



# GAz et Liquides Evaporants et Risques de Nuisances Environnementales



PRogramme ECOtechnologies et Développement Durable (PRECODD)  
Journée technique du Cedre 27 novembre 2008

Fanch Cabioc'h  
*Cedre*



# LES PARTENAIRES



Bureau Enquête Accident Mer. Connaissance des accidents passés et du monde maritime.



Bureau Veritas. Définition des scénarios d'accidents. Descriptif des navires, connaissance de structures.



Marine nationale



Ceppol, Marins pompiers. Utilisateurs finaux de l'outil. Définition des besoins opérationnels.



Cedre. Expert et conseiller sur les pollutions accidentelles des eaux. Coordinateur du projet.



Gaz de France-GdF. Spécialiste du transport de gaz liquéfié (GNL).



Institut National de l'Environnement industriel et des RISques. Comportement des gaz et des substances évaporantes en fonction du terme source (champ proche).



Météo France associé au CNRS/Game. Comportement des gaz dans le champ lointain. Modélisation Perle et Mothy.



Direction de la Défense et de la Sécurité Civile. Associé au projet. Aspect de protection des populations

TOTAL Energies Nouvelles

Producteur GNL

TOTAL PETROCHEMICALS

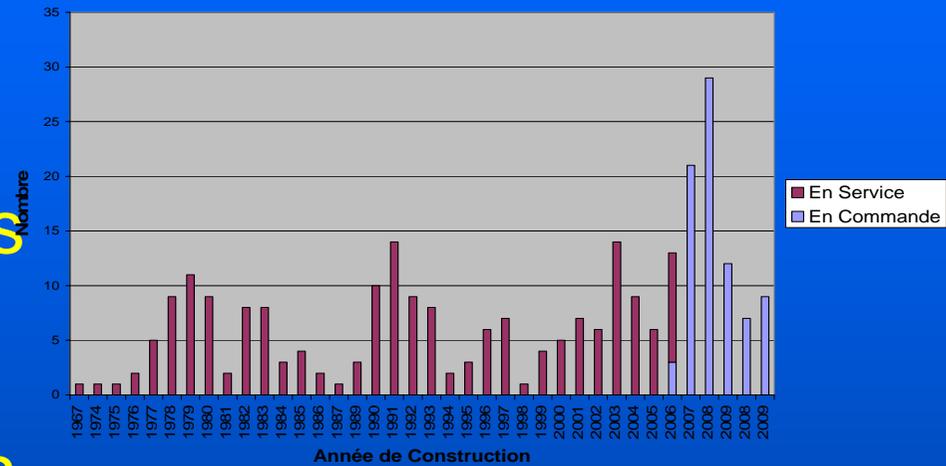
Producteur Produits liquides évaporants ( benzène, Xylènes...



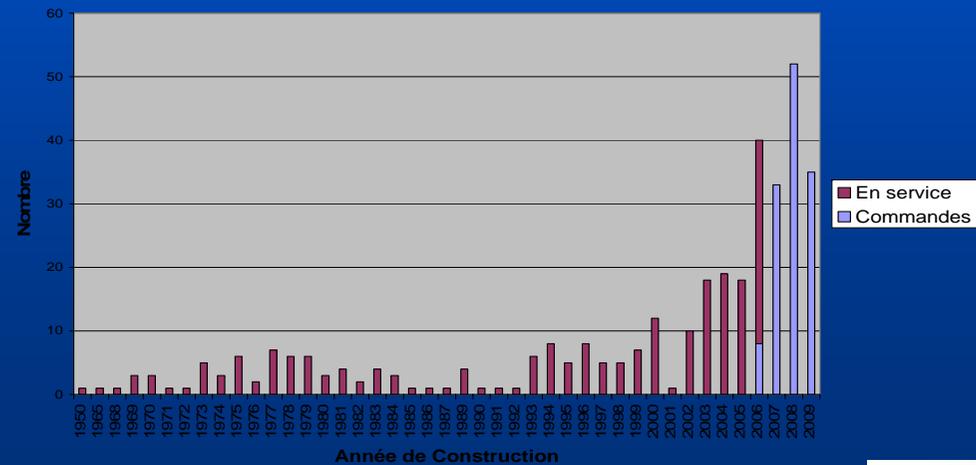
# CONTEXTE

- Trafic et échanges maritimes
- Nature des produits transportés : GNL, GPL, Produits liquides évaporants (vrac)
- Accidents passés

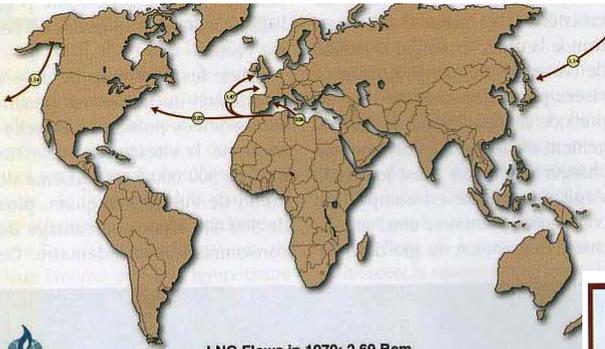
Nombre de GPLiers Réfrigérés en service (fin 2006 = 191)  
et en commande (fin 2006-2009 = 83)



Nombre de méthanières en service (fin 2006 = 226)  
et en commande (fin 2006-2009 = 128)



1 Principalement Moss ou GTT mais le système SPB pourrait faire un retour sur le marché.

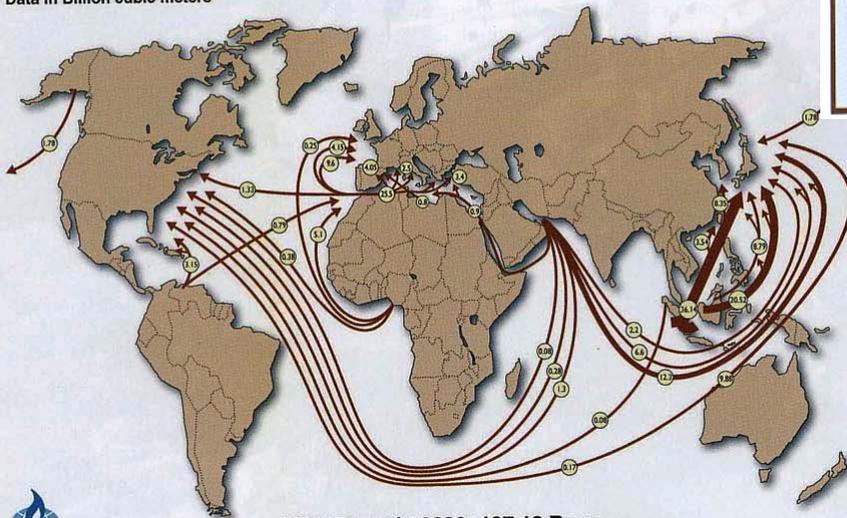


Data in Billion cubic meters

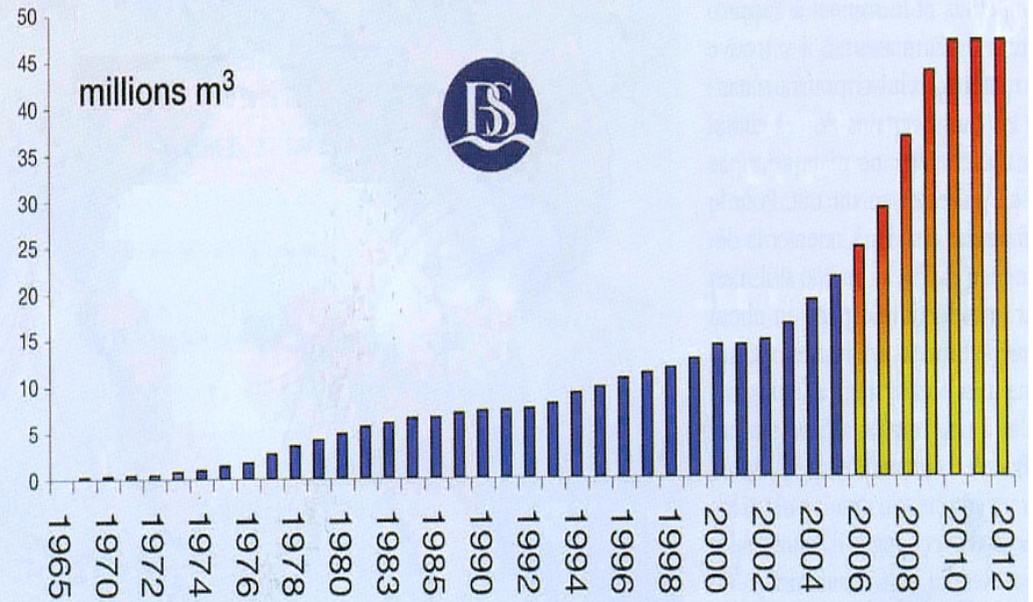


Ces cartes montrent la spectaculaire évolution du trafic en l'espace de quelques décennies. Pour chaque flèche, une flotte de plusieurs navires est nécessaire.

Data in Billion cubic meters



## GROWTH IN LNG CARRIER FLEET (in total m<sup>3</sup>)



# OBJECTIFS

- EVALUER LES RISQUES POUR LES OPERATIONNELS :
  - Approche par hélicoptère
  - Survol des nappes flottantes évaporantes

FICHES REFLEXES  
BASEES SUR DES  
SCENARIOS ET DES  
TRAVAUX DE  
RECHERCHE



# CONTENU

- DEFINITION DES SCENARIOS.  
Année 1 ( 2006)
- MEILLEURE CONNAISSANCE  
DES COMPORTEMENTS  
DES GAZ EN CHAMP  
PROCHE ET EN CHAMP  
LOINTAIN. Année 2-3 (2007-2008)
- EVALUATION DES  
RISQUES POUR LES INTERVENANTS.  
Année 3-3,5 ( septembre 2009)



# ETAT D'AVANCEMENT (1)

- Tâche 1 : Transport et définition des accidents
  - Cadrage, objectifs et besoins (Cedre, Ineris, Ceppol, MP).
  - Retour d'expérience ( Bureau Veritas, Gaz de France, BEA Mer, Cedre)
  - Mode de transport (Bureau Veritas, Gaz de France, BEA Mer)
  - Liste des produits à prendre en compte (Cedre, Ineris, Gaz de France, BEA mer)
  - Définition des scénarios d'accident (Bureau Veritas, BEA mer, Marine, Ineris)

# Méthaniers et GPLiers

## Méthaniers ( type A et B)

Plusieurs cuves allant jusqu'à 45 000 m<sup>3</sup>

Capacité maximum totale actuelle 240 000 m<sup>3</sup>

Plusieurs types de conception

## GPLiers ( Type C)

Navires pressurisés ou semi pressurisés

GPL -48° C : transport réfrigéré

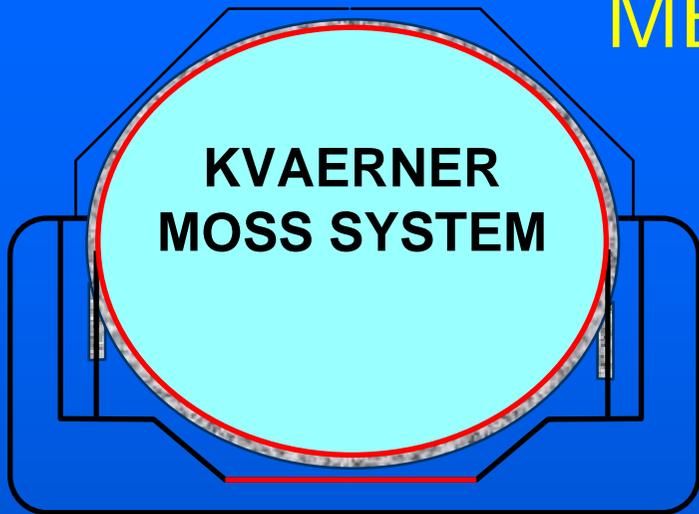
Ethylene-104° C ( 1000 à 12 000m<sup>3</sup>/navire)

pressurisés 18-20 bars 2000m<sup>3</sup> / citerne (GPL  
Ammoniac)

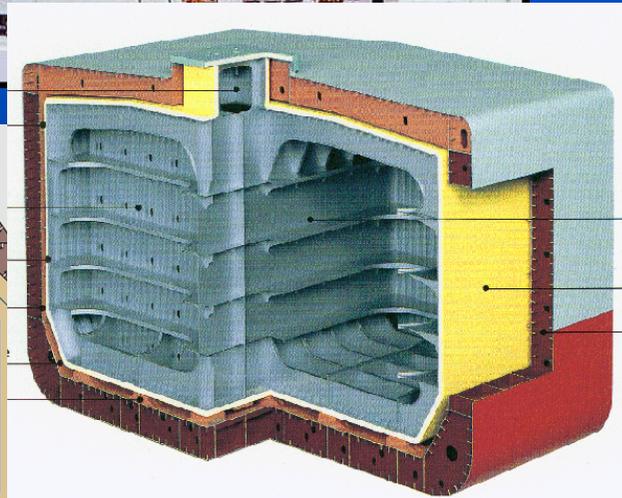
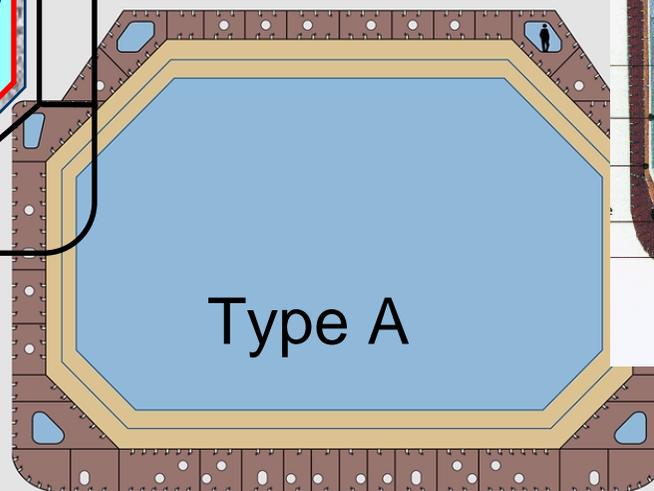
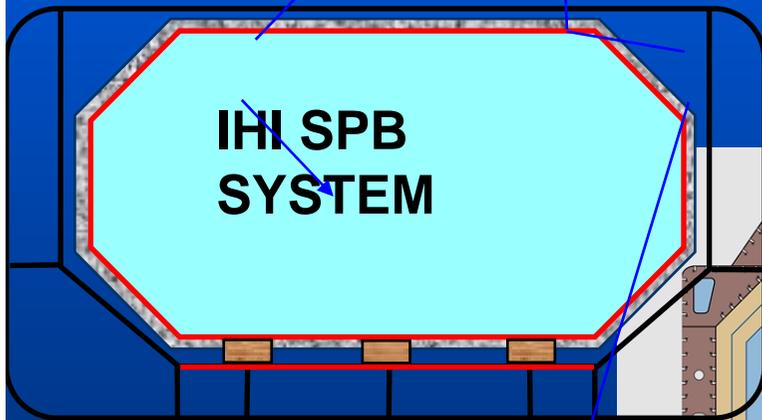
Semi pressurisé 3 000 à 15 000 m<sup>3</sup>/navire (GPL,  
Ethylène, Propylène, CVM...

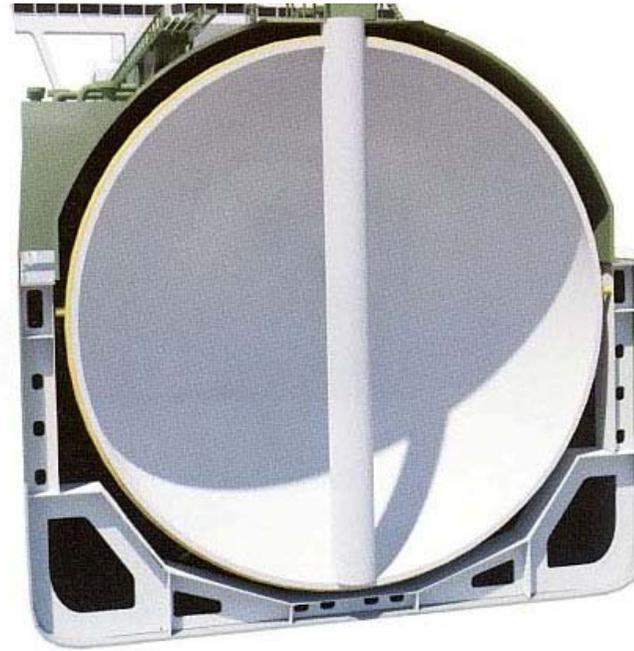
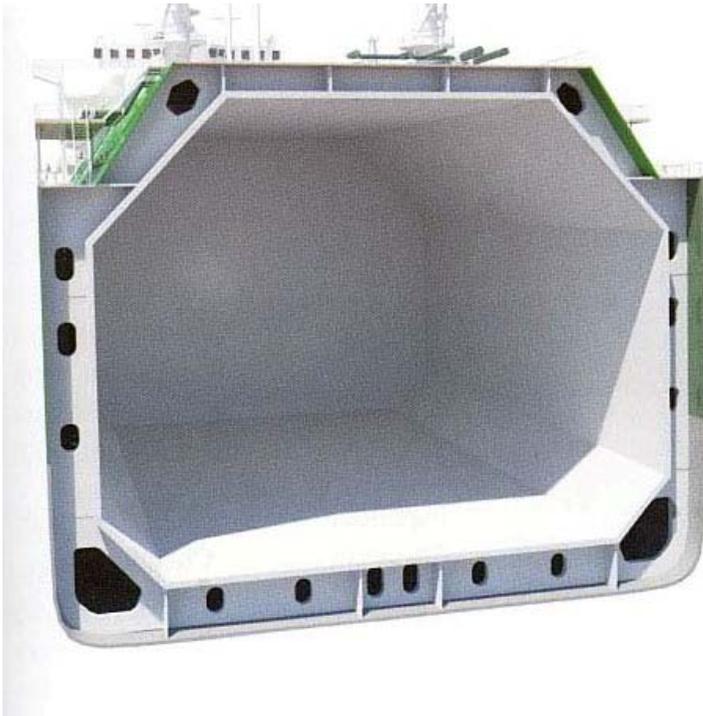


# METHANIERS

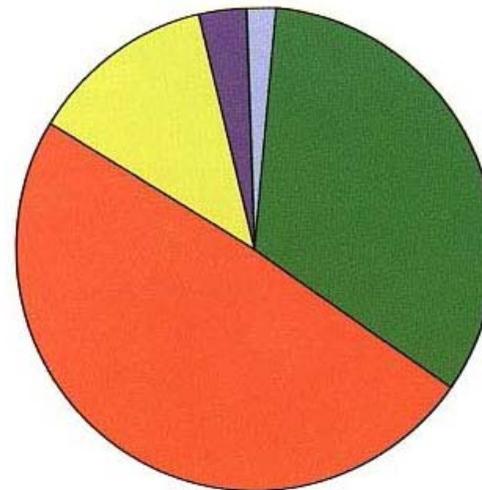
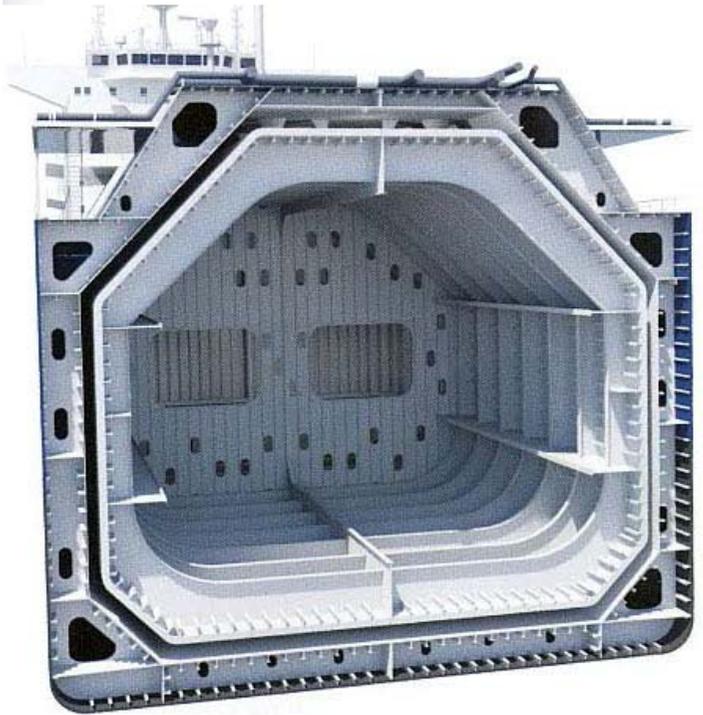


1st barrier and partial 2nd barrier



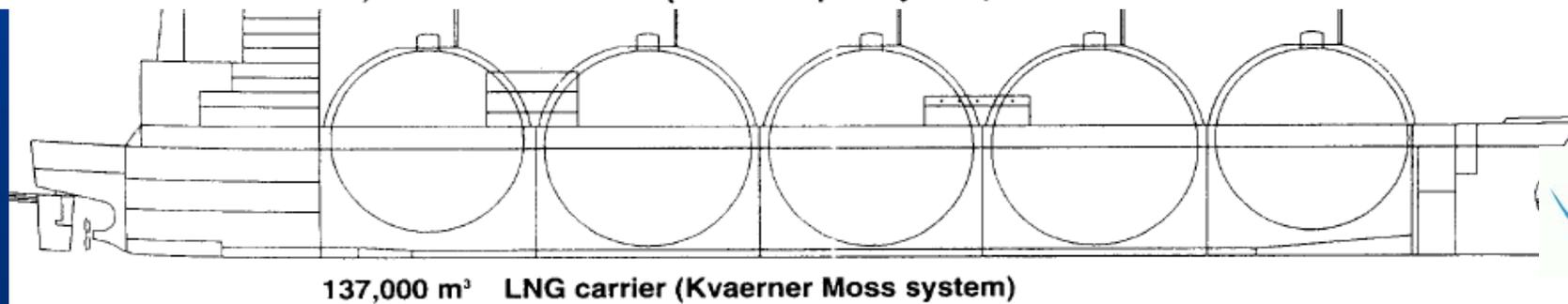
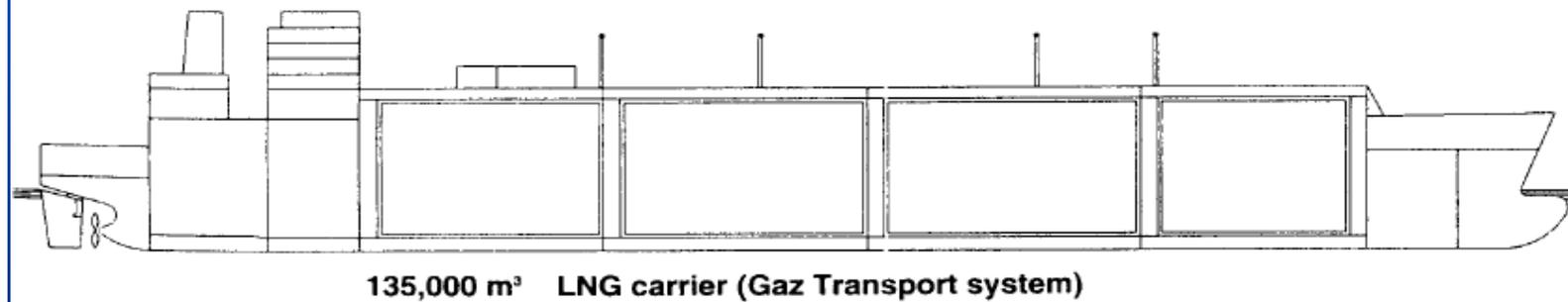
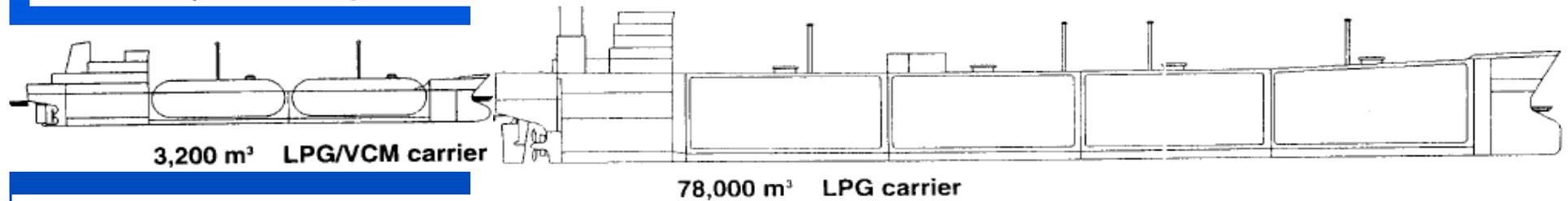
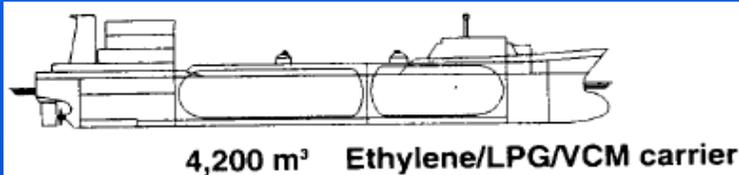
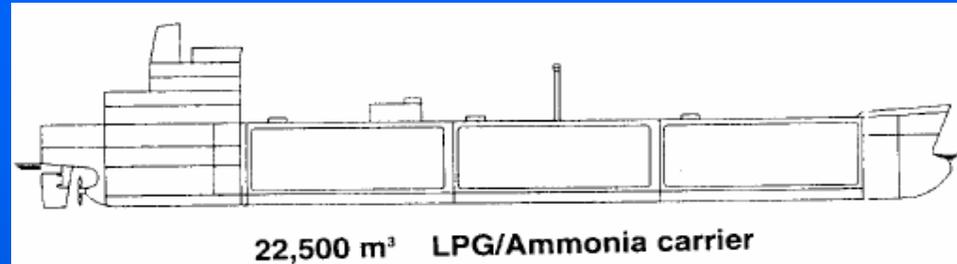
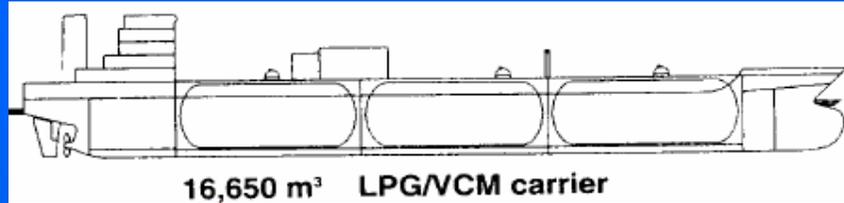


RÉPARTITION  
DES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE CUVES



- Membrane CS1
- Membrane NO
- Membrane Mark 3
- Moss
- Type C

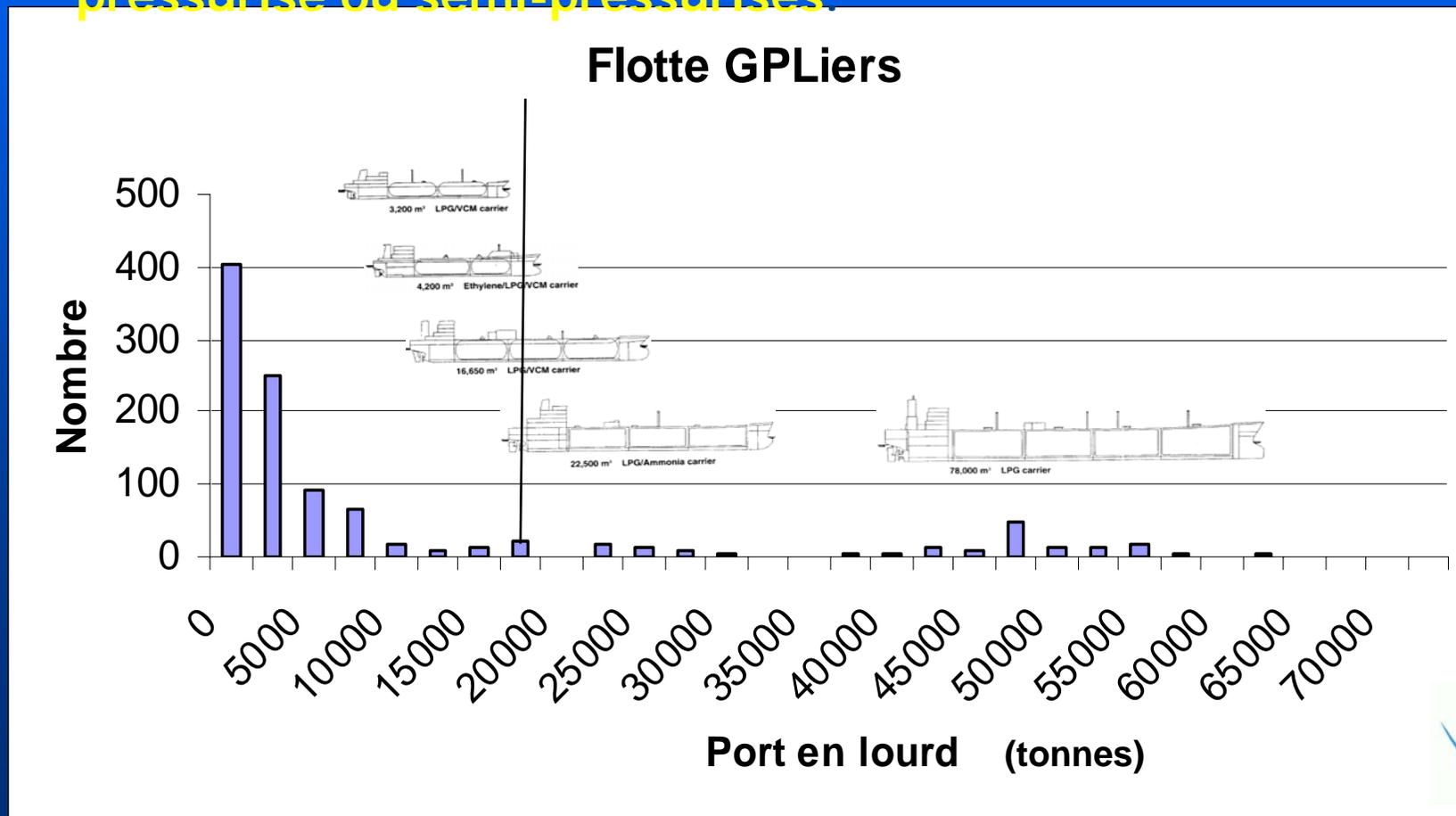
## Les navires transporteurs de gaz liquéfiés



# Analyse de données GPLiers-Méthaniers

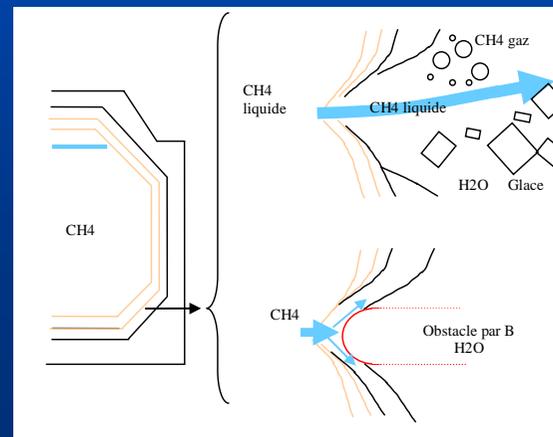
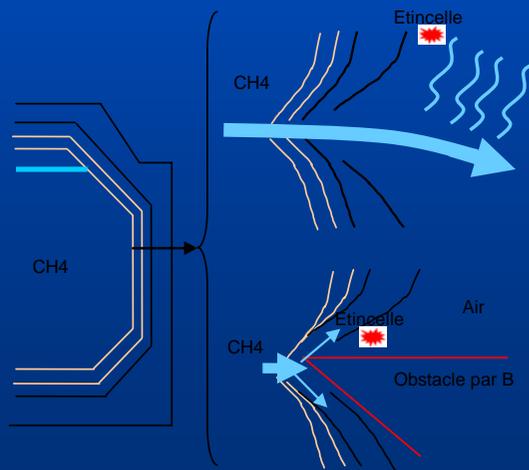
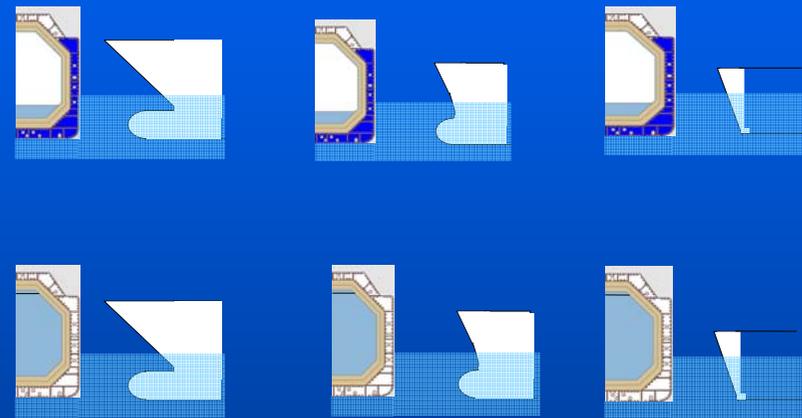
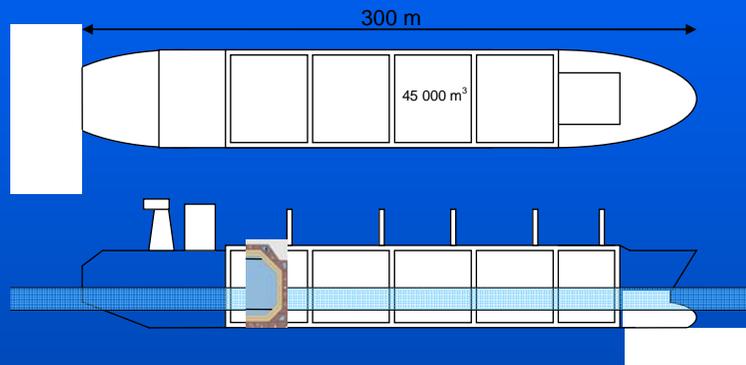
- Séparation des GPLiers en deux catégories (source SEAWAY)

- 1- GPLiers dont le dwt > 12500 tonnes => Navire réfrigéré
- 2- GPLiers dont le dwt < 12500 tonnes => GPL gaz/liq pressurisé ou semi-pressurisés.



# Scénarios d'accidents

- Définition des scénarios d'accident





# LES SCENARIOS



1. Méthanier Collision au dessus flottaison, brèche cm<sup>2</sup>
2. Méthanier Collision en dessous flottaison brèche m<sup>2</sup>
3. Méthanier Collision au dessus flottaison brèche m<sup>2</sup>
4. Méthanier Echouement en dessous flottaison m<sup>2</sup>
5. Méthanier Fuite de pont (manifold ou spray)
6. GPLiers type C. Ammoniac. Collision au dessous flottaison, 8.4 bars 5000tpl
7. GPLiers type C. CVM. 3,4 bars. Collision 5000tpl
8. GPLier type C , Butane, Propane , Propylène. Réfrigération/Pressurisation 5000tpl
9. GPLier. Type C. Ethylène. -104° C. 5 000 tpl
10. Chimiquier. Xylènes, Collision, impact dessus flottaison cuve < 3000m<sup>3</sup>.  
Entre 5000 et 40 000tpl.
11. Chimiquier. Xylènes, Collision, impact sous flottaison
- 12 ,13. Chimiquier. Benzène, Collision au dessus et sous flottaison. Cuve < 3000 m<sup>3</sup>,  
5 000-40 000tpl.
- 14,15. Chimiquier, Benzène, Explosion, effet domino
16. Chimiquier. Benzène Fuite circuit, incendie

## Partie 2. Expérimentations et simulations

- Diffusion proche. A terre (Verneuil) : Azote liquide (octobre-novembre-décembre 2008)  
*Ineris*
- Diffusion lointaine, couplage Mothy-Perle
- Comportement simulé du GNL en mer. *Météo France*
- Pénétration d'un gaz dans un hélicoptère. *Cedre*



# Modélisations dans le champ lointain

- Champ lointain : couplage des modèles de dérive de surface MOTHY et du système PERLE, modèles de dispersion atmosphérique.
  - Description du terme source : nappe flottante évaporante.
  - Quantité de polluant dépend des taux d'évaporation
  - Premier run sur un cas fictif
- Deux conditions atmosphériques (atmosphère stable et instable) à l'ouest des Casquets ( Manche) pour des situations météorologiques réelles).
- Sorties du modèle sur 3 couches : 0-100 m, 100-500 m, 500-1000 m.
- Scénarios (16)
  - Logiciels Mothy-Perle
    - » Rejet instantané (15mn) et sur 24 heures de 2 500 m3 de Xylène
  - Logiciel PERLE
    - » Rejet instantané (15mn) et sur 24 heures de 40 000 m3 de GNL
    - » Rejet instantané ( et sur 24 heures de 2 500 M3 de benzène (15 minutes) et sur 24 heures de 10 000 m3 d'un produit Ammoniac-Butane-Propane
    - » Rejet instantané (15mn)



# Couplage MOTHY-PERLE

- Couplage mis en place pour traiter les scénarios mettant en jeu des liquides « flottants évaporants » (XYLENE)
- Ajout dans MOTHY d'un module d'évaporation prenant en compte les conditions météorologiques (vent, température de la mer, pression de surface) ; Formulation Mackay & Matsugu, 1973
- Pas de confrontation avec les données d'évaporation issues des expérimentations en mer réalisées dans le cadre de GALERNE.
- Développement d'un module de reconstitution du terme source pour PERLE à partir des résultats de MOTHY

# Principe du couplage MOTHY-PERLE

- A chaque pas de temps de sortie de MOTHY, la nappe dérivante (ensemble de particules fictives) est discrétisée sous la forme d'un maillage. Chaque maille contient une part de la masse totale de polluant rejetée initialement.
- A partir du taux d'évaporation calculé (en fonction des conditions météorologiques à l'instant considéré) et de la surface des mailles représentant la nappe, on calcule la masse évaporée au dessus de chacune des mailles.
- On obtient ainsi autant de termes sources pour PERLE que de mailles. L'ensemble de ces termes sources dits « élémentaires » constituent le terme source global utilisé en entrée de PERLE.
- La masse évaporée par chaque maille est retirée à la masse contenue dans cette maille. Une maille disparaît lorsque sa masse devient nulle. Ainsi, la nappe se réduit au fur et à mesure de la simulation MOTHY jusqu'à disparaître complètement.

# Illustration sur le couplage MOTHY-PERLE

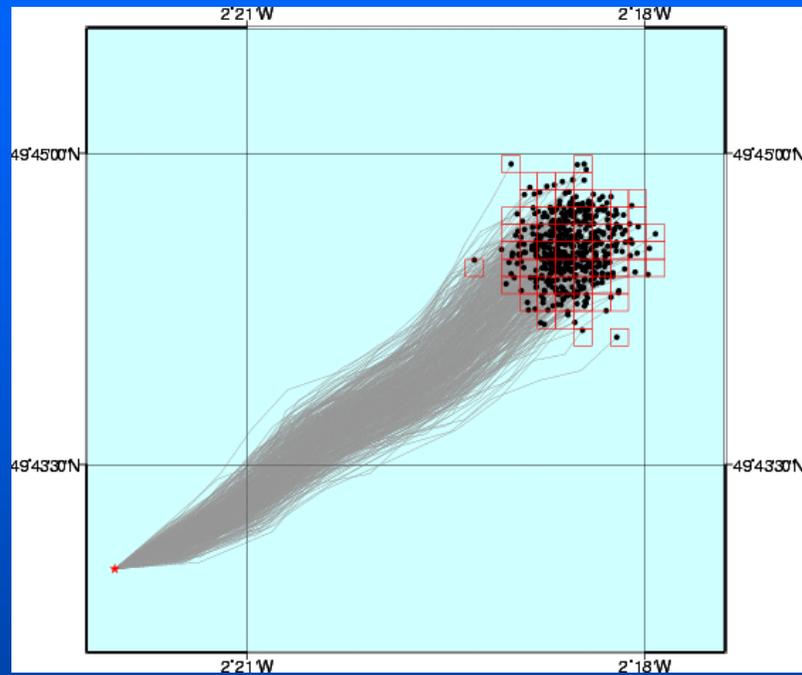


Figure 1. En noir, les particules représentant la nappe dérivante en surface ; en gris, la trajectoire de chaque particule ; en rouge, le maillage associé pour le calcul de la masse évaporée et la reconstitution du terme source.

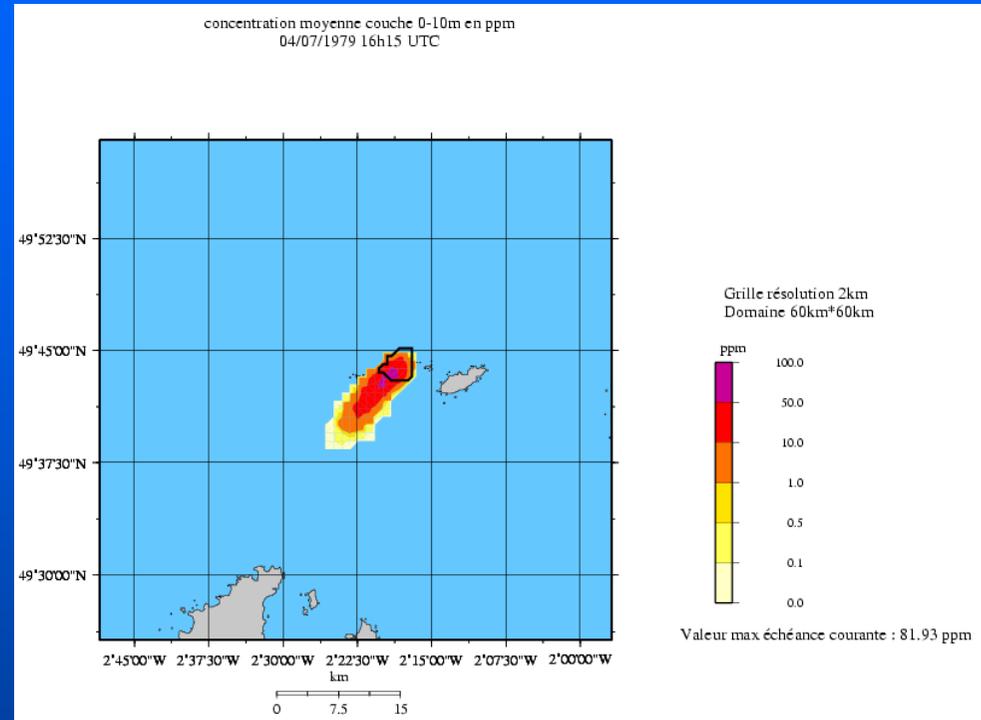


Figure 2. En noir, contours de la nappe dérivante ; en couleur, le panache simulé par PERLE issu de l'évaporation de la nappe.

# Mise en œuvre du couplage MOTHY-PERLE pour les scénarios de rejet de xylène

- 2 scénarios retenus :
  - Déversement rapide (15 minutes) de 2500t de xylène
  - Déversement longue durée (24h) de 2500t de xylène
- Scénarios simulés dans une zone à risques, au large de Cherbourg (les Casquets (49°N 43' : -2°N 22'))
- Simulations réalisées sur 6 dates choisies de manière à illustrer des conditions météorologiques variées (stabilité atmosphérique, force du vent, coefficients de marée...)

# Synthèse des résultats pour les scénarios « xylène »

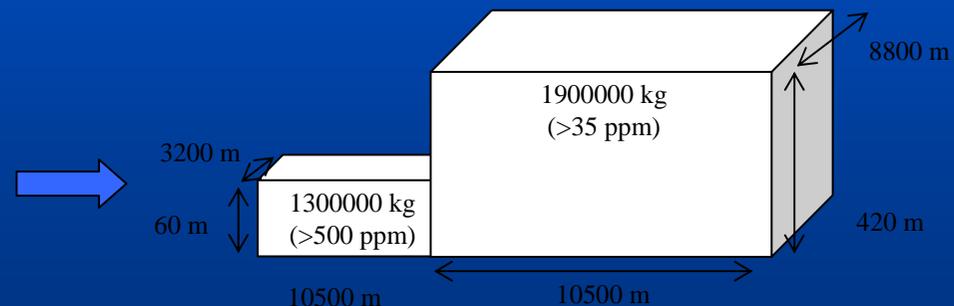
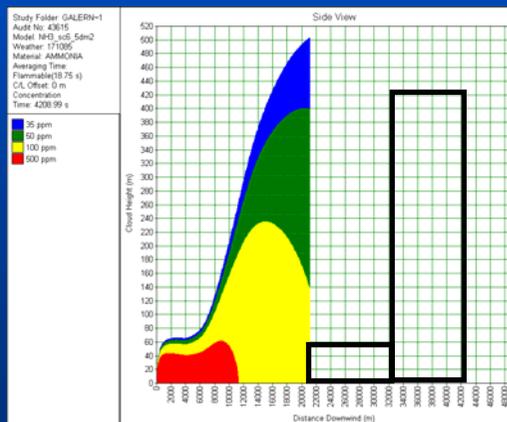
- Peu de sensibilité des résultats aux conditions météorologiques
  - Nappe totalement évaporée quelques heures après le rejet (lorsque le rejet est court)
  - Concentrations max dans l'air comprises entre 20 et 80 ppm. **Cependant** on ne peut donc pas exclure très localement des dépassements de seuils supérieurs.
  - Dans tous les cas de figure, la nappe reste confinée dans un rayon de 10km autour de l'accident. Impact potentiel quasiment nul sur les populations si l'accident se situe à plus de 10km des côtes.

# Couplage PHAST-PERLE pour les scénarios mettant en jeu des gaz liquéfiés

- Comparaison entre PERLE-seul (hypothèse d'un transport passif dès le début du rejet) et un couplage PHAST-PERLE a été réalisé sur 2 scénarios mettant en jeu de l'ammoniac.
  - Scénario brèche 2 dm<sup>2</sup> : rejet d'une durée de 1h10min de 3600t
  - Scénario brèche 2 m<sup>2</sup> : rejet quasi-instantané de 3600t
- 3 dates parmi les 6 dates utilisées précédemment ont été utilisées. Ces dates présentent des conditions atmosphériques stable, neutre et instable.

# Principe du couplage PHAST-PERLE

- Le principe du couplage des deux systèmes PHAST et PERLE consiste à récupérer le panache de polluant issu des simulations PHAST (INERIS) une fois le gaz devenu passif et d'utiliser ce résultat comme terme source pour PERLE.
- Les résultats de PHAST sont matérialisés par une ou plusieurs boîtes (parallélépipèdes rectangles) contenant tout ou partie du polluant. Ces boîtes sont déterminées en utilisant un ou plusieurs seuils de concentration dans l'air.
- Exemple :

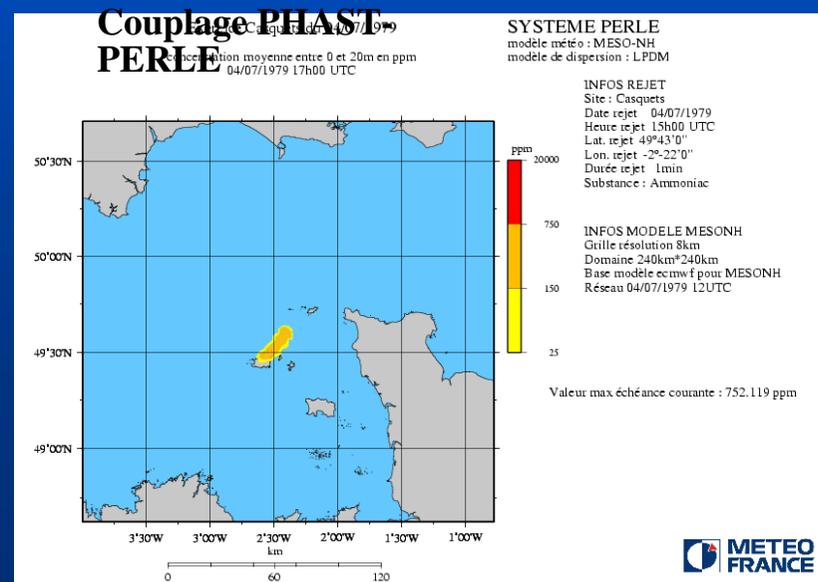
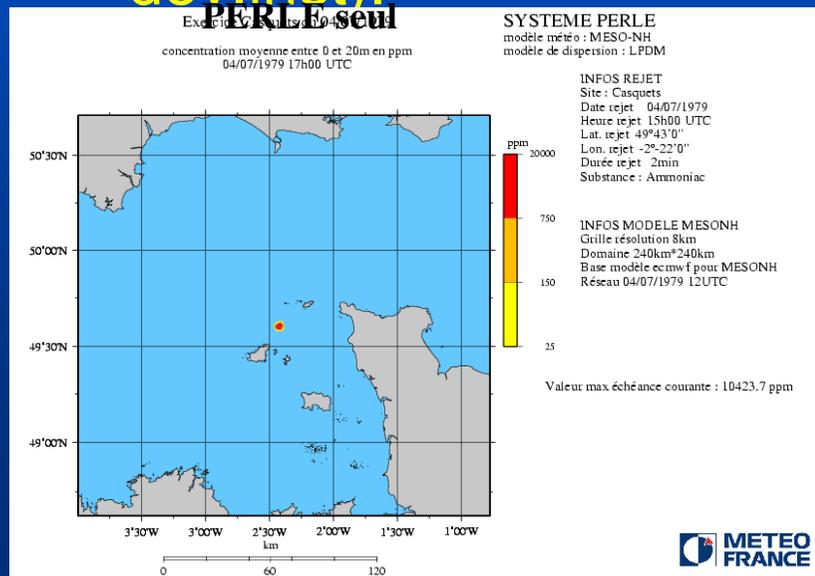


# Résultats comparaisons PERLE-seul / PHAST-PERLE

- Les comparaisons portent sur l'extension horizontale, la dispersion verticale ainsi que sur les valeurs de concentrations maximales obtenues sur 3 niveaux verticaux (10m, 100m et 500m) deux heures après le début du rejet.
- Le scénario C correspond au rejet instantané et le scénario B au rejet de 1h10.

# Conclusion sur les comparaisons PERLE-seul / PHAST-PERLE

- L'hypothèse « traceur passif » retenue dans les simulations PERLE-seul conduisent à une sous-estimation systématique de l'étendue du nuage de polluant et par conséquent à une surestimation des concentrations dans l'air.
- Les écarts observés sont d'autant plus marqués que le gaz est mis au contact de l'air rapidement (scénario C, dev.inst).



# Synthèse des résultats en terme d'impact en champ lointain pour les scénarios « rejet d'ammoniac »

- Sensibilité marquée aux conditions de stabilité :
  - Journée du 04/07/1979 (conditions stables), seuil de 750 ppm dépassé durant 3h jusqu'à une distance de 30km du site accidentel. Seules les conditions stables permettent un dépassement de ce seuil critique en dispersion champ lointain.
  - Le seuil de 150 ppm est atteint et/ou dépassé quelles que soient les conditions de stabilité jusqu'à 4h après le rejet (entre 40 et 75km de la source)
- Sensibilité peu marquée (en terme d'impact en champ lointain) aux 2 scénarios de rejet étudiés (rejet instantané et rejet de 1h10).
- Pour mémoire IDLH 300 ppm  
TLV-TWA : 25 ppm

## Champ proche (une centaine de mètres autour du navire) : modélisations et expérimentations

- Scénarios définis avec l'INERIS.
- Terme source important (densité du gaz, diamètre de la brèche, condition météorologiques).
- Réunion du 4 décembre 2007 à Verneuil en Halatte
- Scénarios modélisation tirés de la tâche 1.5 : GNL, Propane, Benzène, Xylènes, Ammoniac, Chlorure de Vinyle, Ethylène réfrigéré)
- Expérimentations terminées en décembre 2008



# CHAMP PROCHE

GALERNE: Objectifs des tâches 2.1 /2.2/2.3.1

- Étude du comportement des substances dangereuses en mer Risques associés ?

Essais expérimentaux

Approche numérique

- jets des gaz liquéfiés au-dessus de l'eau
- évaporation d'une nappe de liquide sur l'eau
- dispersion atmosphérique au-dessus de l'eau



## Produits retenus

GNL, GL (propane, ammoniac, MCV),  
liquide évaporant (benzène),  
flottant évaporant (xylène)

# État d'avancement

## Approche modélisation

### Étude bibliographique

- formation de nappe sur l'eau
  - évaporation de nappe sur l'eau
  - dispersion en champ proche au-dessus de l'eau
- } *Note de synthèse à finaliser*

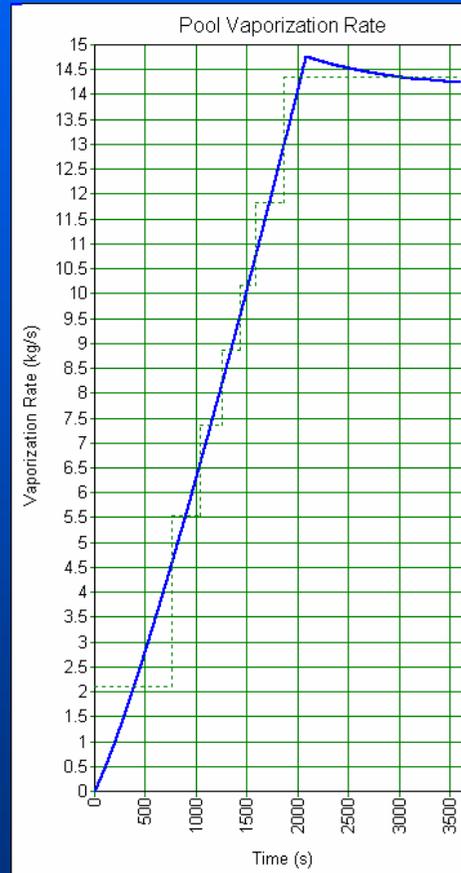
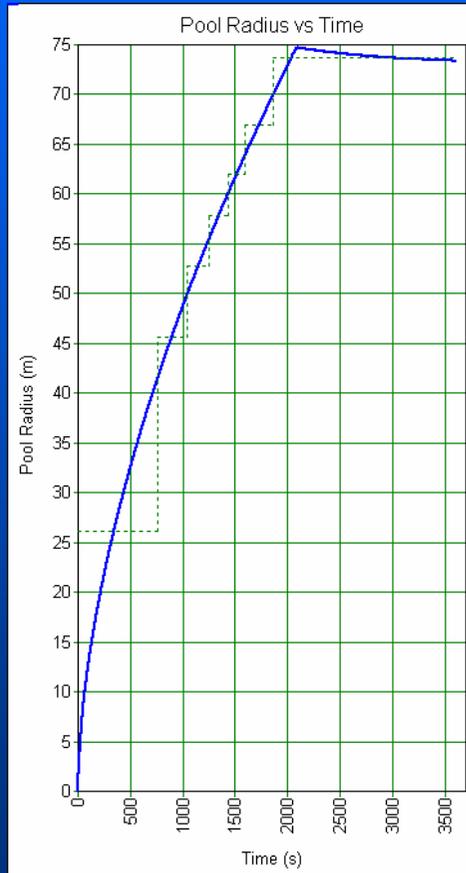
### Calculs et modélisation

- identification des outils de calcul pertinents (INERIS/GDF) > réalisé
- simulations de scénarios avec outils existants : en cours > fin 2008  
Benzène, Chlorure de vinyle, Ammoniac, Propane, Éthylène réfrigéré, GNL
- inter-comparaison prévue sur scénarios GNL (INERIS/GDF): fin 2008
- alimentation modèles de dérive de nappe et de dispersion lointaine (INERIS/Météo-France): champ proche transmis à Météo-France, pour scénario ammoniac de courte durée

# État d'avancement

## Approche modélisation

Exemple : simulation d'un rejet long de benzène sur l'eau avec le logiciel PHAST (brèche de 20 cm<sup>2</sup>, débit 14.5 kg/s pendant plusieurs heures)



Conditions météo  
Stabilité D  
Vent 5,6 m/s (à 10 m)

$Q_{\text{évaporation}}$  (surfacique)  
estimé : 0,84 g/m<sup>2</sup>/s

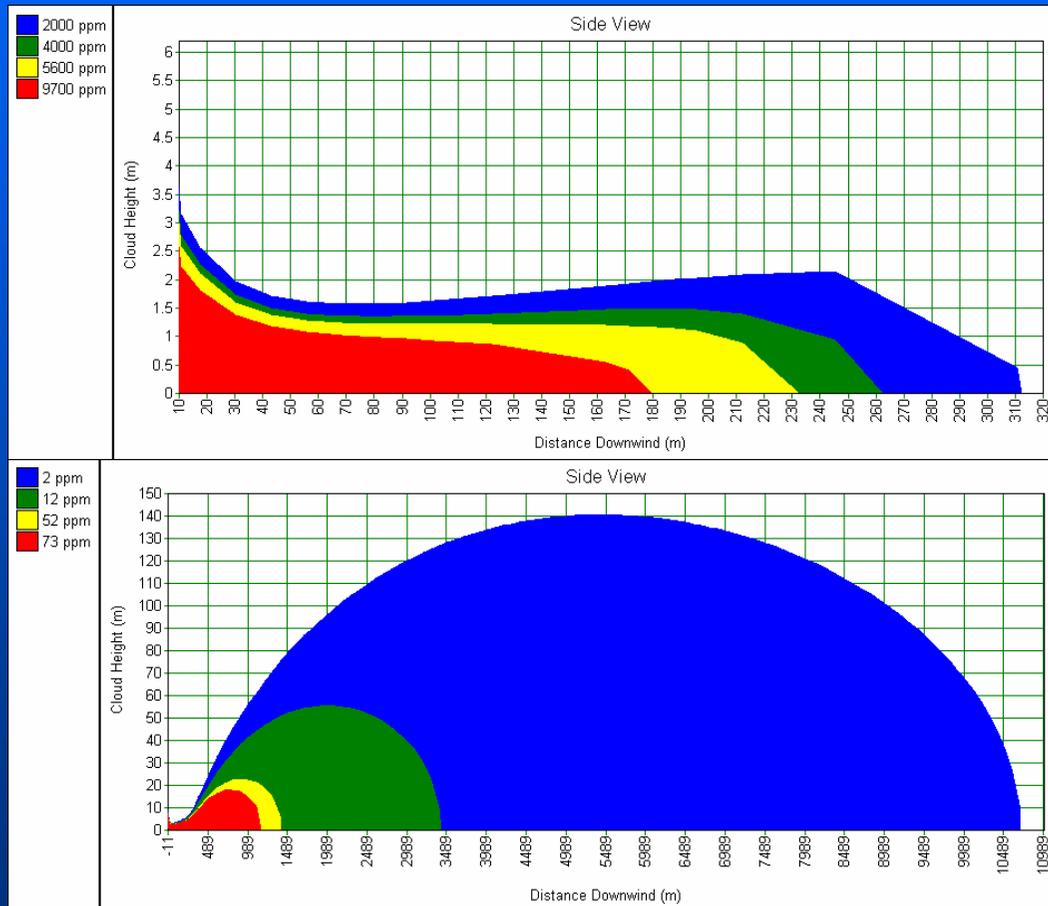
Stabilisation de la nappe  
( $Q_{\text{alimentation}} = Q_{\text{évaporation}}$ )  
à  $t = 34$  min

Évolution taille de nappe et taux d'évaporation en fonction du temps

# État d'avancement

## Approche modélisation

Exemple : simulation d'un rejet long de benzène sur l'eau avec le logiciel PHAST  
(brèche de 20 cm<sup>2</sup>, débit 14.5 kg/s pendant plusieurs heures)



### Seuil olfactif

2 ppm à plus de 10 km  
12 ppm autour de 3,5-5 km

### Seuil d'effets réversibles (AEGL1)

52 ppm à 1,4km (1 h d'exposition)  
73 ppm à 1,2 km (30 min)  
130 ppm à 850 m (10 min)

### Seuil d'effets irréversibles

150 ppm à 800 m (ERPG2 -1 h)  
800 ppm à 400 m (AEGL2 - 1h)  
1100 ppm à 370 m (AEGL2 - 30 min)  
2000 ppm à 310 m (AEGL2 - 10 min)

### Seuil d'effets létaux

1000 ppm à 370 m (ERPG3 -1 h)  
4000 ppm à 260 m (AEGL3 - 1h)  
5600 ppm à 230 m (AEGL3 - 30 min)  
9700 ppm à 180 m (AEGL3 - 10 min)

LIE (1,2%) à 160 m

Dispersion champ proche (en haut) / champ lointain (en bas)

# État d'avancement

## Approche expérimentale

### Essais à petite échelle, à l'INERIS

- Produits : Azote cryogénique, Propane liquéfié sous pression, Pentane ou Xylène
- Piscine 10m x 10m x 1 m
- Observations:
  - jet sous l'eau
  - nappe de surface (caméra visible et infrarouge)
  - nuage dispersant (caméra visible et infrarouge)

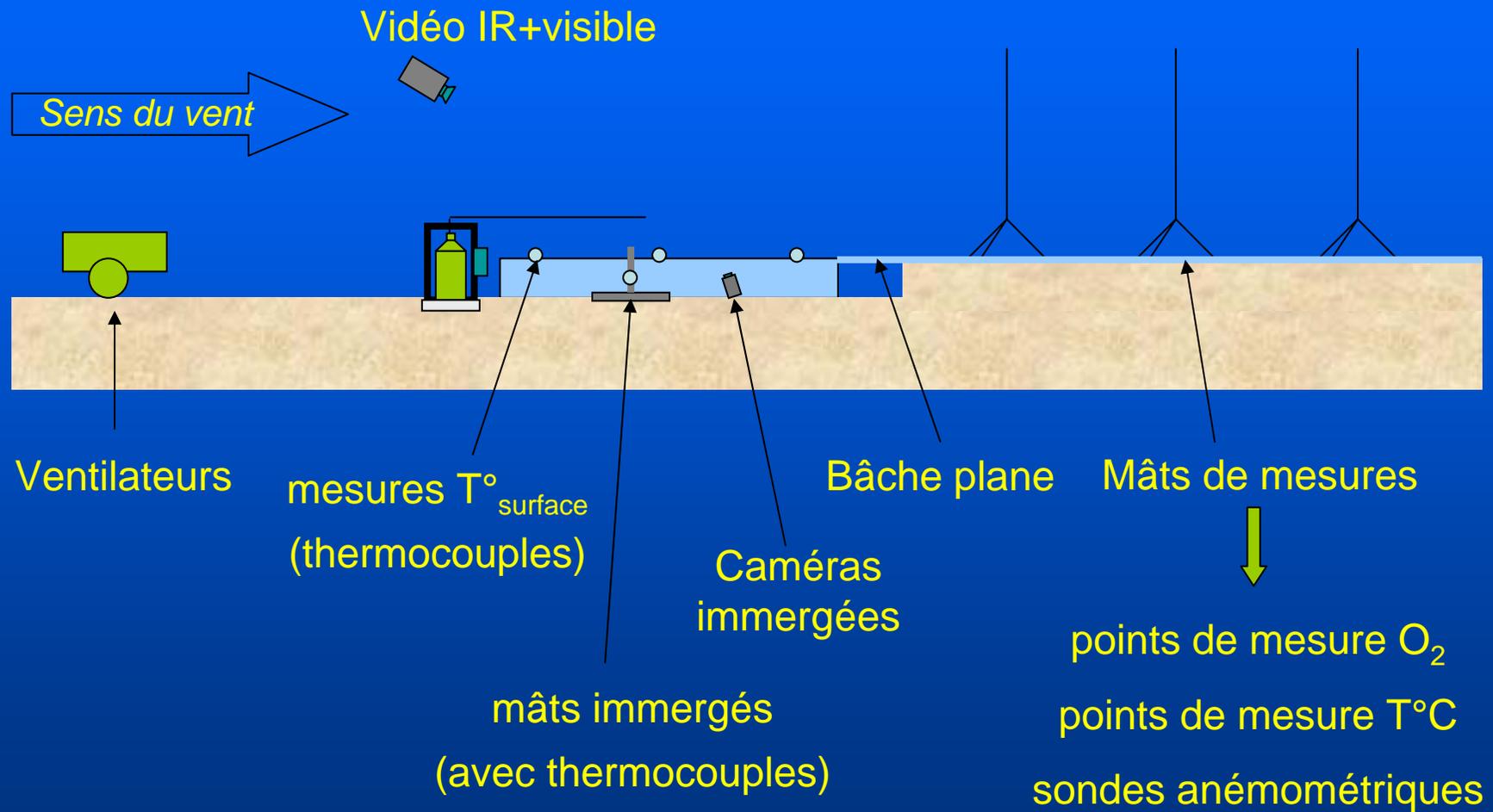
Paramètres physiques :

Dans l'atmosphère :  $T^{\circ}$  air,  $C_{N_2}$ , vitesse, turbulence, humidité

Dans l'eau :  $T^{\circ}$  surface + profondeur, nappe (caméras immergées)

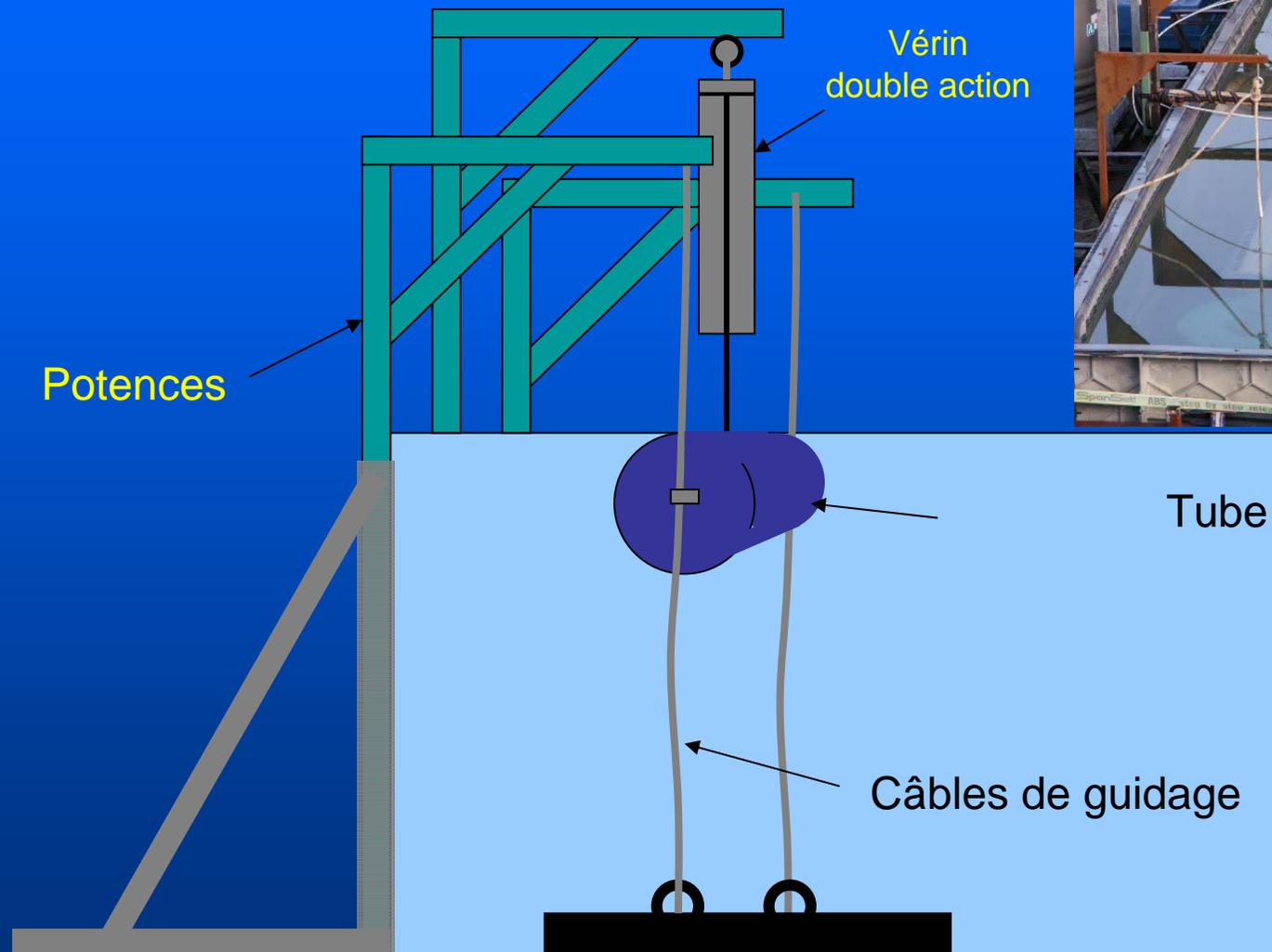


# Instrumentation piscine + atmosphère



+ générateur de vagues

# Dispositif de création de vagues - principe

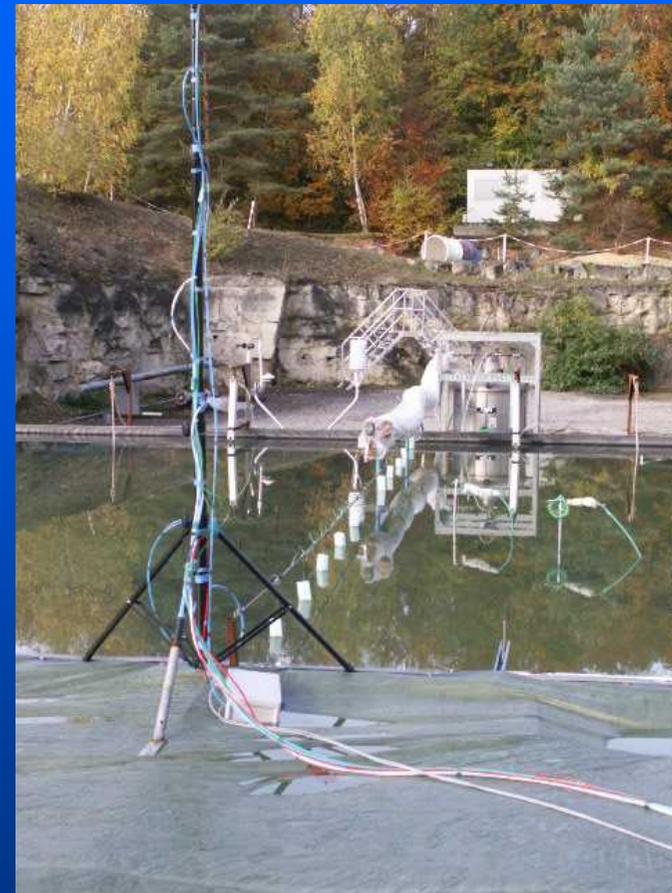


# État d'avancement

## Approche expérimentale

### Essais à petite échelle, à l'INERIS

- Essais azote en cours
  - ✓ sur l'eau
  - ✓ sous l'eau
- Fin des essais : fin 2008
- Fin dépouillement et analyse : 02/2009



# Essai de rejet d'azote liquide sur l'eau (sans vagues)



# PENETRATION D'UN GAZ DANS UN AERONEF

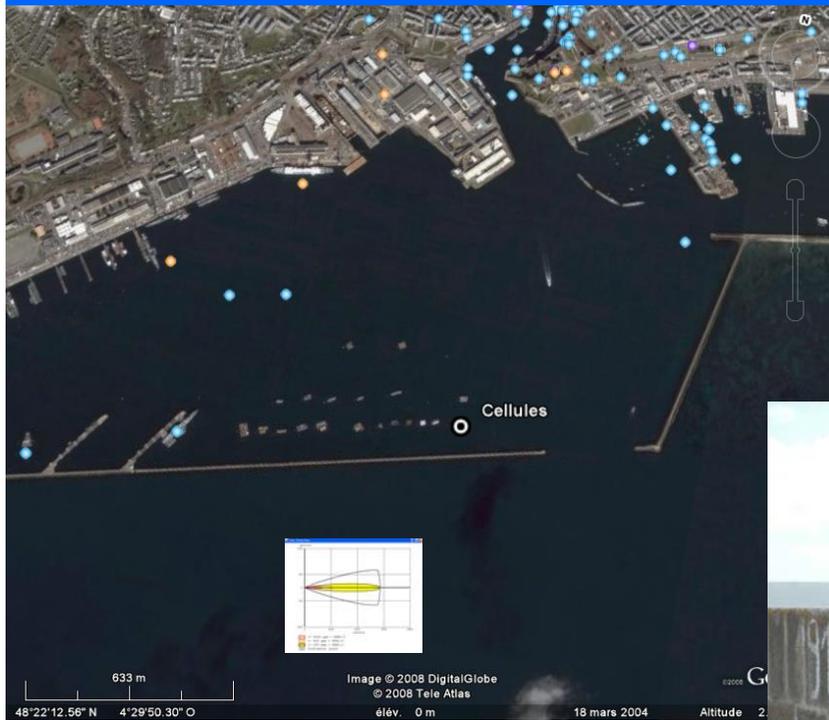
- Divers types d'aéronefs : F 406, Atlantique 2, Super Frelon, Lynx, Dauphin.
- Pas de données récentes sur la pénétration des gaz dans l'habitacle mais aéronefs non pressurisés donc pas d'effet de confinement.
- Expérimentation POLLUTMAR 5 de 1990 reprises. (utilisations de gaz marqueur).

# Résumé des simulations

AMMONIAC														
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
BENZENE														
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
BUTANE														
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
STYRENE														
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

Modèles très conservateurs, surtout Chemmap, (d'un facteur 3 environ)

# Partie 3 (prévue en 2009) : fiches réflexes, transmission des données

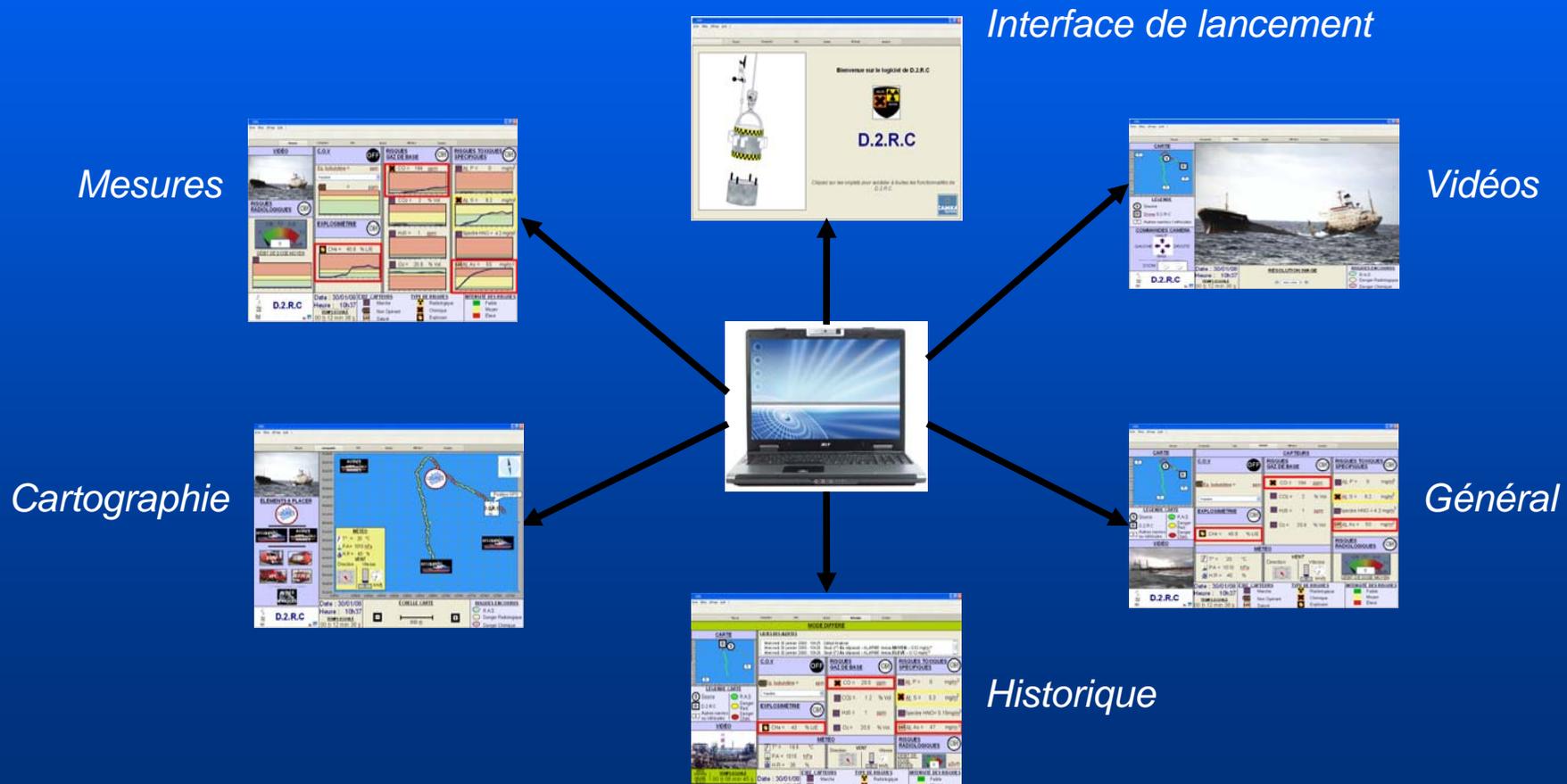




# Drone flottant



L'opérateur lance son interface logicielle de D.2.R.C sur son ordinateur, lui permettant ainsi, de suivre le drone en temps réel.



FICHE 1 : RENSEIGNEMENTS SUR LE SINISTRE

	<b>Méthode d'intervention "POLLUTION AQUATIQUE CHIMIQUE"</b>	
<b>Fiche guide n°1 : « Renseignements »</b>		

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) : .....

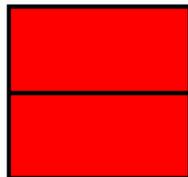
Aspect de la substance au premier abord

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

Inscrivez ici les numéros :

CODE DANGER



N° ONU

Pictogrammes (entourer)

						
N° 1 Explosif	N° 2 Gaz non infla.	N° 2 Gaz inflamm.	N° 3 Liquide inflamm.	N° 4.1 Solide inflamm.	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 Solubilité (% massique) : .....  
 Corrosif / Valeur de pH : ..... Densité relative / eau : .....

Prochaine réunion plénière  
15 janvier 2009 au Cedre



**QUESTIONS?**

