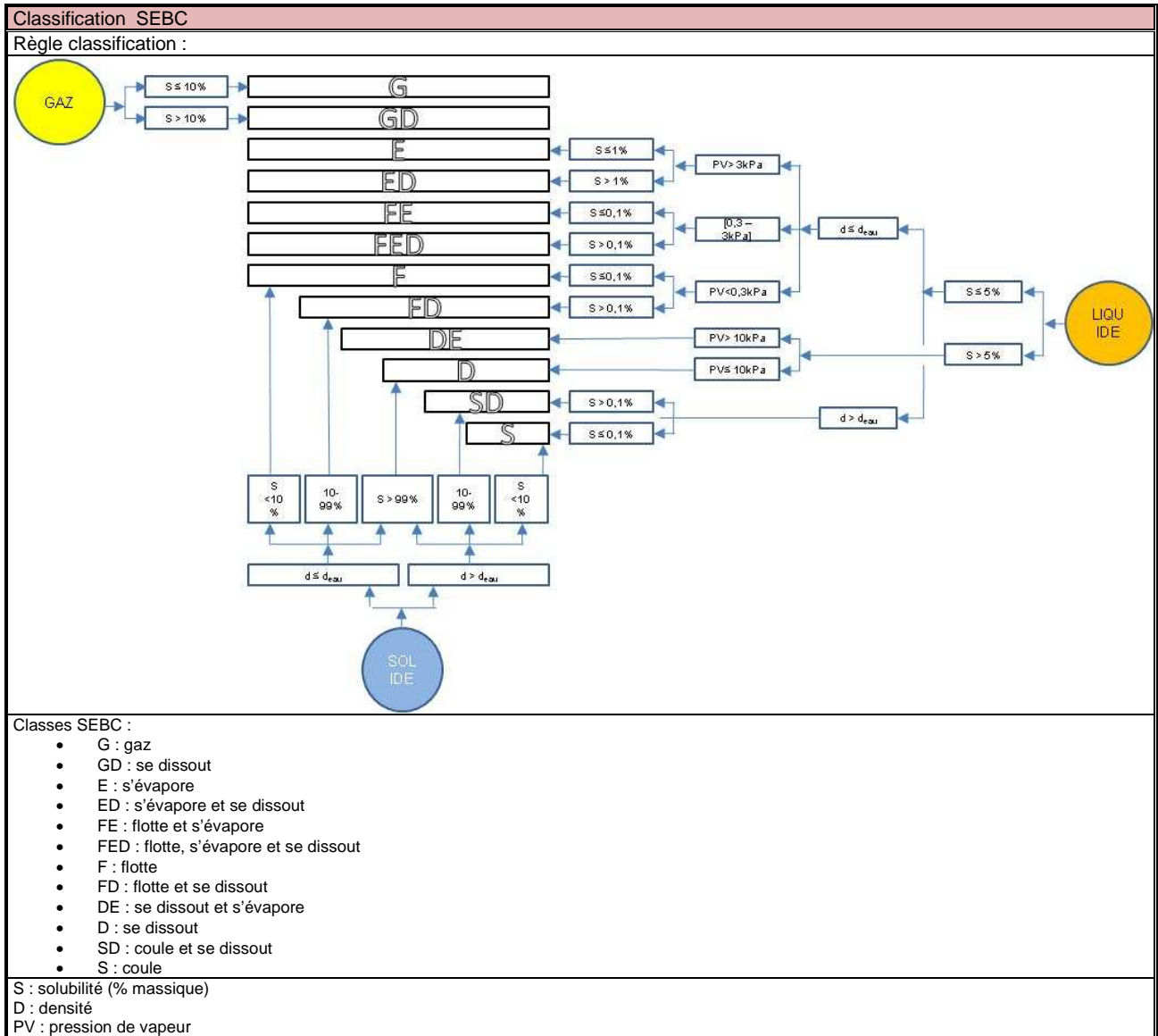
RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            Tout vêtement gelé sur la peau devrait être dégelé avant d'être enlevé.            En cas de contact avec le gaz liquéfié, dégeler les engelures en utilisant de l'eau tiède.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUE DETECTION)</b>	
<p>Appareils respiratoires. Gants épais, bottes.            Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants            En cas d'incendie: Appareils respiratoires indispensables, combinaison "légère" recommandée. Si nécessaire vêtement protection thermique (type : "Excalor").(Filtre: BRUN : A // feu: GRIS: B st).</p>	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE</b>	
En général	<b>NE PAS ÉTEINDRE UNE FUITE DE GAZ EN FEU, À MOINS DE POUVOIR STOPPER LA FUITE.</b>
Incendie mineur	Poudre chimique sèche ou CO2.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard. Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque.
Incendie impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Ne pas appliquer d'eau au point de fuite ou sur les dispositifs de sécurité afin d'éviter l'obstruction par la glace. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. <b>TOUJOURS</b> se tenir éloigné d'une citerne engouffrée par les flammes. Pour un incendie majeur, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés; lorsqu'impossible, se retirer et laisser brûler.
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée.	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
<p>ÉLIMINER du site toute source d'allumage (ex : cigarette, fusée routière, étincelles et flammes).            Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse.            Si sans risque, arrêter la fuite.            Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé.            Ne pas appliquer d'eau sur le déversement ou au point de fuite.            Utiliser un brouillard d'eau pour détourner ou réduire les émanations. Empêcher les eaux de ruissellement d'entrer en contact avec la substance déversée.            Si possible, retourner le contenant pour laisser fuir le gaz plutôt que le liquide.            Empêcher la dispersion aux endroits clos.            Isoler la zone jusqu'à la dispersion des gaz.</p>	

## 4 Scénarios

MODELISATIONS						
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine au-dessus ligne de flottaison</b>					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nappe évaporante Jet enflammé Nuage toxique Feu flash / VCE					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène	Polymérisation avec oxygène
Rayon maximal de nappe :	-	50 m	250 m	-	50 m	250 m
Distance LIE :	60 m	330 m	8600 m	60 m	400 m	1800 m
Distance ½ LIE :	100 m	520 m	> 10 km	140 m	750 m	2700 m
Distance SER 30'	4000 m	> 10 km	> 10 km	1100 m	5400 m	> 10 km
Distance seuil olfactif :	4600 m	> 10 km	> 10 km	1300 m	6100 m	> 10 km
Hauteur nuage inflammable	< 5 m	10 m	10 m	< 5 m	10 m	10 m
Hauteur SER 30'	< 20 m	< 50 m	< 50 m	< 20 m	< 50 m	110 m

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

## 5 Annexes



Echelle de solubilité aqueuse

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000

Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.



Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )



## 3-2.7 FICHE BENZENE


**PRODUIT :  
BENZENE**


**FICHE INFORMATION  
Produit et Scénario**

**FAMILLE :  
EVAPORANT**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	BENZENE	Product Name (Angl)	Benzene
Synonymes	BENZENE	Nom chimique	Benzène
Numéro d'identification			
N°CAS	71-43-2	CODE ONU	1114
N°EINECS	601-020-00-8		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
	■	■	■	■	■
Indice (1 à 4)	2 (Dangereux)	3 (Très dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	0 (Pas ou très peu de danger)	3 (Très dangereux)

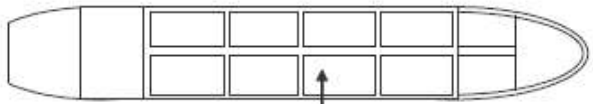
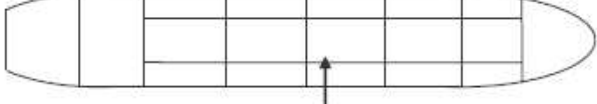
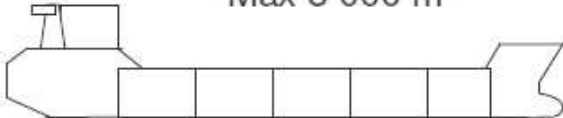
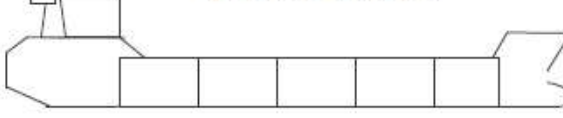
Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
 F                      T	Nature des risques particuliers (phrases R) : R45 : Peut provoquer le cancer. R46 : Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires. R11 : Facilement inflammable. R36/38 : Irritant pour les yeux et la peau. R48/23/24/25 : Toxique: risque d'effets graves pour la sante en cas d'exposition prolongée par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion. R65 : Nocif: peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.  Conseils de prudence (phrases S) : S53 : Eviter l'exposition - se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation. S45 : En cas d'accident ou de malaise, consulter immédiatement un médecin (si possible lui montrer l'étiquette).

Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
	N°3 : Liquide inflammable	33	Matière liquide très inflammable

Risque spécifique lié au transport maritime
Pas de risque spécifique identifié

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP	1114	Code fiche CHRIS MANUAL	BNZ
N°fiche CANUTEC	130	N°fiche INRS	FT49
Code fiche IMDG	F-E ; S-D		

### 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type	
 Max 3 000 m <sup>3</sup>	 Max 3 000 m <sup>3</sup>
 Max 3 000 m <sup>3</sup>	 Max 3 000 m <sup>3</sup>

Informations techniques utiles
Deux types de chimiquier : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimiquier : 5000 t</li> <li>• Chimiquier / Pétrolier : 40 000 t</li> </ul> Le benzène a un point de fusion assez élevé ce qui nécessite un réchauffement du produit.
Informations techniques particulières

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	C6H6	Densité de vapeur relative	1,2
Masse molaire	78 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie	La combustion complète, génère du CO <sub>2</sub> , de la vapeur d'eau, NO <sub>x</sub> . La combustion incomplète génère en outre du monoxyde de carbone (CO), de la suie et des produits de craquage : aldéhydes, cétones, carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).
Etat physique (à 20°C)	liquide incolore, d'odeur caractéristique		
Etat physique transporté	Liquide	Comportement en cas de	
Couleur	Incolore	• choc	Pas de réaction
Odeur	Odeur de gasoil	• contact avec l'air	Pas de réaction
pH		• contact avec l'eau	Pas de réaction
Température d'ébullition	80 °C	Réactions chimiques dangereuses : Réagit violemment avec les oxydants, l'acide nitrique, l'acide sulfurique et les halogènes en provoquant des risques d'incendie et d'explosion. Attaque le plastique et le caoutchouc.	
Point éclair	-11°C		
Température d'auto-ignition	561°C		
Limites d'explosivité (air)	1,3 % - 8 %		
Tension de vapeur (20°C)	9,97 bar		
Densité liquide relative (20°C)	0,88		
Solubilité dans l'eau	Peu soluble		
Classification SEBC	E (s'évapore)		

TOXICITE		
Sur l'homme		
Effets sur l'homme	Liquide très INFLAMMABLE et excessivement volatil. Les vapeurs forment à toutes températures des mélanges EXPLOSIFS avec l'air. Produit TOXIQUE par inhalations répétées: empoisonnement du sang. Effet narcotique avec paralysie respiratoire. Produit irritant pour les voies respiratoires, les yeux et la peau. Attention: Liquide absorbé par la peau.	
Voies d'exposition	Inhalation	Vertiges. Somnolence. Maux de tête. Nausées. Essoufflement. Convulsions. Perte de conscience
	Peau	PEUT ETRE ABSORBEE ! Peau sèche. Rougeur. Douleur.
	Ingestion	Douleurs abdominales. Mal de gorge. Vomissements.
Sur l'environnement		
Classification MARPOL	Y	
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 3,2 mg.m <sup>-3</sup> ) Origine du choix des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N° DRC-08-94398-02798A		
Effets létaux SEL (1%)	1000 ppm (urgence)	ERPG3
Effets irréversibles (SEI)	150 ppm (urgence)	ERPG2
Effets réversibles (SER)	50 ppm (urgence)	ERPG1
Autres seuils		
Seuil olfactif	5 ppm	
IDLH	500 ppm	
VME	1 ppm / 3,2 mg.m <sup>-3</sup>	

### 3 Intervention

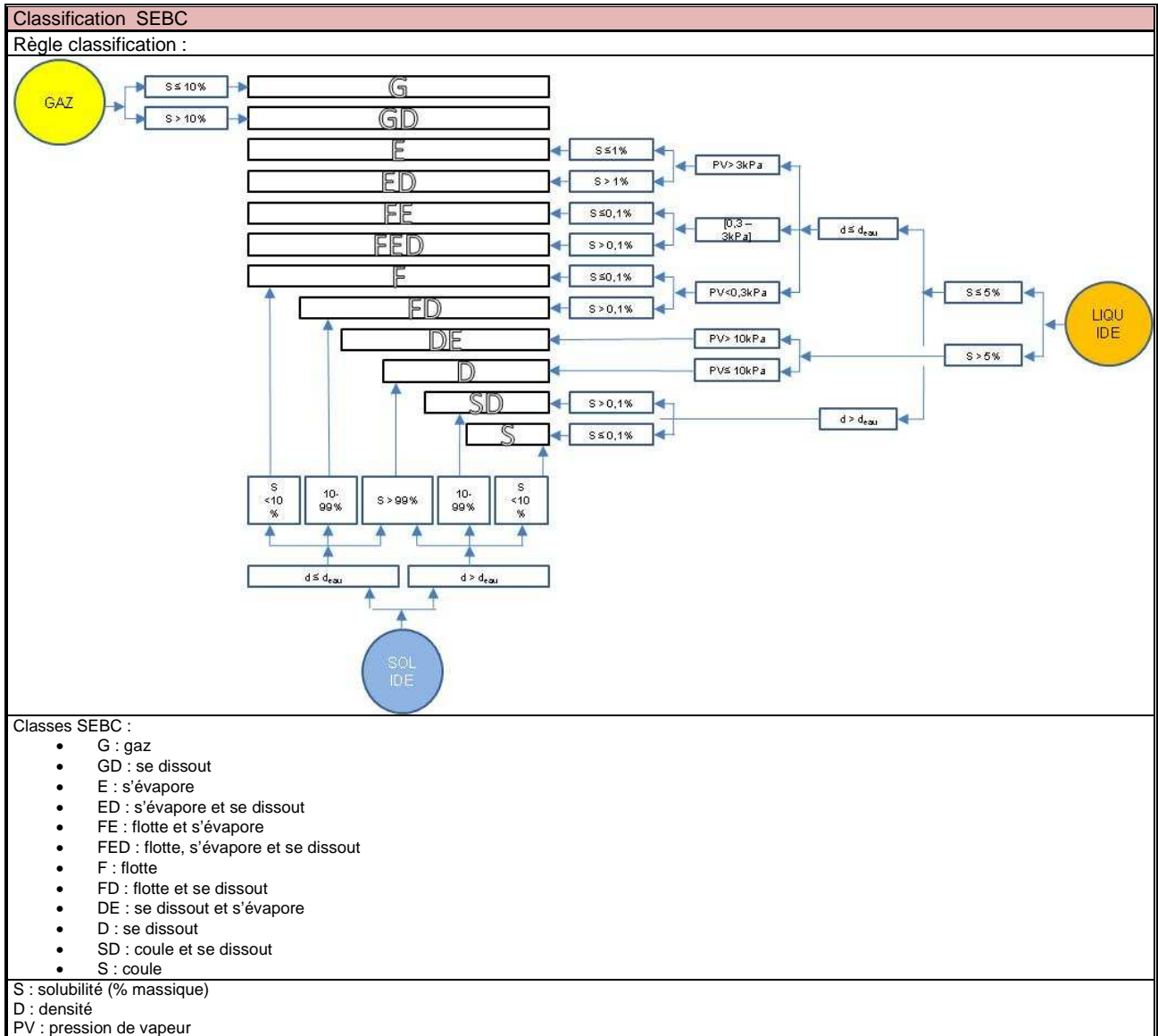
RISQUES LIÉS A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            En cas de contact avec la substance, laver les yeux ou la peau immédiatement à l'eau courante pendant au moins 20 minutes.            Laver la peau au savon et à l'eau.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Les effets liés à l'exposition (inhalation, ingestion ou contact avec la peau) peuvent être retardés.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUE DETECTION)</b>	
Appareils respiratoires. Gants, bottes, pantalon ou tablier plastique. Explosimètre. Pompes, lampes, outils, etc. de type "Ex". Si nécessaire combinaison légère. (Pompe: Inox. Tuyau: "Viton"). (Filtre: BRUN: A).	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE (/EXPLOSION)</b>	
S'enflammera facilement sous l'action de la chaleur, d'étincelles ou de flammes. Les vapeurs peuvent former des mélanges explosifs avec l'air. Les vapeurs peuvent se propager vers une source d'allumage et provoquer un retour de flamme au point de fuite. La plupart des vapeurs sont plus lourdes que l'air. Elles se propageront au ras du sol pour s'accumuler dans les dépressions ou les endroits clos (égouts, sous-sols, citernes). Les vapeurs posent un risque explosif à l'intérieur, à l'extérieur ou dans les égouts. Les substances identifiées avec la lettre (P) peuvent polymériser explosivement lorsque chauffées ou impliquées dans un incendie. Le ruissellement vers les égouts peut créer un risque de feu ou d'explosion. Les contenants peuvent exploser lorsque chauffés. Plusieurs liquides sont moins denses que l'eau.	
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée.	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Si l'intervention peut être rapide (avant que la totalité du benzène ne soit évaporée), on peut essayer de confiner la nappe à l'aide de barrages flottants. En théorie, la récupération du benzène en mer ne sera possible que lorsque la température de l'eau sera inférieure à + 5,5°C, point de congélation du benzène. Dans ce cas, les amas flottants de benzène pourront être enlevés par écrémage ou absorbé par capillarité par des absorbants en micro-fibres de polypropylène oléophiles et hydrophobes  ÉLIMINER du site toute source d'allumage (ex : cigarette, fusée routière, étincelles et flammes). Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse. Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé. Si sans risque, arrêter la fuite. Empêcher l'infiltration dans les cours d'eau, les égouts, les sous-sols ou les endroits clos. Une mousse antivapeur peut être utilisée pour réduire les émanations. Absorber ou couvrir avec de la terre sèche, du sable ou tout autre produit non-combustible et transférer dans des contenants. Utiliser des outils antiétincelles propres pour récupérer le matériel absorbé.	

## 4 Scénarios

MODELISATIONS						
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nappe évaporante Nuage toxique Feu flash / VCE					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :						
Rayon maximal de nappe :	100 m	450 m	450 m	60 m	400 m	380 m
Distance LIE :	450 m	2400 m	750 m	200 m	600 m	500 m
Distance ½ LIE :	600 m	2600 m	1600 m	250 m	700 m	600 m
Hauteur nuage inflammable	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m	< 5 m
Distance SER 60 m in (ERPG1) :	5000 m	> 10 km	> 10 km	1300 m	8200 m	10 km
Hauteur nuage au SER 60 min	15 m	25 m	30 m	25 m	100 m	100 m
Distance seuil olfactif :	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine en dessous de la ligne de flottaison</b>					
Par rapport à un rejet sur l'eau, une partie plus importante du benzène sera dissoute lors de la phase de remontée du benzène à la surface – benzène un peu moins dense que l'eau. Cette part dissoute sera déduite des émissions à l'atmosphère, engendrant sans doute des nappes de benzène un peu moins étendues à la surface : les distances seront donc un peu réduites par rapport aux distances affichées pour un rejet équivalent au-dessus de l'eau. La solubilité du benzène est toutefois faible (+ faible en mer qu'en eau douce).						

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

## 5 Annexes



**Echelle de solubilité aqueuse**

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000

Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

## 3-2.8 FICHE XYLENE

**PRODUIT :**  
**XYLENE**

### FICHE INFORMATION Produit et Scénario

**FAMILLE :**  
**FLOTTANT /  
EVAPORANT**

Identification substance			
Nom substance			
Nom commercial	XYLENE (o, m ,p)	Product Name (Angl)	Xylene, xylol
Synonymes	Diméthbenzène	Nom chimique	Xylène
Numéro d'identification			
N°CAS	95-47-6	CODE ONU	1307
N°EINECS	215-535-7		

Identification rapide des risques					
Classification GORSAP	Santé	Feu	Instabilité chimique avec la chaleur	Réaction avec l'eau	Formation mélange explosible avec l'air
Indice (1 à 4)	2 (Dangereux)	3 (Très dangereux)	0 (Pas ou très peu de danger)	0 (Pas ou très peu de danger)	2 (Dangereux)

Code du travail	
Symbole Danger	Phrases de risques
	Nature des risques particuliers (phrases R) : R10 : Inflammable. R20/21 : Nocif par inhalation et par contact avec la peau.
	Conseils de prudence (phrases S) : S2 : Conserver hors de la portée des enfants. S25 : Eviter le contact avec les yeux.

Transport			
Pictogrammes	Signification pictogramme	Code danger :	Signification code danger
	N°3 : Liquide inflammable	33	Matière liquide très inflammable, point éclair inférieur à 23°C

Risque spécifique lié au transport maritime
Pas de risque spécifique identifié

Sélection guide intervention			
N°fiche GORSAP	1307	Code fiche CHRIS MANUAL	XLM, XLP, XLO
N°fiche CANUTEC	130	N°fiche INRS	FT77
Code fiche IMDG	F-E ; S-D		

## 1 Caractéristiques techniques du navire

Plan navire type	



Informations techniques utiles
Deux types de chimiquier : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chimiquier : 5000 t</li> <li>• Chimiquier / Pétrolier : 40 000 t</li> </ul>
Informations techniques particulières

## 2 Risques liés aux produits

Description / Constante / Comportement du Produit			
Formule (brute / développée)	C8H10 / C6H4(CH3)2	Densité de vapeur relative	2,7
Masse molaire	106 g/mol	Produits de décomposition en cas d'incendie : la combustion complète, en présence d'excès d'air, génère du dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ), de la vapeur d'eau, NO <sub>x</sub> . la combustion incomplète génère en outre du monoxyde de carbone (CO), de la suie et des produits de craquage: aldéhydes, cétones, carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ,etc...	
Etat physique (à 20°C)	Liquide		
Etat physique transporté	Liquide	Comportement en cas de	
Couleur	Incolore	• choc	Pas de réaction
Odeur	Aromatique	• contact avec l'air	Pas de réaction
pH		• contact avec l'eau	Pas de réaction
Température d'ébullition	80 °C	Réactions chimiques dangereuses : Réagit avec les acides forts et les oxydants forts .	
Point éclair	-11°C		
Température d'auto-ignition	538 à 650°C		
Limites d'explosivité (air)	1,3 % - 7,1 %		
Tension de vapeur (20°C)	100 hPa		
Densité liquide relative (20°C)	0,88		
Solubilité dans l'eau	Peu soluble		
Classification SEBC	FE (s'évapore et d'évapore)		

TOXICITE			
Sur l'homme			
Effets sur l'homme	Effets des expositions de courte durée : La substance est irritante pour les yeux et la peau. La substance peut avoir des effets sur le système nerveux central. L'ingestion du liquide peut entraîner une aspiration au niveau des poumons avec un risque de pneumopathie. Effets des expositions prolongées ou répétées : Le liquide dégraisse la peau. La substance peut avoir des effets sur le système nerveux central. Cette substance peut renforcer les problèmes auditifs causés par l'exposition au bruit. Les tests chez l'animal montrent que cette substance peut entraîner des effets toxiques sur la reproduction ou le développement chez l'homme.		
Voies d'exposition	Inhalation	Vertiges. Somnolence. Maux de tête. Nausées.	
	Peau	Rougeur. Douleur.	
	Ingestion	Sensation de brûlure. Douleurs abdominales. Risque de troubles graves en cas d'aspiration dans les poumons (au cours de vomissements par exemple)	
Sur l'environnement			
Classification MARPOL	C		
Seuils de toxicité par inhalation (à 25 °C et 101 kPa, 1 ppm = 4,3 mg.m <sup>-3</sup> ) Origine du choix des valeurs : Guide pratique de choix des valeurs seuils de toxicité aiguë en cas d'absence de valeurs françaises - Rapport d'étude INERIS - N° DRC-08-94398-02798A			
Effets létaux (SEL 1%)	<b>10 800 mg/m<sup>3</sup> / 2500 ppm (Urgence)</b>		AEGL 3
Effets irréversibles (SEI)	<b>3990 mg/m<sup>3</sup> / 920 ppm (Urgence)</b>		AEGL 2
Effets réversibles (SER)	<b>564 mg/m<sup>3</sup> / 130 ppm (Urgence)</b>		AEGL 1
Autres seuils			
Seuil olfactif	<b>4 mg.m<sup>-3</sup></b>		
IDLH	<b>NR</b>		
VME	<b>50 ppm</b>		

### 3 Intervention

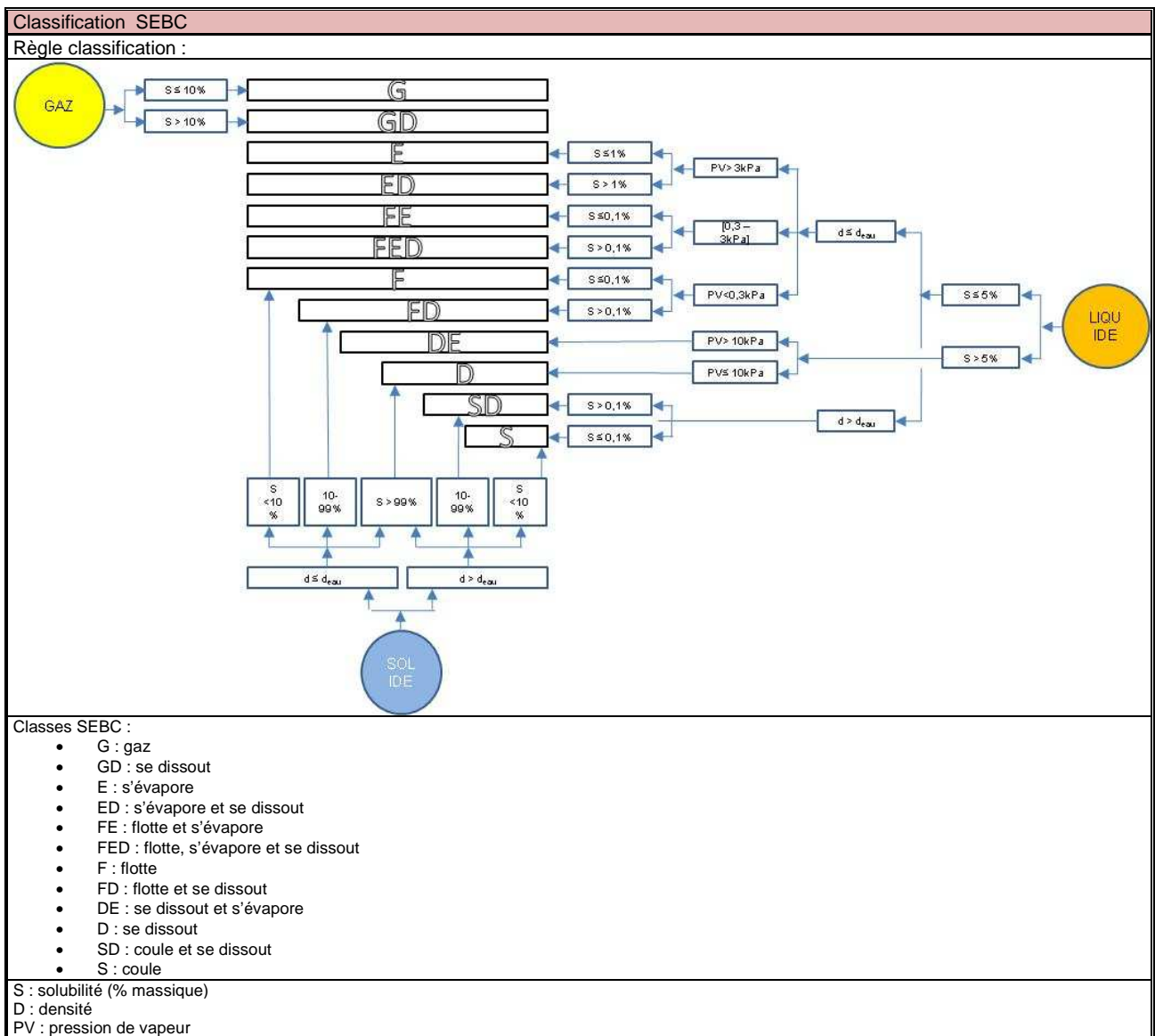
RISQUES LIES A L'INTERVENTION	
<b>PREMIERS SECOURS</b>	
<p>Transporter la victime à l'air frais.            Contacter les services médicaux d'urgence.            En cas d'arrêt respiratoire, appliquer la respiration artificielle.            En cas de gêne respiratoire, donner de l'oxygène.            Enlever vêtements et souliers contaminés puis les isoler.            En cas de contact avec la substance, laver les yeux ou la peau immédiatement à l'eau courante pendant au moins 20 minutes.            Laver la peau au savon et à l'eau.            En cas de brûlure, refroidir immédiatement la zone affectée le plus longtemps possible avec de l'eau froide. Ne pas enlever les vêtements si ces derniers sont collés à la peau.            Calmer la victime et la couvrir chaudement.            Les effets liés à l'exposition (inhalation, ingestion ou contact avec la peau) peuvent être retardés.            Aviser le personnel médical de l'identité du produit afin qu'ils prennent les dispositions nécessaires pour assurer leur sécurité.</p>	
<b>MATERIELS DE DETECTION</b>	
Détection des vapeurs	Tubes de détection (ex : Dräger) Appareil à photo-ionisation Chromatographe gaz portatif Capteurs de gaz à semi-conducteurs Détecteur de gaz à IR Spectromètre de masse mobile
Inflammabilité & Explosivité	Explosimètre Détecteur de gaz combustible
Déficit en Oxygène	Oxymètre
<b>MATERIELS (AUTRES QUÉ DETECTION)</b>	
Appareils respiratoires. Gants, bottes, pantalon ou tablier plastique. Explosimètre. Lampes, outils, radios VHF UHF... antidéflagrants. Si nécessaire combinaison "légère". (Pompe: Inox. Tuyau: "Viton"). (Filtre: BRUN: A).	
<b>MESURES DE LUTTE CONTRE L'INCENDIE</b>	
En général	ATTENTION: Toutes ces substances ont un point d'éclair très bas. L'eau pulvérisée lors d'un incendie peut s'avérer inefficace.
Incendie mineur	Poudre chimique sèche, CO2, eau pulvérisée ou mousse régulière.
Incendie majeur	Eau pulvérisée ou en brouillard, ou mousse. <b>Ne pas employer de jet d'eau.</b> Éloigner les contenants de la zone de feu si cela peut se faire sans risque.
Incendie impliquant des capacités	Combattre l'incendie d'une distance maximale ou utiliser des lances ou canons à eau télécommandés. Refroidir les contenants à grande eau longtemps après l'extinction de l'incendie. Se retirer immédiatement si le sifflement émis par les dispositifs de sécurité augmente ou si la citerne se décolore. <b>TOUJOURS se tenir éloigné d'une citerne engouffrée par les flammes.</b> Pour un incendie majeur, utiliser des lances ou des canons à eau télécommandés; lorsqu'impossible, se retirer et laisser brûler.
<b>MESURES DE PROTECTION EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
Porter un Appareil de Protection Respiratoire Autonome (APRA) à pression positive. Les vêtements de protection pour feux d'immeubles ne fourniront qu'une efficacité limitée.	
<b>MESURES EN CAS DE DISPERSION ACCIDENTELLE</b>	
<p><b>Ças général :</b>            ÉLIMINER du site toute source d'allumage (ex: cigarette, fusée routière, étincelles et flammes).            Tout équipement utilisé pour manipuler ce produit doit être mis à la masse.            Ne pas toucher ou marcher sur le produit déversé.            Si sans risque, arrêter la fuite.            Empêcher l'infiltration dans les cours d'eau, les égouts, les sous-sols ou les endroits clos.            Une mousse antivapeur peut être utilisée pour réduire les émanations.            Absorber ou couvrir avec de la terre sèche, du sable ou tout autre produit non-combustible et transférer dans des contenants.            Utiliser des outils antiétincelles propres pour récupérer le matériel absorbé.</p> <p><b>Déversement majeur :</b>            Endiguer à bonne distance du déversement liquide pour en disposer plus tard.            L'eau pulvérisée peut réduire les émanations de vapeurs, mais ne préviendra pas l'ignition dans les endroits clos.</p> <p><b>Déversement sur le pont:</b>            En cas de déversement sur le pont, laver à grande eau en rejetant l'eau de lavage à la mer [CEDRE].</p>	

## 4 Scénarios

MODELISATIONS						
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine au-dessus de la ligne de flottaison</b>					
Météorologie :	Type : Calme Condition météo : F2			Type : Agité Condition météo : D10		
Conséquences et risques :	Nappe évaporante Nuage toxique Feu de nappe					
Taille brèche :	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques cm <sup>2</sup> (0,002 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques dm <sup>2</sup> (0,05 m <sup>2</sup> )	De l'ordre de quelques m <sup>2</sup> (2 m <sup>2</sup> )
Commentaires :						
Rayon maximal de nappe :	330 m	600 m	600 m	220 m	550 m	550 m
Distance LIE :	non atteinte	non atteinte	non atteinte	non atteinte	non atteinte	non atteinte
Distance ½ LIE :	630 m	1000 m	700 m	250 m	600 m	600 m
Distance SER :	2200 m	3800	3900 m	700 m	1400 m	1200 m
Distance seuil olfactif :	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.	n. c.
Hauteur nuage au SER	5 m	10 m	10 m	10 m	20 m	15 m
SCENARIO :	<b>Brèche cuve pleine en dessous de la ligne de flottaison</b>					
Par rapport à un rejet sur l'eau, une partie plus importante du xylène sera dissoute lors de la phase de remontée du xylène à la surface – xylène un peu moins dense que l'eau. Cette part dissoute sera déduite des émissions à l'atmosphère, engendrant sans doute des nappes de xylène un peu moins étendues à la surface : les distances seront donc un peu réduites par rapport aux distances affichées pour un rejet équivalent au-dessus de l'eau. La solubilité du xylène est toutefois faible.						

Transposition condition météo (BEAUFORT, vitesse de vent) avec les conditions météo modélisées							
Conditions météo modélisées	beaufort	min noeud	max noeud	min km/h	max km/h	min m/s	max m/s
Calme	0	0	1	0	1	0	0,3
	1	1	3	1	5	0,3	1
	2	4	6	6	11	2	3
	3	7	10	12	19	3	5
Agité	4	11	15	20	28	6	8
	5	16	20	29	38	8	11
	6	21	26	39	49	11	14
	7	27	33	50	61	14	17
	8	34	40	62	74	17	21
	9	41	47	75	88	21	24
	10	48	55	89	102	25	28
	11	53	63	103	107	29	30
	12	64	>64	118	>118	33	>33

# 5 Annexes



**Echelle de solubilité aqueuse**

Classe de solubilité	Produit (g)	Quantité Minimale Eau (ml)	Quantité Maximale Eau (ml)
Très soluble	1	0	1
Facilement soluble	1	1	10
Soluble	1	10	30
Assez soluble	1	30	100
Peu soluble	1	100	1000
Très peu soluble	1	1000	10000
Pratiquement insoluble	1	10000	>10000

Explication phrase de risque
<b>R1</b> Explosif à l'état sec.
<b>R2</b> Risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R3</b> Grand risque d'explosion par le choc, la friction, le feu ou d'autres sources d'ignition.
<b>R4</b> Forme des composés métalliques explosifs très sensibles
<b>R5</b> Danger d'explosion sous l'action de la chaleur.
<b>R6</b> Danger d'explosion en contact ou sans contact avec l'air.
<b>R7</b> Peut provoquer un incendie.
<b>R8</b> Favorise l'inflammation des matières combustibles.
<b>R9</b> Peut exploser en mélange avec des matières combustibles.
<b>R10</b> Inflammable.
<b>R11</b> Facilement inflammable.
<b>R12</b> Extrêmement inflammable.
<b>R14</b> Réagit violemment au contact de l'eau.
<b>R15</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz extrêmement inflammables.
<b>R16</b> Peut exploser en mélange avec des substances comburantes.
<b>R17</b> Spontanément inflammable à l'air.
<b>R18</b> Lors de l'utilisation, formation possible de mélange vapeur-air inflammable/explosif.
<b>R19</b> Peut former des peroxydes explosifs.
<b>R20</b> Nocif par inhalation.
<b>R21</b> Nocif par contact avec la peau.
<b>R22</b> Nocif en cas d'ingestion.
<b>R23</b> Toxique par inhalation.
<b>R24</b> Toxique par contact avec la peau.
<b>R25</b> Toxique en cas d'ingestion.
<b>R26</b> Très toxique par inhalation.
<b>R27</b> Très toxique par contact avec la peau.
<b>R28</b> Très toxique en cas d'ingestion.
<b>R29</b> Au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques.
<b>R30</b> Peut devenir facilement inflammable pendant l'utilisation.
<b>R31</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz toxique.
<b>R32</b> Au contact d'un acide, dégage un gaz très toxique.
<b>R33</b> Danger d'effets cumulatifs.
<b>R34</b> Provoque des brûlures.
<b>R35</b> Provoque de graves brûlures.
<b>R36</b> Irritant pour les yeux.
<b>R37</b> Irritant pour les voies respiratoires.
<b>R38</b> Irritant pour la peau.
<b>R39</b> Danger d'effets irréversibles très graves.
<b>R40</b> Effet cancérigène suspecté : preuves insuffisantes.
<b>R41</b> Risque de lésions oculaires graves.
<b>R42</b> Peut entraîner une sensibilisation par inhalation.
<b>R43</b> Peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau.
<b>R44</b> Risque d'explosion si chauffé en ambiance confinée.
<b>R45</b> Peut provoquer le cancer.
<b>R46</b> Peut provoquer des altérations génétiques héréditaires.
<b>R48</b> Risque d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée.
<b>R49</b> Peut provoquer le cancer par inhalation.
<b>R50</b> Très toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R51</b> Toxique pour les organismes aquatiques.
<b>R52</b> Nocif pour les organismes aquatiques.
<b>R53</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique
<b>R54</b> Toxique pour la flore.
<b>R55</b> Toxique pour la faune.
<b>R56</b> Toxique pour les organismes du sol.
<b>R57</b> Toxique pour les abeilles.
<b>R58</b> Peut entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement.
<b>R59</b> Dangereux pour la couche d'ozone.
<b>R60</b> Peut altérer la fertilité.
<b>R61</b> Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R62</b> Risque possible d'altération de la fertilité.
<b>R63</b> Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant.
<b>R64</b> Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel.
<b>R65</b> Nocif : peut provoquer une atteinte des poumons en cas d'ingestion.
<b>R66</b> L'exposition répétée peut provoquer dessèchement ou gerçures de la peau.
<b>R67</b> L'inhalation de vapeurs peut provoquer somnolence et vertiges.
<b>R68</b> Possibilité d'effets irréversibles.

Explication conseil de prudence
<b>S1</b> Conserver sous clé.
<b>S2</b> Conserver hors de la portée des enfants.
<b>S3</b> Conserver dans un endroit frais.
<b>S4</b> Conserver à l'écart de tout local d'habitation.
<b>S5</b> Conserver sous... ( <i>liquide approprié à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S6</b> Conserver sous... ( <i>gaz inerte à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S7</b> Conserver le récipient bien fermé.
<b>S8</b> Conserver le récipient à l'abri de l'humidité.
<b>S9</b> Conserver le récipient dans un endroit bien ventilé.
<b>S12</b> Ne pas fermer hermétiquement le récipient.
<b>S13</b> Conserver à l'écart des aliments et boissons y compris ceux pour animaux.
<b>S14</b> Conserver à l'écart des... ( <i>matière(s) incompatible(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S15</b> Conserver à l'écart de la chaleur.
<b>S16</b> Conserver à l'écart de toute flamme ou source d'étincelles - Ne pas fumer.
<b>S17</b> Tenir à l'écart des matières combustibles.
<b>S18</b> Manipuler et ouvrir le récipient avec prudence.
<b>S20</b> Ne pas manger et ne pas boire pendant l'utilisation.
<b>S21</b> Ne pas fumer pendant l'utilisation.
<b>S22</b> Ne pas respirer les poussières.
<b>S23</b> Ne pas respirer les gaz/vapeurs/ fumées/aérosols ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S24</b> Éviter le contact avec la peau.
<b>S25</b> Éviter le contact avec les yeux.
<b>S26</b> En cas de contact avec les yeux, laver immédiatement et abondamment avec de l'eau et consulter un spécialiste.
<b>S27</b> Enlever immédiatement tout vêtement souillé ou éclaboussé.
<b>S28</b> Après contact avec la peau, se laver immédiatement et abondamment avec... ( <i>produits appropriés à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S29</b> Ne pas jeter les résidus à l'égout.
<b>S30</b> Ne jamais verser de l'eau dans ce produit.
<b>S33</b> Éviter l'accumulation de charges électrostatiques.
<b>S35</b> Ne se débarrasser de ce produit et de son récipient qu'en prenant toutes précautions d'usage.
<b>S36</b> Porter un vêtement de protection approprié.
<b>S37</b> Porter des gants appropriés.
<b>S38</b> En cas de ventilation insuffisante, porter un appareil respiratoire approprié.
<b>S39</b> Porter un appareil de protection des yeux / du visage.
<b>S40</b> Pour nettoyer le sol ou les objets souillés par ce produit, utiliser ... ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S41</b> En cas d'incendie et/ou d'explosion ne pas respirer les fumées.
<b>S42</b> Pendant les fumigations/pulvérisations porter un appareil respiratoire approprié ( <i>terme(s) approprié(s) à indiquer par le fabricant</i> ).
<b>S43</b> En cas d'incendie utiliser... ( <i>moyens d'extinction à préciser par le fabricant. Si l'eau augmente les risques, ajouter "Ne jamais utiliser d'eau"</i> ).
<b>S45</b> En cas d'accident ou de malaise consulter immédiatement un médecin ( <i>si possible lui montrer l'étiquette</i> ) .
<b>S46</b> En cas d'ingestion consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S47</b> Conserver à une température ne dépassant pas... °C ( <i>à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S48</b> Maintenir humide avec... ( <i>moyen approprié à préciser par le fabricant</i> ).
<b>S49</b> Conserver uniquement dans le récipient d'origine.
<b>S50</b> Ne pas mélanger avec... ( <i>à spécifier par le fabricant</i> ).
<b>S51</b> Utiliser seulement dans des zones bien ventilées.
<b>S52</b> Ne pas utiliser sur de grandes surfaces dans les locaux habités.
<b>S53</b> Éviter l'exposition, se procurer des instructions spéciales avant l'utilisation.
<b>S56</b> Éliminer ce produit et son récipient dans un centre de collecte des déchets dangereux ou spéciaux.
<b>S57</b> Utiliser un récipient approprié pour éviter toute contamination du milieu ambiant.
<b>S59</b> Consulter le fabricant ou le fournisseur pour des informations relatives à la récupération ou au recyclage.
<b>S60</b> Éliminer le produit et son récipient comme un déchet dangereux.
<b>S61</b> Éviter le rejet dans l'environnement. Consulter les instructions spéciales / la fiche de données de sécurité.
<b>S62</b> En cas d'ingestion, ne pas faire vomir. Consulter immédiatement un médecin et lui montrer l'emballage ou l'étiquette.
<b>S63</b> En cas d'accident par inhalation, transporter la victime hors de la zone contaminée et la garder au repos.
<b>S64</b> En cas d'ingestion, rincer la bouche avec de l'eau ( <i>seulement si la personne est consciente</i> )

### **3.3 MISE A DISPOSITION DES DONNEES : UN OUTIL DE CARTOGRAPHIE DYNAMIQUE SUR INTERNET**

### 3.3.1 Contexte

Un des enjeux majeurs de la lutte contre les pollutions marines accidentelles réside dans la gestion et l'utilisation optimale du grand nombre d'informations générées, transmises et exploitées. Les données doivent être exploitées rapidement, interprétées et mises en forme de façon la plus pertinente et la plus synthétique possible, afin d'apprécier la situation, de fournir une aide à la décision et de permettre un suivi ultérieur.

Ceci est d'autant plus vrai en cas de suspicion de pollution par substance dangereuse sous forme gazeuse après un accident maritime. Les risques sont importants et leur appréciation permet de :

- Déterminer l'existence d'une fuite de produit et la quantifier.
- Décider des possibilités et conditions d'envoi d'une Equipe Evaluation Intervention (EEI) sur le navire.
- Définir des zones d'exclusion de navigation.
- Estimer les risques pour les populations potentiellement exposées.

Dans ces conditions, les moyens de reconnaissance doivent être :

- Rapidement et facilement disponibles.
- Aisément déployables sur zone.
- Autonomes.
- Dotés de capteurs fiables correspondant aux produits impliqués dans l'accident.
- Capables de donner une vue d'ensemble des zones dangereuses.
- Munis de moyens de transmission de données en temps réel vers le navire de commandement sur zone.
- Equipés de systèmes de positionnement précis (à quelques mètres près).
- Capables d'effectuer des mesures à différentes hauteurs (au dessus d'un navire, au dessus du plan d'eau, voire sur le pont du navire).
- ATEX (ils ne doivent pas présenter de risques d'inflammation des nuages gazeux).



Il faut ainsi différencier le vecteur support (flottant de type canot, ou aérien de type drone) du système d'acquisition des données (mesures atmosphériques à différents niveaux d'élévation et position).

Nous avons appelé VAUTOUR (Vecteur AUTOname de sUrface pour la Reconnaissance) le système complet, engin autonome, détecteur et transmetteur.

Le rôle du navire de commandement est de transformer les données brutes recueillies par le Vautour et de les intégrer en une cartographie simple indiquant dans un système géoréférencé la présence et la teneur en gaz toxique et/ou inflammable.

Dans un souci de simplification de lecture, les concentrations peuvent être notées par rapport à une valeur de référence, par exemple la Limite Inférieure d'Inflammabilité, (LII) ou la Valeur Limite d'Exposition (VLE). Ainsi n'apparaissent que des couleurs vertes (concentrations inférieures aux valeurs limites), orange (50% de la valeur limite) ou rouge (égale ou supérieure à la valeur limite).

Pour ce faire le navire OSC doit disposer des équipements suivants :

- Logiciel permettant d'intégrer les données du capteur (concentrations en produit, altitude, position), au sein d'un système cartographique.
- Dispositif performant de transfert de données par satellite.

Par ailleurs, un opérateur chimiste (Marin Pompier) doit être formé pour le paramétrage de l'appareil et l'interprétation des données à bord.

La transmission se fait ensuite très rapidement en temps semi-réel par satellite vers les divers Postes de Commandement à terre et le Comité d'Experts. Les données sont alors exploitées et diffusées en utilisant un outil de cartographie dédié au Web (Web mapping).

La figure 1 permet de visualiser les flux d'information mis en place entre la détection en mer et l'examen des cartes dans les différents PC à terre.

Pour résumer, la transmission des données se fait en plusieurs étapes :

- a) tout d'abord, le navire centralise toutes les informations in-situ (concentrations mesurées, données météo etc ...).
- b) le navire transmet l'ensemble des informations géoréférencées au PC Opérations sous forme de cartes et de tableaux.
- c) Le Comité d'experts travaille sur ces données, modélise le devenir du nuage gazeux et constitue une nouvelle cartographie plus sophistiquée que celle dont dispose l'OSC.

Au sein du Comité d'Experts, les données sont analysées et interprétées, puis les modèles permettant de prévoir le comportement du produit sont activés à partir des observations et des mesures *in-situ*. Les données d'observation et de modélisation sont ensuite

intégrées dans l'outil de « web mapping », accompagnées d'informations cartographiques complémentaires à la lutte antipollution (bathymétrie, zones sensibles, autres données de références) pour fournir un état synthétique de la situation sur un site Internet sécurisé.

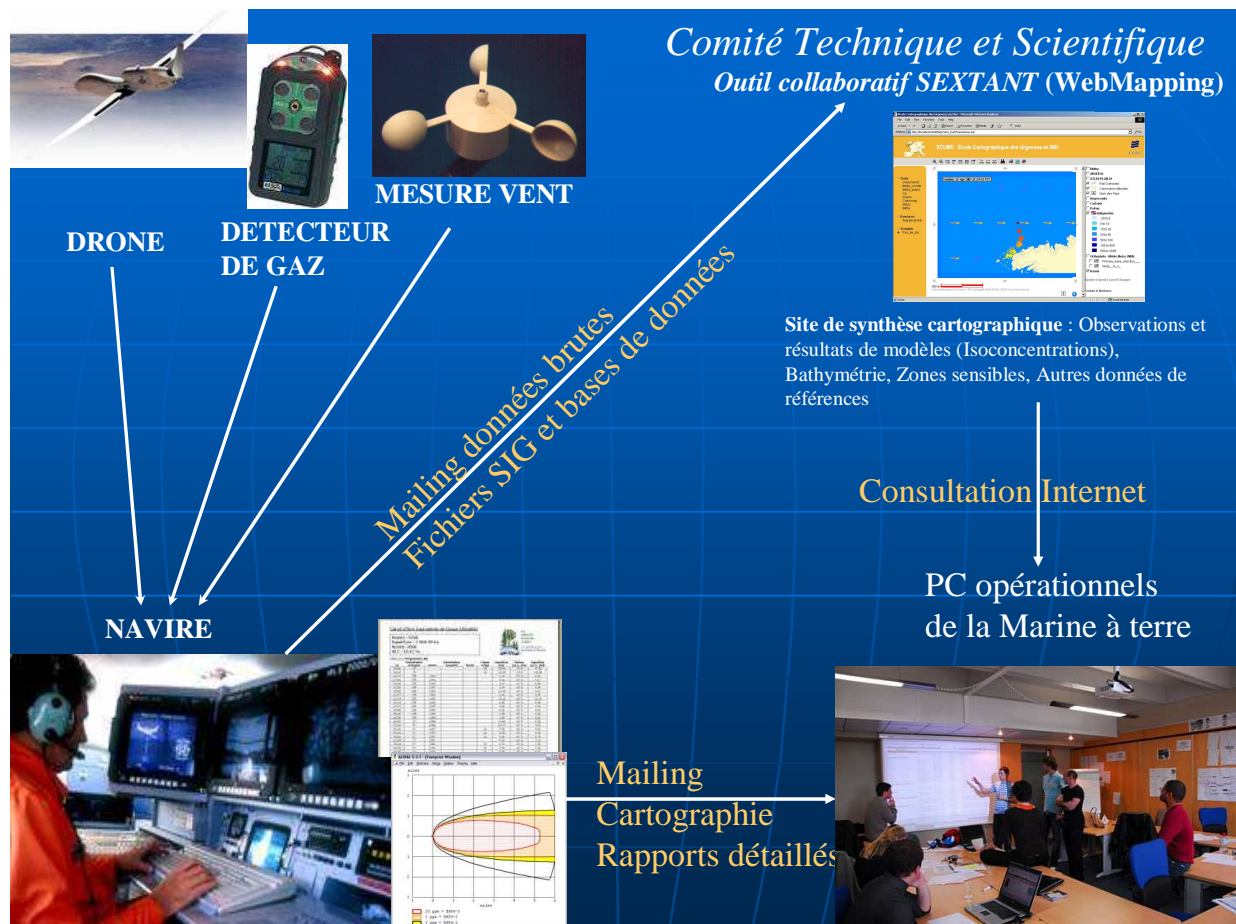


Figure 1. Schéma sur la circulation de l'information

### 3.3.2 Présentation de l'outil développé (cartographie dynamique sur Internet)

L'outil développé par le *Cedre* avec l'assistance de l'Ifremer se place à la convergence de cette circulation de l'information tirant parti de ces nouveaux modes de communication. Il a pour but d'accélérer l'accès aux informations pour les intervenants et leurs conseillers. Institué par le Secrétaire Général de la Mer, le comité de Dérive est constitué de l'Ifremer, du *Cedre*, du SHOM, de Météo-France et de la Marine Nationale. Selon les produits impliqués ou les zones concernées, d'autres experts peuvent être associés tels ceux de l'Ineris dans le cas de diffusion de nuages dangereux.

La diffusion sécurisée de cartes sur Internet via cet outil devrait faciliter par ailleurs les échanges entre ce comité, préférentiellement basé au *Cedre* à Brest, et les centres de gestion de crise, principalement les Préfectures Maritimes.

En 2008, un démonstrateur a été mis en place et testé à l'échelle nationale. Le démonstrateur est exploité dans SEXTANT (Catalogue d'archivage et de diffusion des données géographiques de référence de l'IFREMER). Le *Cedre* vient alimenter le serveur SEXTANT en données d'observations de pollution, de mesures in-situ, de suivi de bouées, de données analysées à partir d'images satellites et de résultats de MOTHY ou d'autres modèles numériques (transport et évolution du polluant). Le *Cedre* analyse puis fournit les données (après mise en forme pour certaines) qui sont automatiquement intégrées à l'aide d'un script dans SEXTANT.

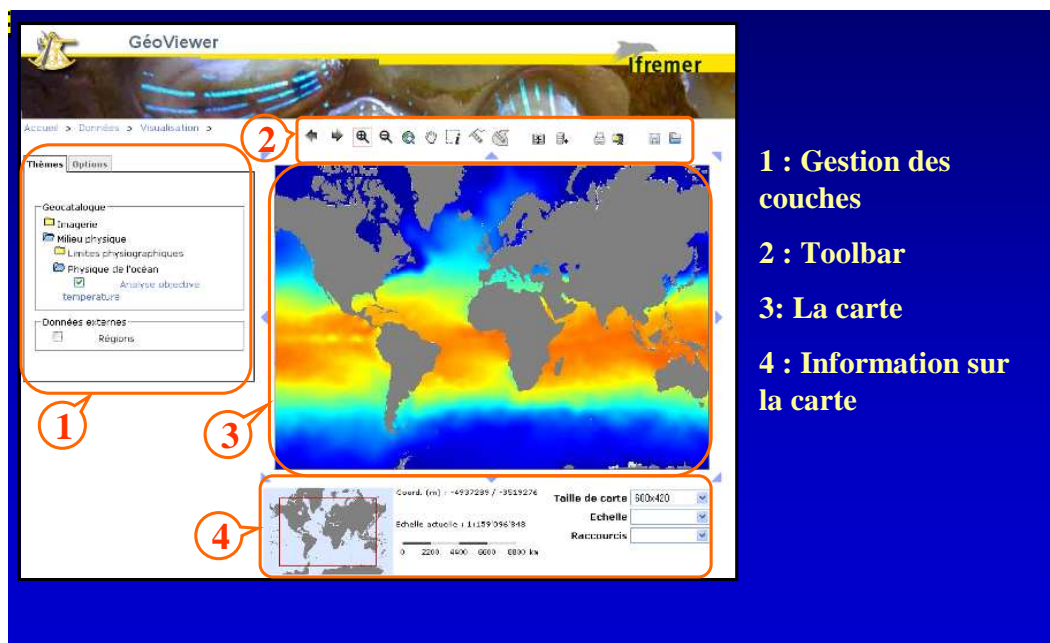


Figure 2. Visualisation de l'outil de cartographie interactif sur Internet (SEXTANT)

L'outil permet l'intégration de différents types de données :

- Vectorielles (Shapefile, Oracle Spatial, PostGIS)
- Images (Scan, Orthophotos, ...)
- Données maillées (Grid)
  - MNT, Lidar Topo
  - Modèles et analyses numériques (hydrodynamique, ...)
  - Climatologies (in situ, satellitaires)

Les métadonnées permettent de documenter les données, afin que tout utilisateur puisse interpréter ces données sans équivoque. Pour favoriser les échanges et la diffusion des métadonnées, il faut standardiser la sémantique (ISO 19115), la syntaxe (ISO 19139) et l'accès aux catalogues (CSW).

L'administration de SEXTANT, même s'il est hébergé à l'Ifremer, peut se faire à distance par l'administrateur désigné du *Cedre*. Le site est bien entendu sécurisé par un mot de passe personnel et différents niveaux d'accès peuvent être mis en place pour les utilisateurs (visualisation, téléchargement etc.).

C'est dans cet outil qu'il est prévu d'intégrer de façon automatique toutes les données cartographiques opérationnelles que le *Cedre* reçoit lors d'une pollution. Ces données seront ensuite diffusées aux autorités de façon sécurisée.<sup>2</sup>

### Adaptation de l'outil de cartographie Web dans le cadre de Galerne

Un exemple d'intégration de données provenant de Galerne est présenté ci-dessous. Il intègre les données suivantes :

- résultats du modèle MOTHY (format shape)
- concentration mesurée du produit en fonction du temps (drone)
- vidéos et images prises du drone
- résultats du modèle ALOHA (isoconcentration à partir du point de déversement).

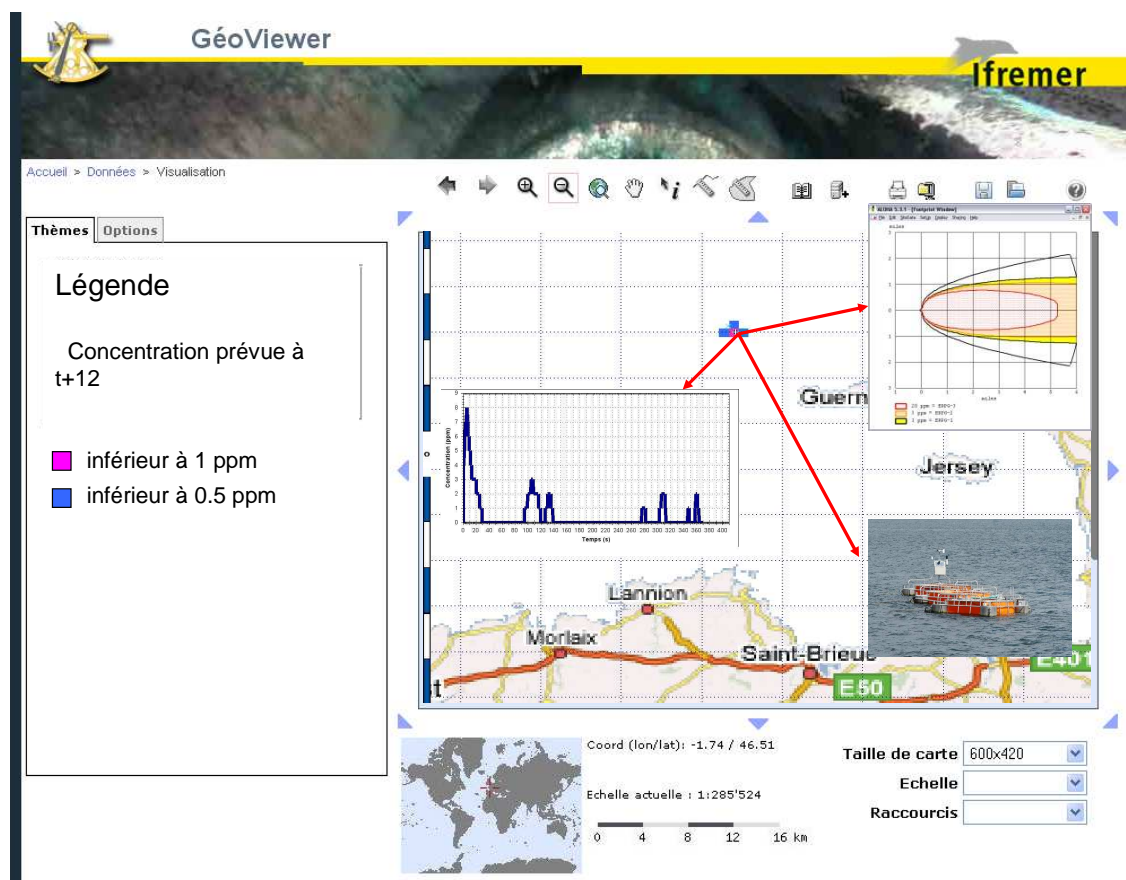


Figure 3. Interface de visualisation des données cartographiques avec lien vers photos, graphique de concentration mesurée et graphique d'isoconcentration modélisée

Nous mentionnons ALOHA car il s'agit d'un modèle simple de dispersion atmosphérique, facilement mis en œuvre à partir du navire OSC. Les résultats sont très conservatifs mais il constitue une première estimation dans l'urgence. D'autres modèles sont plus précis mais nécessitent du personnel spécifiquement formé. Ces modèles peuvent être mis en œuvre dans les comités scientifiques et techniques à terre : modèles CHEMMAP, PHAST, EVOLCODE, PERLE..., modèles dont nous avons parlé dans la Tâche 2.

### **3.3.3 Les expérimentations en cellules flottantes et la transmission des données**

#### **a) Les expérimentations**

Le Drone de Détection Radiologique et Chimique (D2RC) proposé par la société Camka permet de transmettre les mesures de concentration sur zone en temps quasi-réel. En juin 2008, nous avons évalué un prototype commercial du D2RC dont le premier prototype expérimental a été inventé par le LV Brohan, marin pompier à Brest.

Les essais ont été réalisés dans la rade abri du port militaire de Brest, à l'aide du dispositif des "cellules flottantes", permettant une étude du déversement en milieu naturel semi ouvert, afin d'obtenir des conditions proches de la réalité. Ce sont 3 structures métalliques carrées supportant une jupe de 3m de côté, et de 3m de tirant d'eau, conçues pour résister aux produits chimiques étudiés, et permettant de contenir une nappe en surface et ainsi d'étudier les cinétiques d'évaporation et de solubilisation. Ces cellules ont déjà été utilisées pour suivre le comportement de produits chimiques et d'hydrocarbures. Une girouette a été fixée à cette occasion sur la cellule 3, afin de permettre à un capteur PID (Photo Ionisateur Detecteur) de suivre les changements de direction du vent et de prélever le gaz évaporé à tout moment.

L'accès au serveur par le drone nécessite un accès Internet haut débit (128 k remontant minimum). Différentes solutions d'accès vers le point d'accès haut débit sont possibles (WIFI, filaire ...), les points d'accès haut débit peuvent être de différentes natures (ADSL, satellitaire fixe, satellitaire mobile terrestre ou maritime).





Photo 1. Solution satellitaire mobile terrestre. Le véhicule utilisé lors des expérimentations Galerne de Juin 2008, joue le rôle du navire OSC.

L'accès aux résultats se fait ensuite grâce au logiciel d'analyse des données qui inclut, entre autres un module cartographique, un module vidéo, et un module graphique.

Le module cartographique permet de suivre en temps quasi réel le déplacement du drone (position GPS), à chaque pas de temps, ainsi que les mesures *in-situ* de concentration. Les concentrations mesurées sont représentées en fonction de la dangerosité du produit, par exemple, en vert : RAS (aucun risque encouru), en orange : danger chimique.

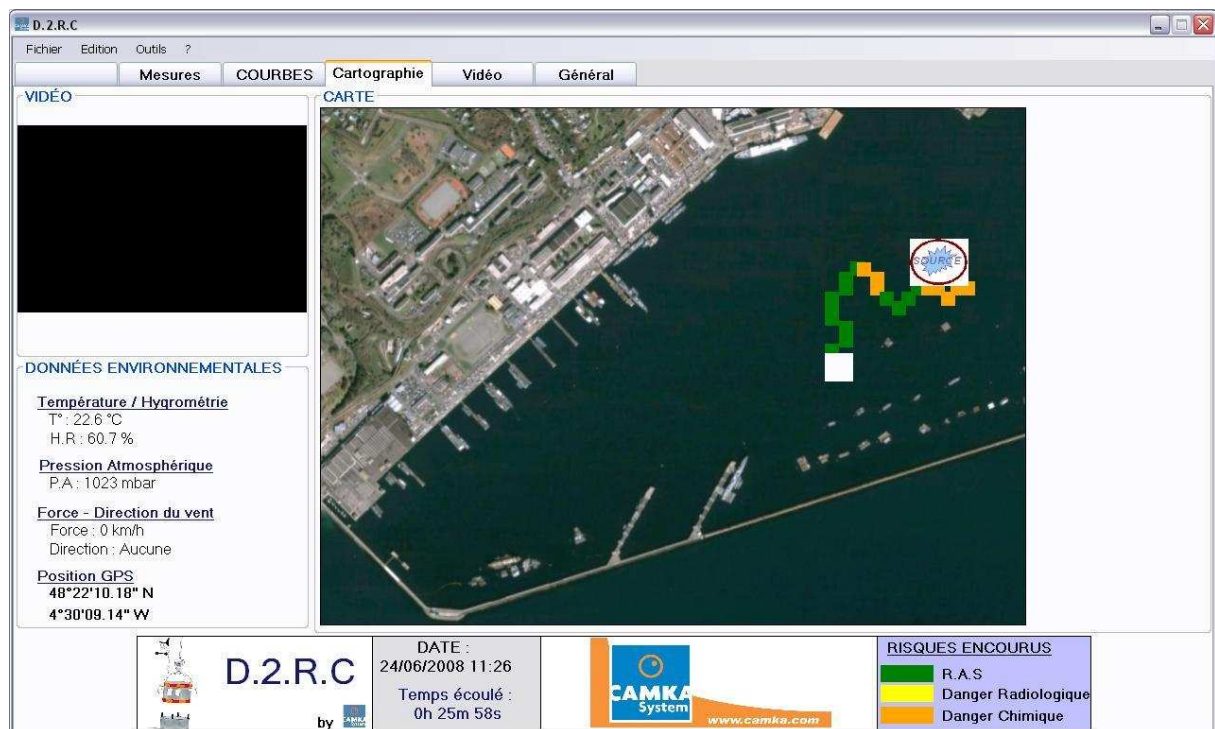


Figure 4. Illustration du module cartographique du logiciel expert

Le logiciel permet également l'accès aux mesures de la concentration en données brutes, en temps quasi-réel (figure 5). Ces données peuvent être ensuite filtrées et insérées dans un Système d'Information Géographique (SIG).

	A	B	C	D
1	DATE	Concentration		
1998	Wed Jun 25 11:45:01 2008	2	Valeur COV en ppm	
1999	Wed Jun 25 11:45:02 2008	2	Valeur COV en ppm	
2000	Wed Jun 25 11:45:03 2008	2	Valeur COV en ppm	
2001	Wed Jun 25 11:45:04 2008	2	Valeur COV en ppm	
2002	Wed Jun 25 11:45:05 2008	2	Valeur COV en ppm	
2003	Wed Jun 25 11:45:06 2008	2	Valeur COV en ppm	
2004	Wed Jun 25 11:45:07 2008	2	Valeur COV en ppm	
2005	Wed Jun 25 11:45:09 2008	0	Valeur COV en ppm	
2006	Wed Jun 25 11:45:11 2008	0	Valeur COV en ppm	
2007	Wed Jun 25 11:45:12 2008	1	Valeur COV en ppm	
2008	Wed Jun 25 11:45:13 2008	1	Valeur COV en ppm	
2009	Wed Jun 25 11:45:14 2008	1	Valeur COV en ppm	
2010	Wed Jun 25 11:45:16 2008	0	Valeur COV en ppm	
2011	Wed Jun 25 11:45:19 2008	0	Valeur COV en ppm	
2012	Wed Jun 25 11:45:20 2008	1	Valeur COV en ppm	
2013	Wed Jun 25 11:45:21 2008	1	Valeur COV en ppm	

*Figure 5. Données brutes transmises par le D2RC*

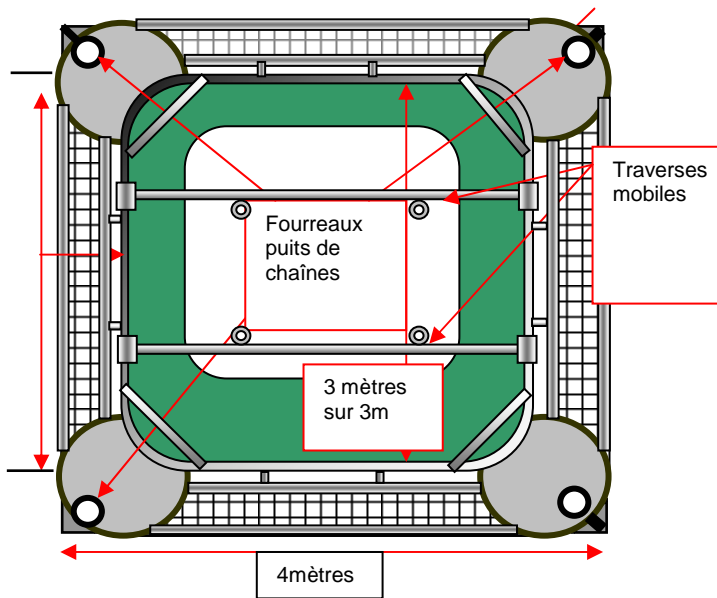


Figure 6 et photo 2. Les cellules flottantes en rade abri



Légende :

- Cellules flottantes
- PC sur zone pour reception des données transmises par le D2RC
- Emplacement de la caméra SPIM et du représentant de la Ceppol
- ▭ Zone de mobilité du D2RC sur pneumatique

Figure 7 : vue aérienne de la zone des expérimentations



Quatre déversements de 20 litres de substances évaporantes (dont deux de Xylènes) ont été effectués durant la semaine du 23/06 au 27/06/2008.

**b). Le D2RC de la société Camka**

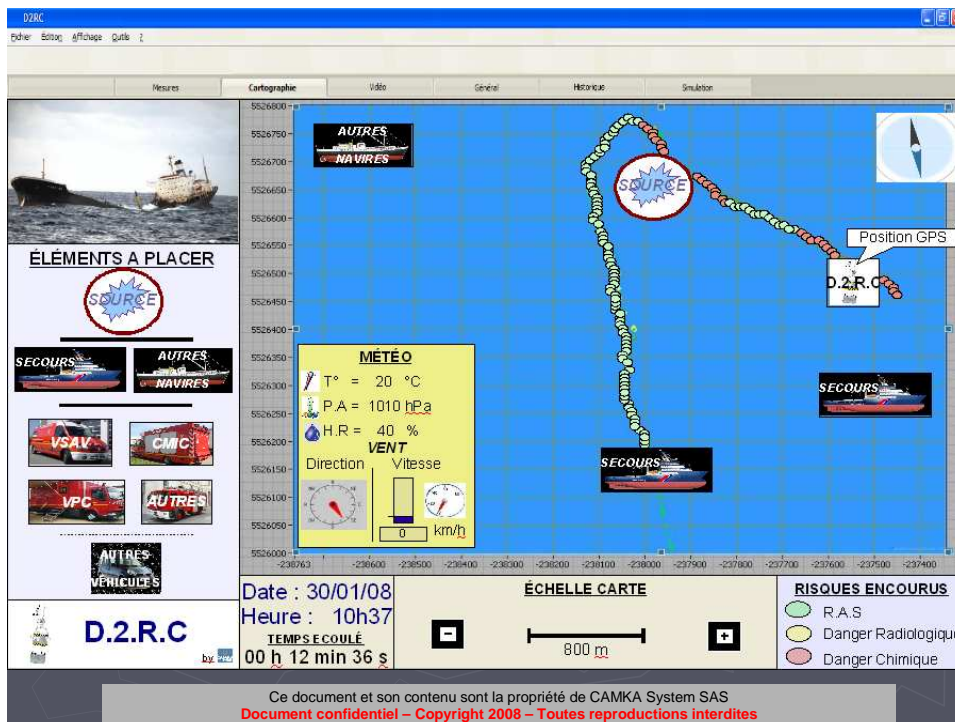
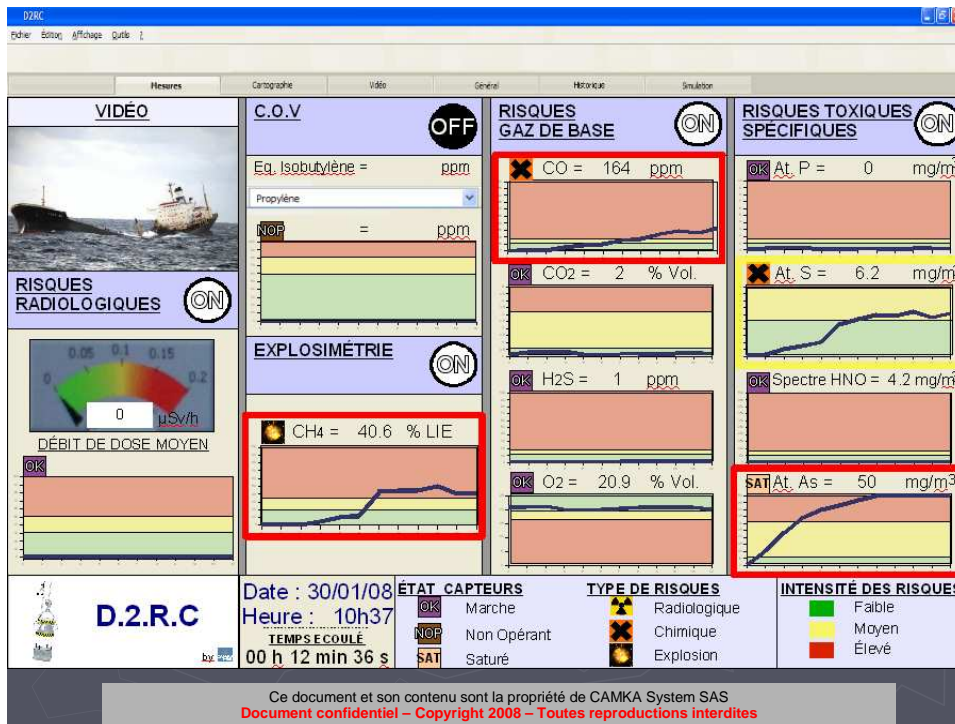
Le Drone de Détection Radiologique et chimique (D2RC) proposé par Camka comporte :

- un capteur PID
- une station météo
- une caméra
- un système de transmission relié à un poste à terre (photo 1), permettant la réception en temps réel de toutes les données mesurées par le drone.

Pour l'occasion, le drone flottant autonome de la société Eca n'étant pas disponible, le *Cedre* a disposé d'un canot pneumatique afin de permettre l'évolution du D2RC dans la zone située sous le vent des déversements (photo 3)



*Photo 3. Le D2RC sur support fixé au pneumatique (Juin 2008)*



Figures 8 et 9. Captures d'écran du logiciel D2RC dans la station de réception

**c) La détection de gaz par caméra hyperspectrale Infrarouge SPIM.**

La société Actimar nous a proposé d'évaluer un capteur imageur hyperspectral infrarouge thermique (SPIM), qui permet d'obtenir après traitement des résultats en 2D + une image spectrale de la zone filmée.

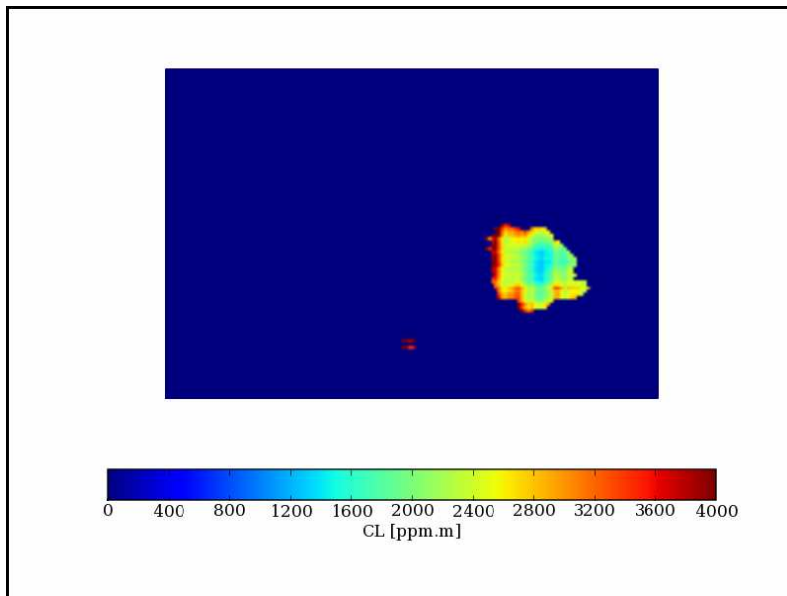
Le SPIM détecte, identifie les gaz et les sépare grâce à un algorithme de détection. Il ne mesure pas une concentration mais donne les résultats en ppm.m (Concentration par longueur optique). Les données sont enregistrées, leur traitement nécessitant une journée environ.

Il a été posé sur la digue à environ 60 mètres des cellules, sa distance de détection étant de plusieurs centaines de mètres (figures 10 et 11). Il sera commercialisé dès l'année prochaine. Il est prévu pour fonctionner en version terrestre, posé au sol comme lors de ces essais (photo 4), aéroportée, ou satellitaire.



*Photo 4. Caméra SPIM posée sur la grande jetée sud de la rade abri du port de Brest*





Figures 10 et 11. Exemple d'images réalisées par le SPIM (essais sur la Méthyl Ethyl Cétone, les Xylènes ne donnant aucune réponse).

#### d) Conclusions

En conclusion de ces essais, les très bonnes conditions météorologiques ont permis une étude facilitée du produit. Le déversement de 20 litres de xylène s'est évaporé en environ 6h30 dans les conditions météorologiques de l'expérimentation, vent de 4 nœuds et ensoleillement fort ( $>120\text{mW}/\text{cm}^2$ ).

Nous avons regretté que le prototype commercial du D2RC n'ait pas disposé d'un système de localisation plus précis et que son poids (plus de 60 kg) rende difficile sa mise en œuvre par mer un peu formée et que les prélèvements d'air soient sur un même plan (environ 2 mètres au dessus du plan d'eau

Cependant, malgré ces réserves, la transmission vers la station réceptrice fonctionne correctement.

Pour ce qui concerne la caméra SPIM, nous notons que le concept est intéressant mais il faudrait étendre son spectre d'action (réponses à différentes substances évaporantes) et surtout mariniser l'appareillage.

### 3.3.4 Le futur : DYNMAP

Le Cedre vient de faire l'acquisition d'un outil (DYNMAP) permettant de diffuser des données cartographiques sur Internet, Intranet ou Extranet. Il permet le partage et la mise à jour de l'Information Géographique entre services, partenaires ou à destination du grand public (voir figure 13).

Ces cartes sont disponibles en temps réel et accessibles au plus grand nombre (décideurs, élus, responsables...) au travers d'un simple navigateur dont l'ergonomie, adaptée à chaque profil d'utilisateur, facilite l'usage au quotidien (GéoSignets, Couches Personnelles...).

Les données sont sécurisées, les profils utilisateurs sont régis par groupes et associés à des cartes ou à des couches particulières. Des règles de filtrage des données et de visualisation peuvent être définies pour accorder à chacun une connexion unique, limitée, sur une même carte.

Cet outil va améliorer les possibilités de diffusion, de transmission et de consultation des données entre les différents opérateurs du projet Galerne. Les données seront intégrées automatiquement ou semi automatiquement dans le serveur, dès réception des données au *Cedre*. Ces données seront ensuite diffusées de façon sécurisée aux différents intervenants. De nombreuses nouvelles fonctionnalités seront disponibles :

- lien interactif vers des images ou des vidéos,
- fonctionnalités de recherche d'informations (exemple : recherche de points de mesures ayant une concentration supérieure à une variable),
- extraction de fichiers Excel à partir des informations visibles sur la carte (exemple : liste de points de mesures)
- élaboration semi-automatique de rapports quotidiens (mixant cartes, tableaux, graphiques, commentaires, images) sur la situation en cours (format pdf)
- analyses thématiques des données simplifiant la prise de décision, (possibilité de rendre ces analyses interactives pour l'utilisateur).

Le serveur cartographique DYNAMAP sera connecté de façon permanente au serveur SEXTANT de l'Ifremer et permettra l'affichage de différents types de données :

- prévision hydrodynamique mise à jour depuis le serveur de PREVIMER<sup>1</sup> (courants, températures, état de la mer, marée),
- autres données issues de modélisations hydrodynamiques (MARS 3D)
- données de références (bathymétrie, trait de côtes, fond de cartes etc...)

Les deux serveurs pourront communiquer grâce aux protocoles WMS (Web Map Service), qui permet la production et la consultation de cartes géoréférencées (images), et WFS (Web Feature Service), plus interactif que le WMS puisqu'il permet la communication de formats dynamiques tels que : lignes, points et polygones (vecteurs). DYNAMAP pourra donc fournir à SEXTANT ou à un autre serveur cartographique, de façon sécurisée et selon autorisation, l'ensemble de ses couches cartographiques. Cela facilitera l'échange d'information entre les différents acteurs dans un format homogène et standardisé.

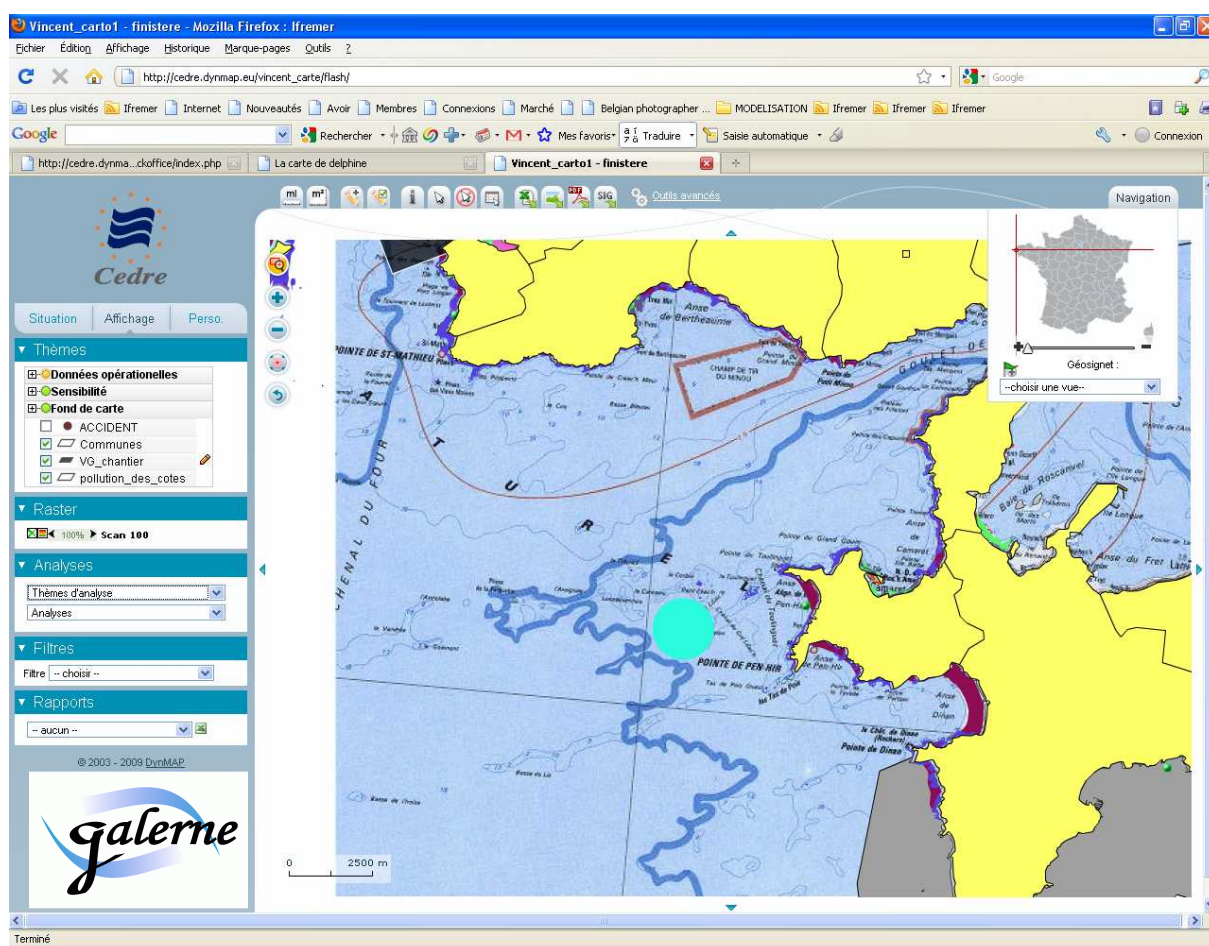


Figure 13 : exemple de visualisation cartographique sous DYNAMAP

<sup>1</sup> Le système PREVIMER fournit des prévisions à court terme de l'environnement côtier sur les trois façades métropolitaines Manche, Atlantique et Méditerranée. Un ensemble d'observations et d'outils de modélisations numériques permettent de fournir des prévisions à 4 jours (96h) sur l'état de mer, les courants, les niveaux de marée, la température et la production primaire.

## 3-4 CONCLUSION

Au terme de la Tâche 3 de GALERNE, qui constitue l'objectif du projet - à savoir la constitution de « Fiches Intervention » sur les gaz liquéfiés et les produits évaporants- nous sommes conscients que la pratique, par l'exercice ou les cas réels, permettra de les faire évoluer sur le fond (ajouts de rubriques, retraits d'autres qui rendent la lisibilité des fiches plus difficile...) ou sur la forme (présentation, taille des caractères, utilisation d'abaques ou de courbes plutôt que de tableaux...).

L'équilibre synthétique entre les nombreuses données disponibles, entre l'indispensable à l'intervention d'urgence et le superflu, n'est pas facile à trouver. Comme tous les équilibres, celui-ci est dynamique et nous ramène au paragraphe précédent. Il faut faire vivre les « Fiches Intervention ».

De même, les moyens de détection sur zone, la transmission des données vers le PC sur zone (On Scene Commander), leur traitement cartographique et la diffusion constituent un ensemble de tâches primordial pour le succès des opérations.

Les outils sont disponibles pour le traitement complet des données « terrain » en temps semi-réel. Il nous faut maintenant accorder les différents éléments, D2RC (ou autre type de capteur aux fonctions identiques), Dynmap et cartographie web en constituent à notre sens les trois piliers.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme de ces 45 mois d'études, plusieurs points méritent d'être soulignés :

1. Tout d'abord le challenge de faire travailler ensemble des représentants d'instituts de recherche nationaux, de la recherche appliquée du secteur privé et des opérationnels de l'intervention en mer a été très productif.
2. Dans le domaine de la recherche appliquée, le couplage de différents modèles (champ proche - champ lointain) est prometteur et mérite d'être rendu opérationnel.
3. Nous avons touché du doigt les limites de nos connaissances pour ce qui concerne :
  - i. Les paramètres régissant l'évaporation en mer.
  - ii. Le comportement de cuves de transport de GNL soumis à un phénomène de Transition Rapide de Phase.
  - iii. L'influence d'un hélicoptère sur le comportement de nappes gazeuses lourdes.
4. D'un point de vue opérationnel, nous restons dans l'expectative pour ce qui concerne l'approche par hélicoptère d'un navire GNLIer, GPLier ou chimiquier en avarie grave (perte de confinement de cargaison évaporante avérée ou simplement suspectée), abandonné par son équipage.
5. Il découle de ce qui précède que les moyens de détection de vapeurs, opérés à distance par un navire de commandement doivent être rendus opérationnels au plus vite.
6. Les navires transporteurs d'Ammoniac paraissent constituer une menace particulièrement sérieuse sur de très longues distances (plusieurs dizaines de kilomètres) bien que la solubilité du produit dans l'eau n'ait pas été prise en compte.



7. Les 9 « fiches-intervention » qui ont été rédigées, en partenariat avec les opérationnels de l'intervention en mer, constituent en soi un point important qui marque la réussite du projet GALERNE.
8. Il est de la plus grande importance de faire vivre ces fiches grâce aux exercices, spécifiquement dédiés au risque chimique en mer.
9. D'autres substances (32 gaz liquéfiés répertoriés dans le code IGC) que celles étudiées dans GALERNE peuvent présenter des risques graves pour l'intervention, les populations et l'environnement. Si le succès opérationnel des « fiches-intervention » est consacré par la pratique, il faut continuer à les produire.
10. Pour ce faire, des moyens expérimentaux autorisant des évaluations de substances toxiques doivent être rendus disponibles.
11. Un nouveau projet devrait permettre de creuser certains points que nous venons de mentionner, alliant à la fois :
  - a. recherche fondamentale (évaporation en mer),
  - b. recherche appliquée (rendre opérationnels des prototypes tels le couplage de modèles et la détection des gaz associés à une transmission des données par cartographie web)
  - c. opérations en mer (approche d'un transport de gaz/chimiquier par hélicoptère).