

9th Information day of CEDRE / 9^{ème} journée d'information du CEDRE
Paris, 6-10-2003

Le Traitement des Epaves Potentiellement Polluantes
The Treatment of Potentially Polluting Wrecks

Un Programme de Restauration Environnementale
12 Ans Après: le HAVEN

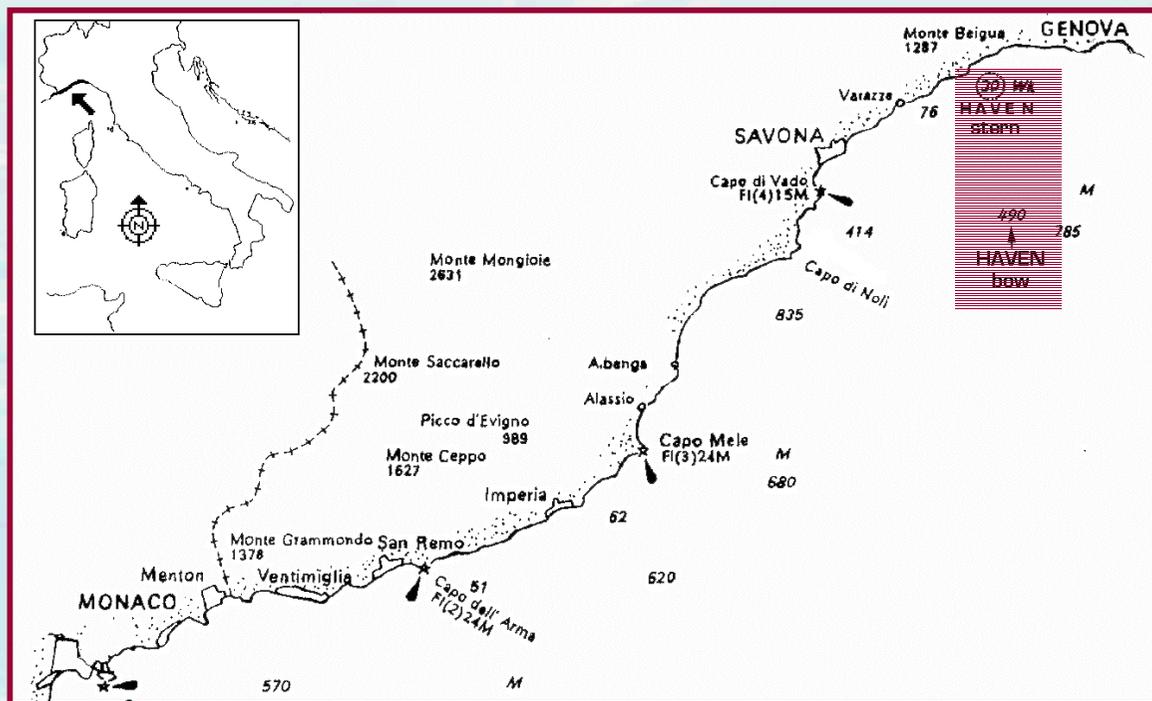
An Environmental Restoration Programme
12 Years After: the HAVEN

Ezio Amato



ICRAM

Istituto Centrale per la Ricerca Scientifica e
Tecnologica Applicata al Mare



11/4/91 Arenzano, golfe de Gênes

**Explosion
+ incendie pendant
70 heures**

A bord du navire :

- 144 000 t de fuel lourd iranien
- 1 500 t de fuel de soute, de gas-oil et d'huiles de lubrification

Résultat :

- 100 000 t consommées par l'incendie
- 14 500 à 17,000 t évaporées
- 10 000 à 50,000 t coulées
- 3 500 à 5,000 t dispersées en mer
- 3 000 t dans l'épave
- 2 000 t récupérées en mer
- 1 000 à 1,500 t récupérées sur la côte

Super pétrolier HAVEN

(ex AMOCO MILFORD HAVEN)



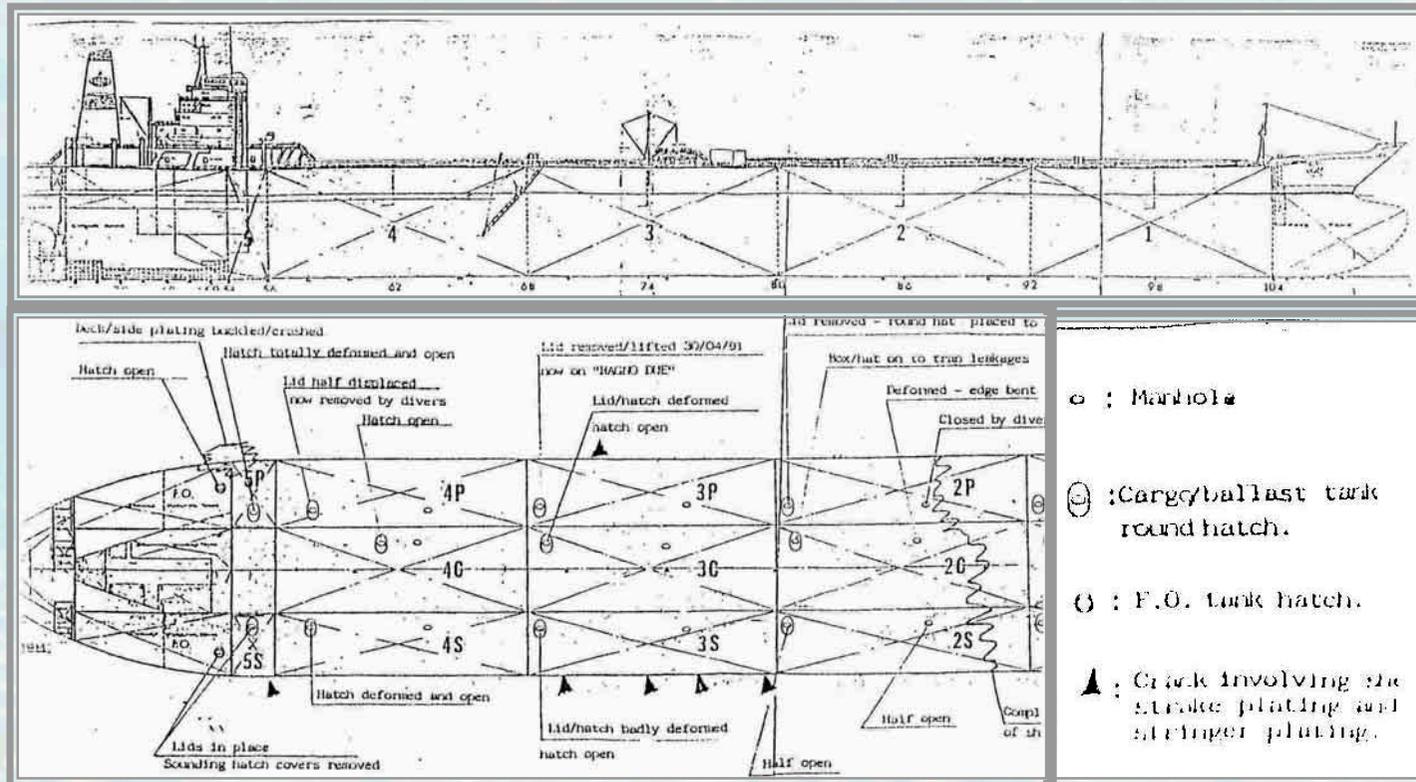
**Construction : Astilleros Españoles S.A.,
Cadiz (Espagne), 1973**

**Société de classification: American Bureau
of Shipping**

Port d'immatriculation: Limassol (Chypre)

- **Longueur: 334 m**
- **Largeur: 51 m**
- **Hauteur du pont supérieur: 26,19 m**
- **Tirant d'eau: 19,943 m**
- **Tonnage brut : 109 700 t**
- **Tonnage net : 91 988 t**
- **Capacité (d. w.): 232 164 t**
- **Port en lourd: 35,395 t**

Super pétrolier HAVEN

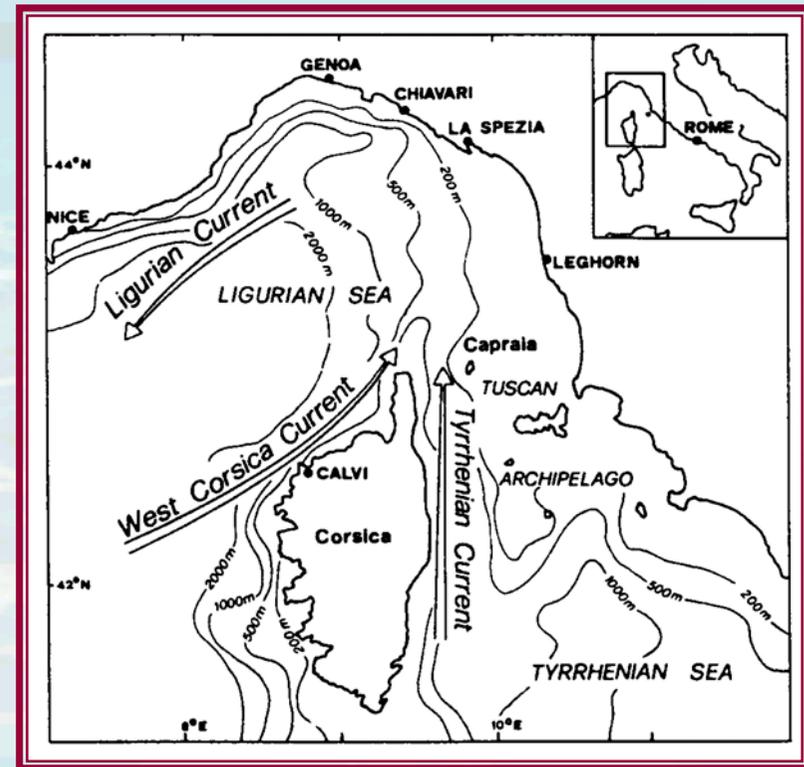


- **13 citernes (3 centrales, 5 à tribord, 5 à bâbord), volume total 283 626 m³**
- **Système d'extinction par gaz inerte, système de lavage au pétrole brut, arrangements de ballasts propres (citerne centrale No. 2)**
- **Moteur: diesel, deux-temps, 8 cylindres en ligne, 3,400 bhp, 103 r.p.m.**

Phase d'urgence

14 avril 1991 déclaration de l'état d'urgence national

- Mobilisation immédiate de toutes les ressources disponibles
- Intervention des organisations gouvernementales de défense maritime française et italienne alors qu'un courant de surface, direction sud-ouest, déterminait la dérive des nappes de pétrole vers les côtes françaises



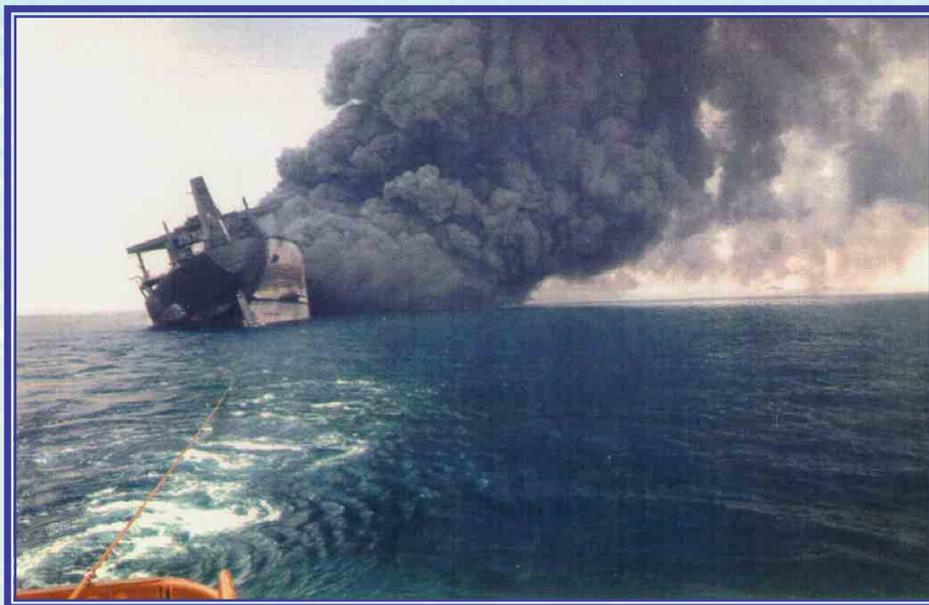
Phase d'urgence

- ✓ **Nettoyage de la surface de l'eau**
- ✓ **Intervention sur la partie principale de l'épave**
- ✓ **Opérations de nettoyage à terre**
- ✓ **Suppression des résidus pétroliers immergés**
- ✓ **Contrôle du milieu**
- ✓ **Enlèvement des déchets**

Phase d'urgence

Alors que le HAVEN était en train de brûler, deux décisions importantes ont été prises :

- **laisser brûler la majeure partie du pétrole déversé en mer**



- **remorquer l'épave vers la côte**

Phase d'urgence

**Remorquage de l'épave
vers la côte dans le but de :**

- ✓ **l'empêcher de couler
dans les profondeurs
de l'océan où il serait
difficile d'entreprendre
une quelconque action**
- ✓ **contenir la pollution
sur la côte**



Phase d'urgence

Laisser brûler le pétrole déversé en mer



- ✓ **Pour éviter qu'il ne se répande davantage sur la surface de l'eau**
- ✓ **L'incendie fut circonscrit au moyen de lances à eau haute-pression**

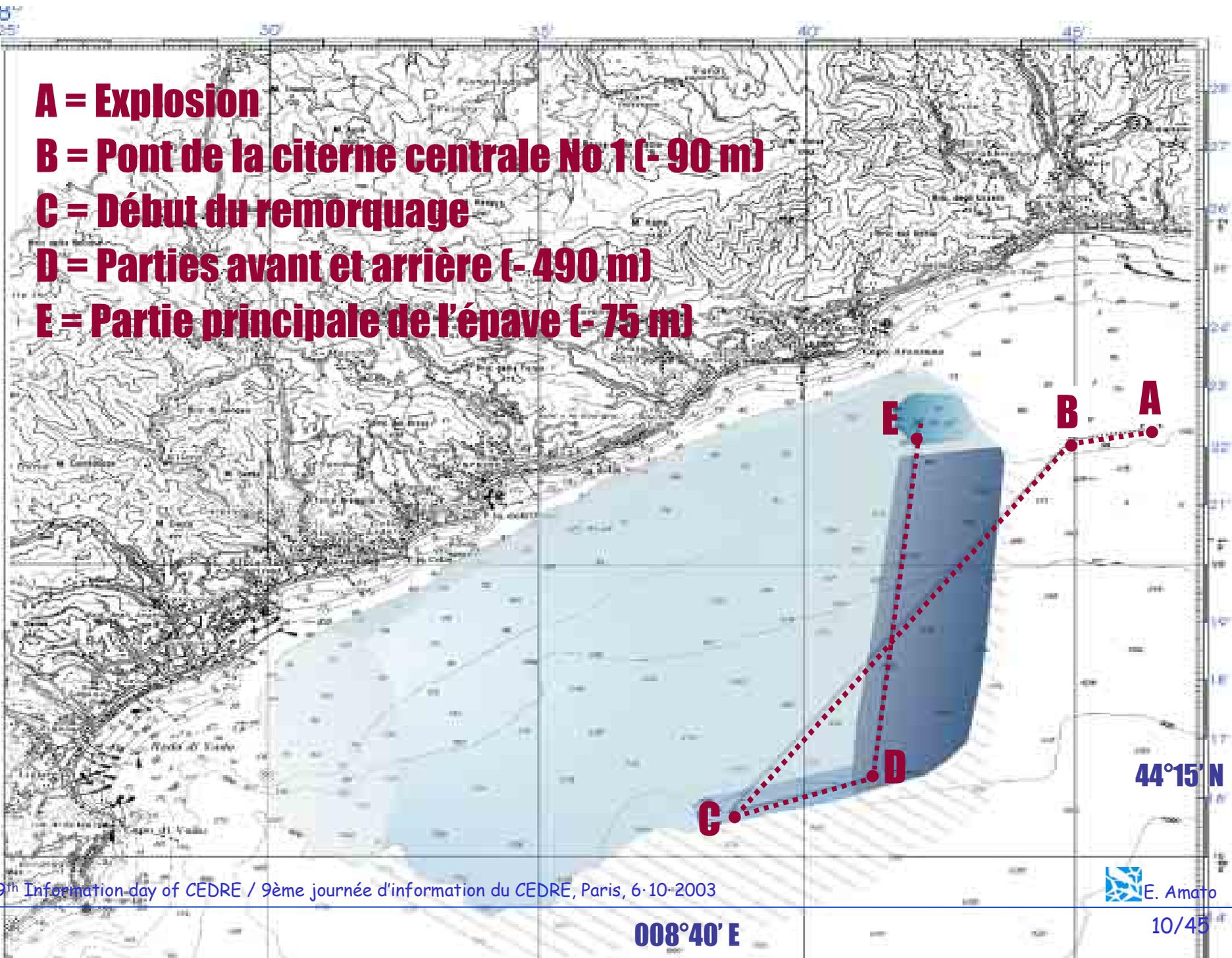
A = Explosion

B = Pont de la citerne centrale No 1 (- 90 m)

C = Début du remorquage

D = Parties avant et arrière (- 490 m)

E = Partie principale de l'épave (- 75 m)



L'épave du super pétrolier HAVEN



PROGETTO HAVEN



**Jusqu'au 25 avril, l'épave
perdait du pétrole sans
interruption**

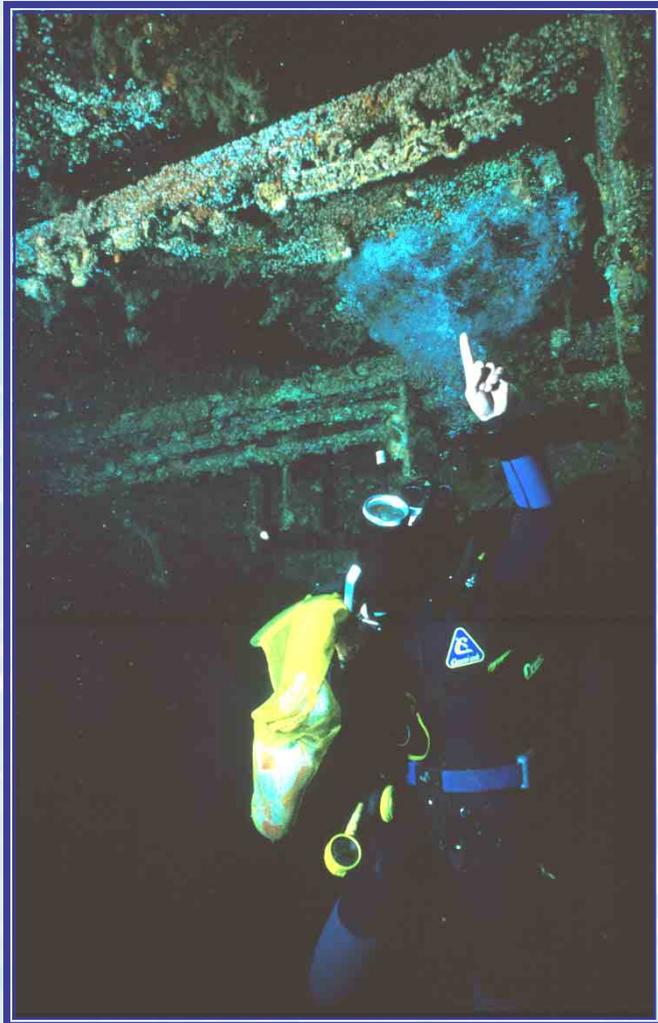
**Après le naufrage, la mer fut
polluée sur une surface de près
de 100 km²**

CLASSEMENT DES BONS L'AVANT - TI DEL 15 APRILE 1991



Phase d'urgence

Intervention sur la partie principale de l'épave



Les parties de l'épave, jugées dangereuses pour la navigation, ont été enlevées

Le pétrole qui s'écoulait, a été récupéré au moyen d'appareils de succion

Des mesures ont été prises pour éviter tout déversement émanant de l'épave (partie arrière)

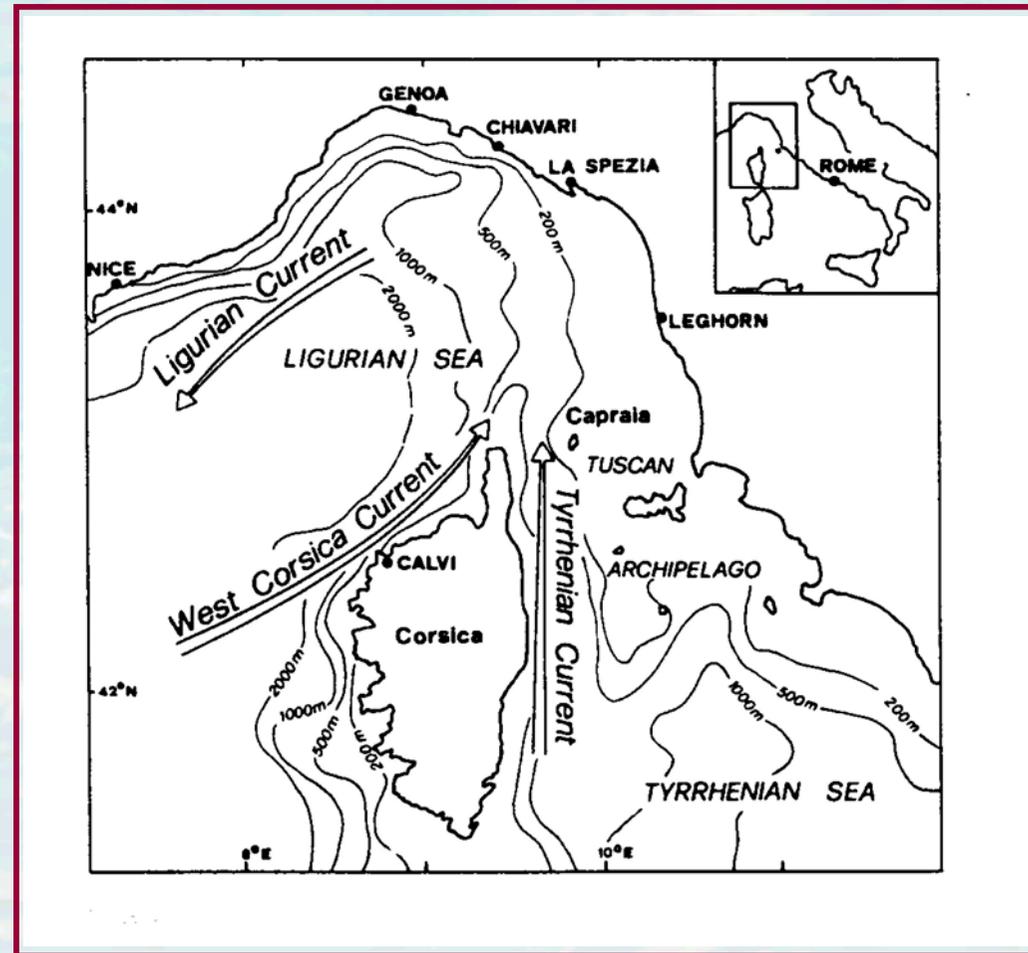
Golfe de Gênes

Principales Particularités Océanographiques

Courant ligure-provençal

Plateau continental étroit

Remontée d'eau



Golfe de Gênes

Principales Caractéristiques Environnementales

↘ Sanctuaire marin pour les cétacés vivant en Méditerranée



↘ Prairies sous-marines de *Posidonia oceanica* et de *Cymodcea nodosa*

EFFETS SUR L'ÉCOLOGIE

Court-terme
Court-terme

Effets immédiats

Caused en général la mort des différents organismes



Long-terme
Long-terme

Effets retardés dans le temps

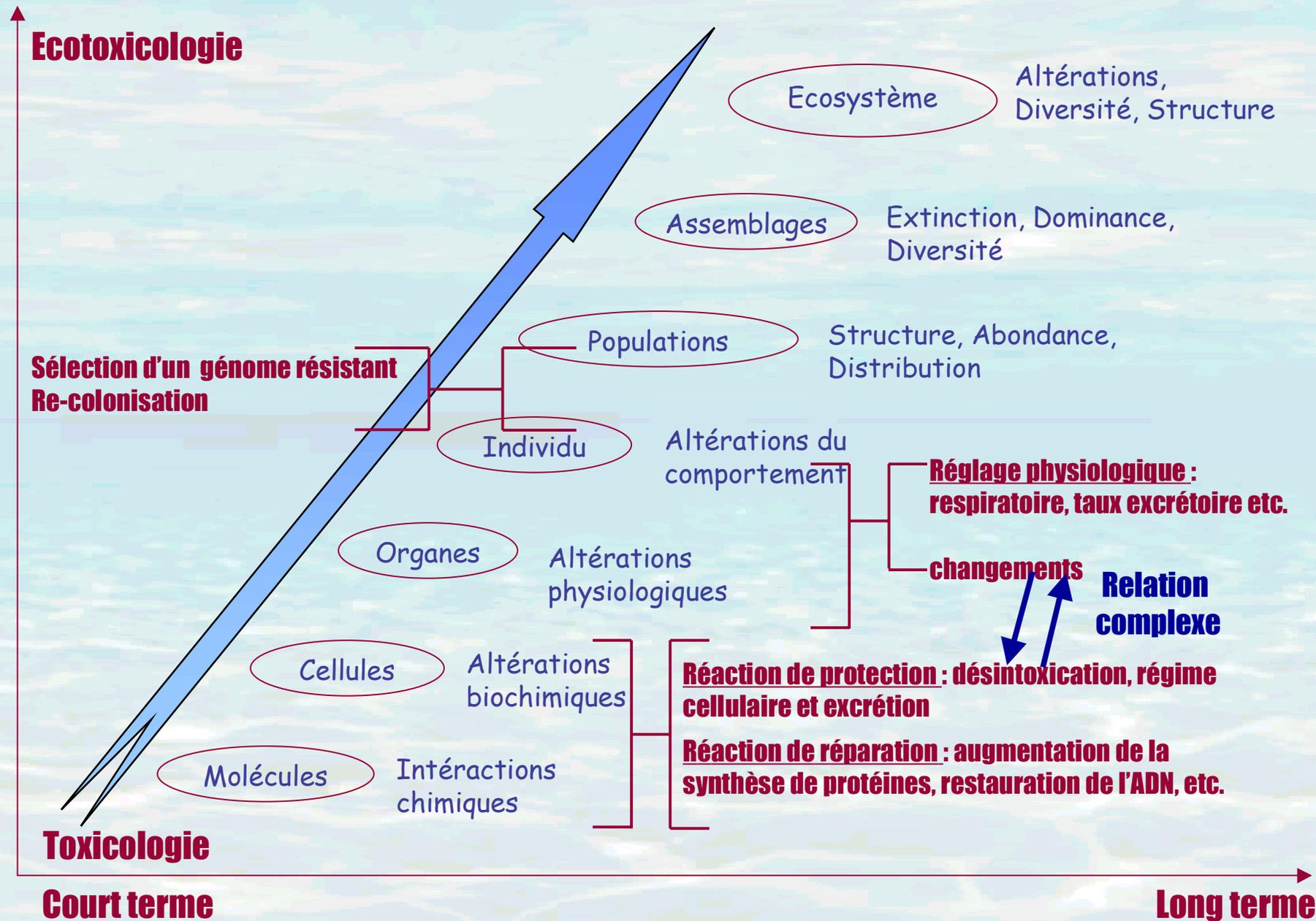
Maladies chroniques

Domages génétiques

Dysfonctionnement reproductif

Altérations physiologiques

Diminution de la biodiversité



EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT

Effets à long-terme

**ALTERATIONS
des organismes
sur le plan :**

- Physique
- Physiologique
- Comportemental



Modifications de l'écosystème

Surveillance du milieu

**Plan de contrôle et de surveillance
(réalisé par ATI ENI-IRI coordonné par le
Ministère de la Protection Civile)**

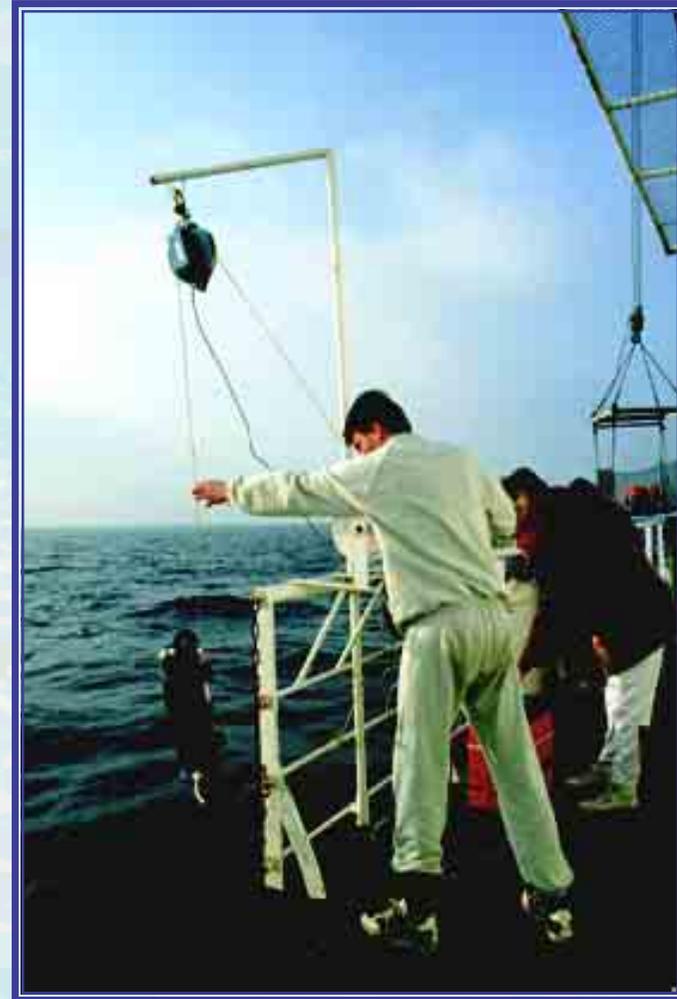
Air

Sédiments

Eau de mer

Plage & côte rocheuse

Faune et flore marines



1991-2001: Recherches Réalisées par Différentes Institutions Scientifiques

Essais de cages (projet HAVECO)

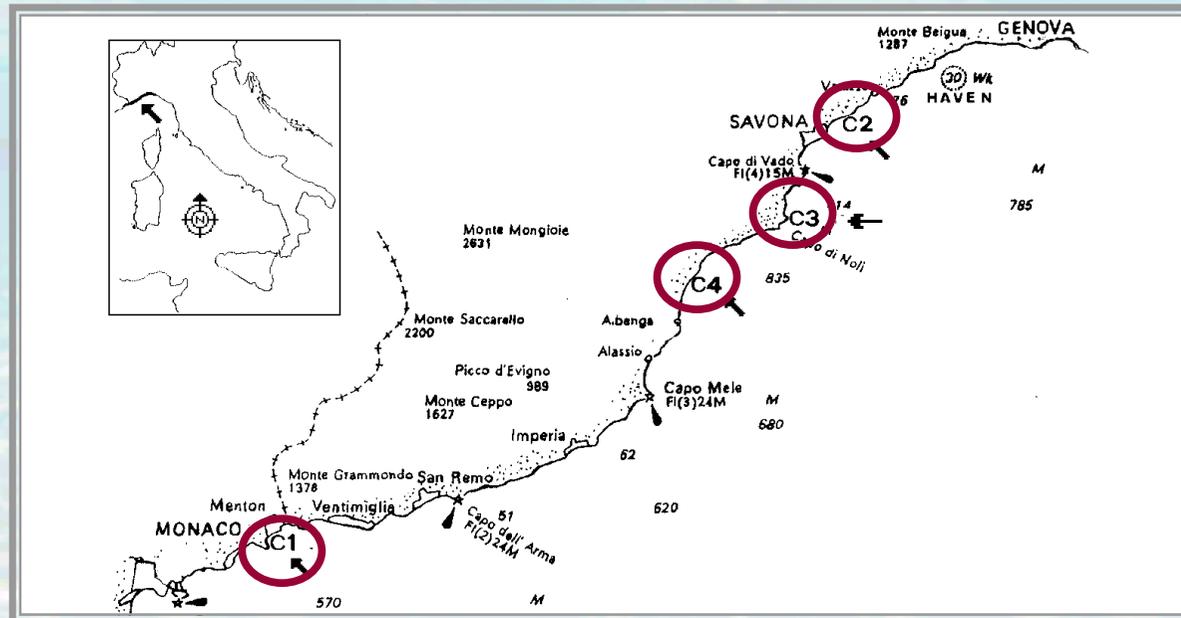
**Inspections au moyen d'un ROV et du bathyscaphe
CYANA**

Etudes sur la pêche commerciale

Surveillance des moules

Espèces infectées vivant sur l'épave

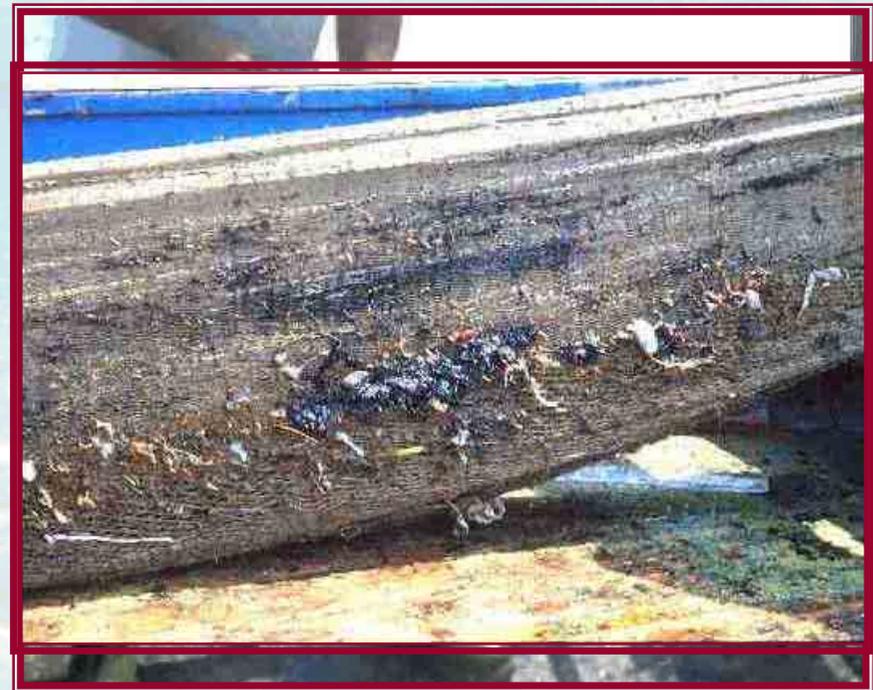
Projet HAVECO (avril-décembre 1991)



➤ **Quatre cages (C1, C2, C3, C4) comprenant des organismes sentinelles, furent positionnées à des distances croissantes de la marée noire**

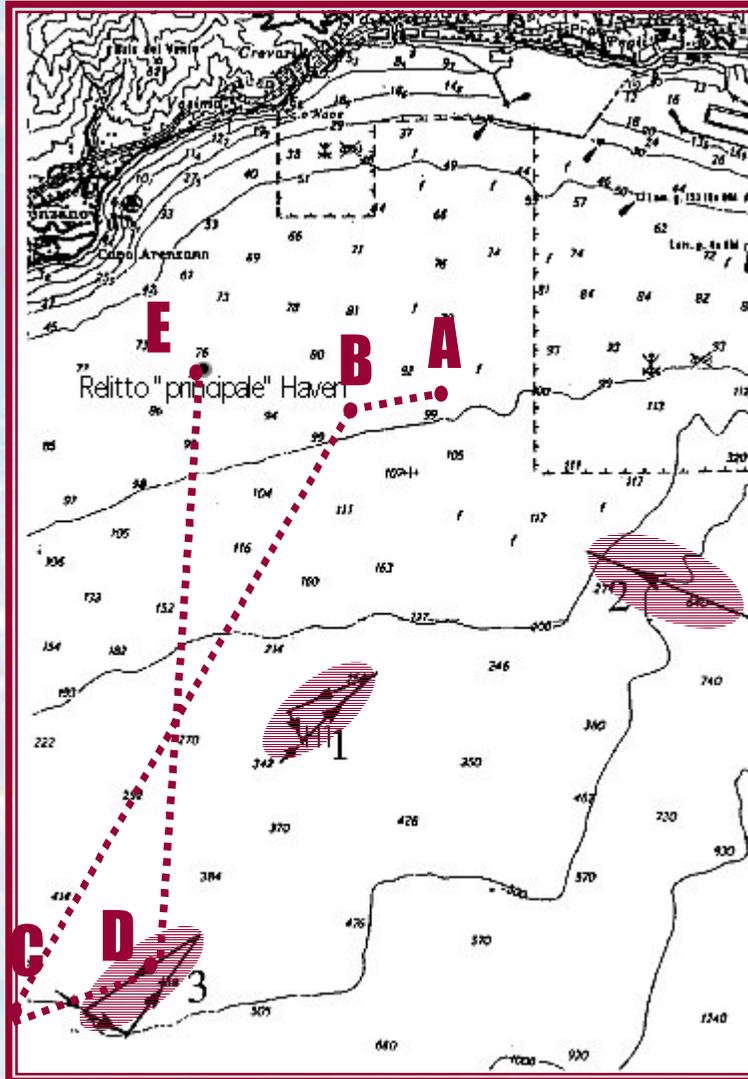
Effets sur la pêche au chalut (1992-1998)

- **Largeur du chalut**
- **Zone d'étude : entre Arenzano et Savona**
- ✓ **Zone de risque majeur face à Arenzano**
- ✓ **Zones de pêche réduites et filets endommagés par les résidus pétroliers**
- ✓ **Réduction des prises de poissons.
Baisse de 43% des captures depuis 1990**



LICYA

projet IFREMER - ICRAM (septembre 1994)



Bathyscaphe « Cyana »

Son but : étudier la distribution, la morphologie et les caractéristiques de quelques dépôts de fuel immergés profondément et observer *de visu* la faune benthique qui y est associée

LICYA

**Dépôts de fuel immergés
profondément, accompagnés
des organismes benthiques
qui s'y rapportent**

**Le fond marin a adopté les
caractéristiques d'un
*substrat dur***

**Les niveaux de HAPs
dans les carottes de
sédiments ont été
établis**



Espèces infectées par la pollution



Neuf cadres de 0.125 m² ont été positionnés sur l'épave

Des clichés des différents cadres sont pris à intervalles réguliers

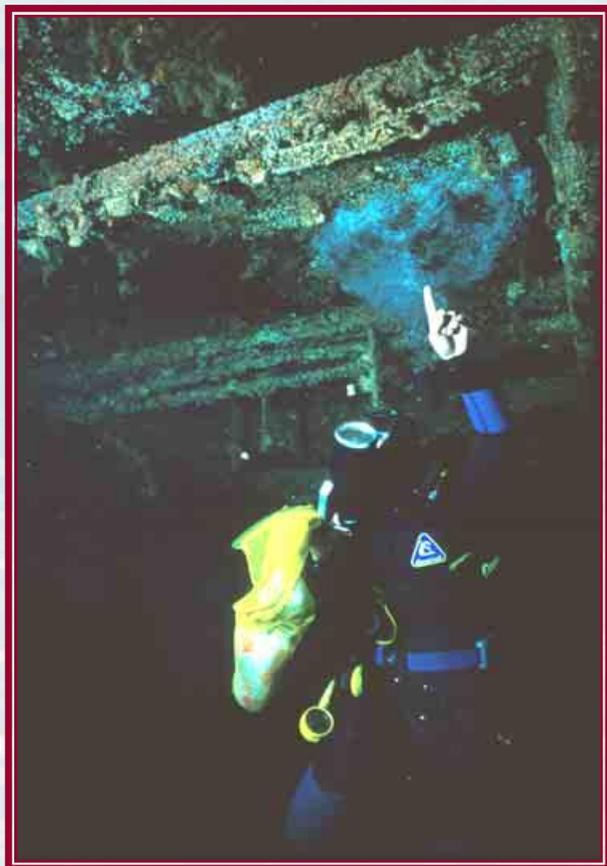
Surveillance des moules



Des spécimens d'*Ostrea edulis* ont été mis en cage à une profondeur de 40m près de l'épave pour une durée de trois mois

Les niveaux de HAPs et les indices de stress ont été mesurés et comparés avec ceux d'autres spécimens ramassés sur un site référence et directement sur l'épave

Conséquences à long-terme



Résidus pétroliers à l'intérieur de l'épave



Pétrole brûlé sur le fond marin

Dépôts de fuel

Conséquence à long-terme de l'accident pétrolier sur les pêcheries et les écosystèmes



Résidus pétroliers à l'intérieur de l'épave

Des huîtres accrochées sur l'épave ont montré des signes de contamination

Des fuites de pétrole ont été observées

Le pétrole pourrait bien se déversait massivement au fur et à mesure que l'épave rouillera



Restauration environnementale d'après la loi italienne No 471/1999

“Les activités qui ont servi à éliminer des sources et substances polluantes ou à réduire la concentration de polluant dans le sol, sous-terre et à la surface de l'eau... pour obtenir des niveaux égaux ou sous les limites autorisées”



En 1999, en conséquence de l'accord trouvé avec l'IOPCF (Loi 239/'98), 16.4 M€ ont été débloqués pour entreprendre des recherches, des expériences et des interventions de restauration du milieu

Un accord fut signé entre le Ministère italien de l'Environnement, l'ICRAM et la région Ligurie pour réaliser, au moyen d'offres publiques d'achat, un projet de restauration et d'expérimentation imaginé par l'ICRAM et validé par les principales institutions scientifiques et techniques italiennes

Directives d'intervention

- **Réduire les effets à long terme de la marée noire concernant les risques posés par les hydrocarbures immergés et l'altération de l'habitat**
- **Permettre, selon le cas, le rétablissement des conditions environnementales convenables à la sauvegarde de la population et la reprise durable des activités alicuitives**

Le projet de l'ICRAM indique les questions qui nécessitent une solution et résume avec les quatre thèmes suivants les objectifs à atteindre

- ↘ **Récupération des résidus liquides d'hydrocarbures présents à l'intérieur de l'épave (1.5 M€)**
- ↘ **Enlèvement expérimental de dépôts d'hydrocarbures sur fonds marins profonds (11.8 M€)**
- ↘ **Restauration des prairies de *P. oceanica* (1.8 M€)**
- ↘ **Base de données, contrôle et surveillance (1.3 M€)**

Objectifs spécifiques

- **Localiser, enlever et recycler/détruire les hydrocarbures liquides restant dans la partie principale de l'épave**
- **Définir la quantité et la distribution des résidus pétroliers sur les fonds marins**
- **Découvrir et appliquer le BAT pour réaliser des opérations de nettoyage**
- **Evaluer la persistance, la pertinence et l'extension de la nocivité des hydrocarbures immergés ainsi que l'efficacité et une éventuelle poursuite des opérations de nettoyage**
- **Evaluer la persistance des dommages causés sur les massifs d'algues de même que les possibilités de restauration et de protection qui s'y rapportent**

...parce que

« ...il est probable que l'épave et les milliers de tonnes de résidus pétroliers affectant les fonds marins, soient à l'origine de molécules carcinogènes, mutagènes et teratogènes ... »

...sachant que

La restauration envisagée et les travaux de nettoyage impliquent la disponibilité des connaissances, des méthodologies et des instruments devant être adaptés ou installés

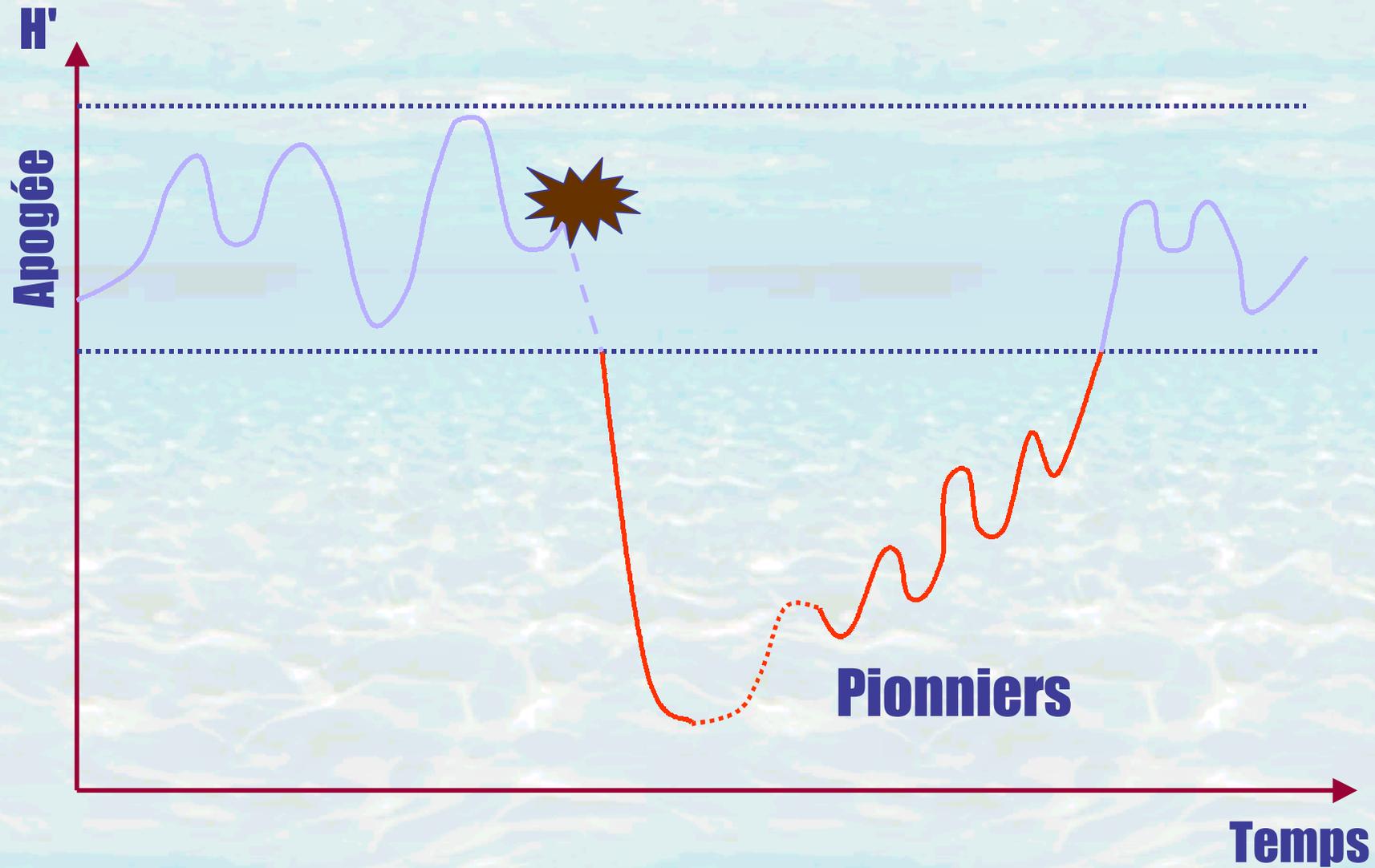
Les activités de Recherche & Développement jouent un rôle très important

...mais aussi en prenant en compte le fait que



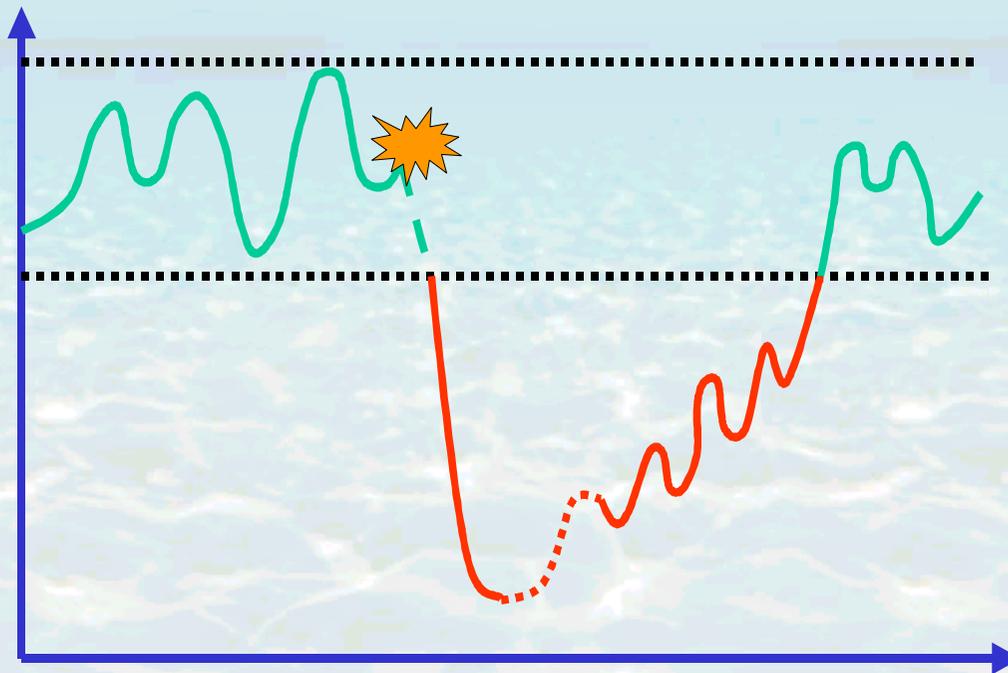
**La restauration
environnementale
peut très bien ne
jamais ramener
l'écosystème dans
l'état qu'il était
auparavant**

Effets d'une marée noire sur un assemblage benthique



Restauration:

Lorsque les ressources affectées atteignent le stade qu'elles auraient dû atteindre à ce moment s'il n'y avait eu d'impact, direct ou indirect



Cette définition prend en considération les possibles changements naturels qui surviennent avec le temps

PLANIFICATION DU NETTOYAGE

Source: Décret Min. n° 471 - 25/10/1999, G. U. Suppl. Ordin. n° 293 - 15/12/1999

1. Représentation

- Rassemblement des données existantes sur le sujet
- Plan de représentation initial
- Représentation du site

2. Projet initial

- Analyse des polluants
- Test des technologies disponibles
- E.I.A. de l'intervention prévue
- Test de validation

3. Projet exécutif

- Plan détaillé du travail envisagé et coûts relatifs
- Plan de contrôle et de surveillance *Post-operam*

Plan de nettoyage de l'épave

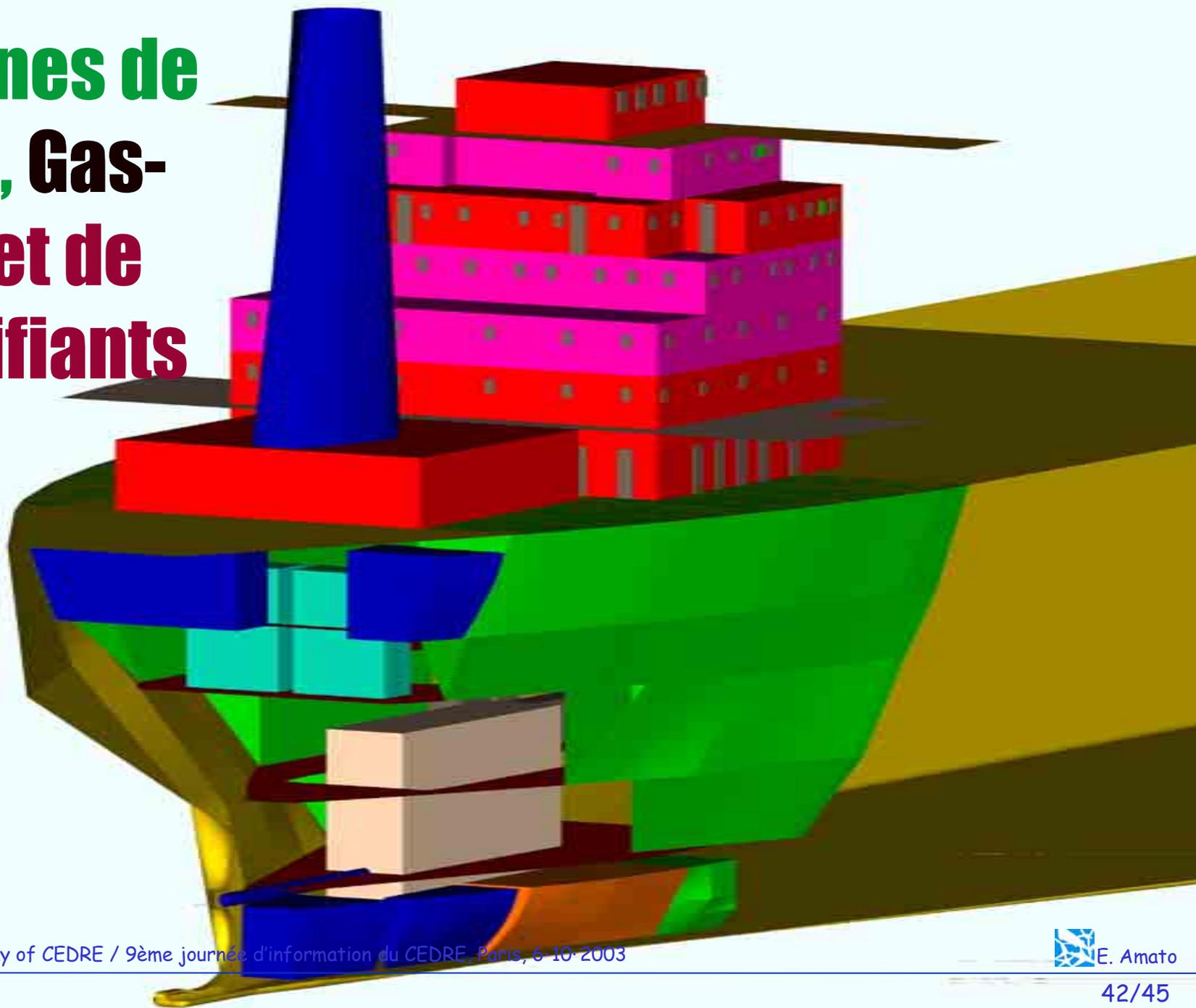
Se projeter et planifier

- analyse du problème
- Définition d'une structure logique
- identification des objectifs
- Choix des stratégies et des méthodes

Contrôle, Surveillance et Evaluation

- Directives
- Indicateurs
- Evaluations

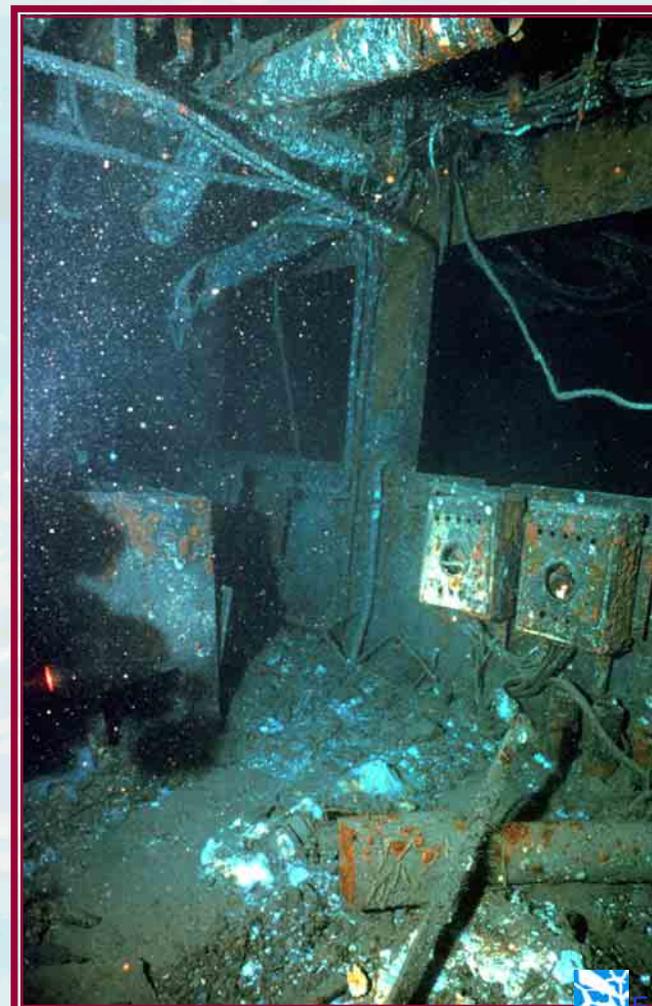
Citernes de Fuel, Gas- oil et de Lubrifiants



Eau trouble dans la salle des pompes

Analyse des particules solides en suspension

Produit	mg/Kg
Hydrocarbures	100,0
Fer	188,6
Aluminium	137,1
Zinc	38,6



Nettoyage: jusqu'à quel point et à quel prix ?

Quantification du risque sanitaire

Méthodologie ACBR (Action Corrective Basée sur le Risque) *

*** Association Américaine d'analyse et guide
provisoire des substances standards de ACBR – PS
104 – 98, 1998**

**Quantification préventive des
concentrations acceptables dans
les sentiers d'exposition du site qui
sont déterminés**

**Quantité de polluants susceptible
de rester dans l'épave et ne
représentant aucun danger pour
l'homme**

Ces quantités représentent un objectif de nettoyage réaliste et réalisable

Fin

Un programme de restauration environnementale 12 ans après : L'épave du Haven

E. Amato

ICRAM-Central institute for marine applied research

Via di Casalotti 300, 00166 Rome, Italie

e.amato@icram.org

Résumé

L'accident du super pétrolier « HAVEN » est le cas le plus important de marée noire n'ayant jamais eu lieu en mer Méditerranée. Le 11 avril 1991, alors que le HAVEN avait jeté l'ancre en face du port de Gênes, deux violentes explosions à bord du navire provoquèrent un incendie qui ne put être éteint que 70 heures plus tard lorsque celui-ci coula. Au moment de l'accident, le navire transportait 144 000 tonnes de fuel lourd iranien. Une quantité importante de pétrole brûlé coula rapidement sous la forme de bitume, alors que le reste de la cargaison fut dispersé par les vents et le courant liguro-provençal. Pendant la phase d'urgence, les opérations commencèrent pour contenir la pollution. Deux décisions importantes furent prises : remorquer l'épave vers la côte et autoriser que l'on brûle la majeure partie du pétrole déversé en mer.

Les opérations ont consisté à confiner le pétrole déversé, ramasser le pétrole en mer et sur terre ainsi qu'à réaliser un plan de surveillance et de contrôle environnemental.

Douze ans plus tard, un programme de restauration est sur le point d'aboutir concernant principalement les résidus de goudron reposant au fond de la mer et les produits pétroliers encore présents à l'intérieur de l'épave. Au sein de cette structure un contrat vient juste d'être signé avec un consortium à propos de l'estimation des quantités et de la localisation des résidus pétroliers. Le travail à entreprendre est l'exemple même des difficultés que comportera le nettoyage de l'épave d'un super pétrolier. Des plongeurs doivent explorer l'épave, décrire et quantifier les résidus pétroliers dans des conditions de visibilité quasi-nulles, à des profondeurs considérables, dans des citernes de stockage difficilement accessibles et tout cela en plus des contraintes économiques et de temps. De plus les procédures administratives, exécutées par le comité désigné pour assigner les tâches, se sont avérées des plus compliquées du fait de la nécessité pour cette structure légale de se débrouiller avec les particularités de ce cas bien précis.

Introduction

L'accident du super pétrolier HAVEN est le cas le plus important de marée noire ayant jamais eu lieu en mer Méditerranée et l'un des pires au monde sur le plan du transport maritime de produits pétroliers. Le 11 avril 1991 à 12h30, seulement douze heures après la collision entre le M/C « AGIP ABRUZZO » et le ferry « MOBY PRINCE » en face de Livourne, le super pétrolier chypriote « HAVEN » mouillait face au port de Gênes lorsque deux violentes explosions, dont les causes restent encore inconnues à ce jour, provoquèrent un incendie à bord du navire qui ne put être maîtrisé que 70 heures plus tard, le 14 avril à 10h15, lorsque le navire coula.

Tableau I. Caractéristiques principales du super pétrolier HAVEN

Nom	HAVEN (ex AMOCO MILFORD HAVEN) Limassol (Chypre)
Construction	Astilleros Españoles S.A., Cadiz (Espagne), 1973
Société de classification	A1 Oil Carrier, American Bureau of Shipping
Longueur	334,02 m
Largeur	51,06 m
Hauteur du pont	26,18 m
Tirant d'eau	19,91 m
Tonnage brut	109 700 t
Tonnage net	91 988 t
Port en lourd	35 395 t (8k98 FF) diesel, deux-temps, 8 cylindres en ligne
Moteur	30 400 chevaux (103 RPM)
Vitesse avec chargement plein (28 000 chevaux)	15,3 nœuds
Fuel (ca.)	9 000 t 13 citernes (3 centrales, 5 à tribord et 5 à bâbord),
Citernes	volume total 283 626 m ³ Citerne centrale N°2 : à ballasts propres
Capacité (d.w)	232 164 t
Equipement	Système d'extinction par gaz inerte, système de lavage au pétrole brut, arrangements de ballasts propres

Lors de l'accident, qui tua 5 membres d'équipage, 144 000 tonnes de "fuel lourd iranien" et 1223 tonnes (estimation) de fuel et de gas-oil se trouvaient à bord du pétrolier.

Tableau II. Propriétés majeures du pétrole brut

Type	Catégorie	Gravité spécifique	Viscosité (cSt)	Point d'écoulement (°C)
Fuel lourd iranien	Contenu moyen en paraffine	0,869	30 à 10°C	-7

Une quantité importante de pétrole brûlé coula rapidement sous la forme de bitume alors que le reste de la cargaison fut dispersé par le courant liguro-provençal et les vents à majorité ouest-sud-ouest ; d'après les images satellite prises par une équipe d'experts quelques heures après le naufrage du HAVEN, les nappes de pétrole affectaient la surface de l'eau sur près de 100 km². D'après le REMPEC (REMPEC, 1991)¹ jusqu'au 25 avril l'épave continuait de déverser du pétrole sans interruption à la vitesse de 10 m³ par heure pendant les deux premiers jours et d'un mètre cube par jour à la fin de la deuxième semaine après l'accident. L'incendie qui a sévit pendant près de 70 heures est responsable du naufrage du navire sur une zone restreinte des fonds marins, ainsi que de la perte de 10 000 tonnes sur 50 000 (Medugno, 1992 ; Fresi, 1992 ; Volterra, 1992)^{2,3,4}.

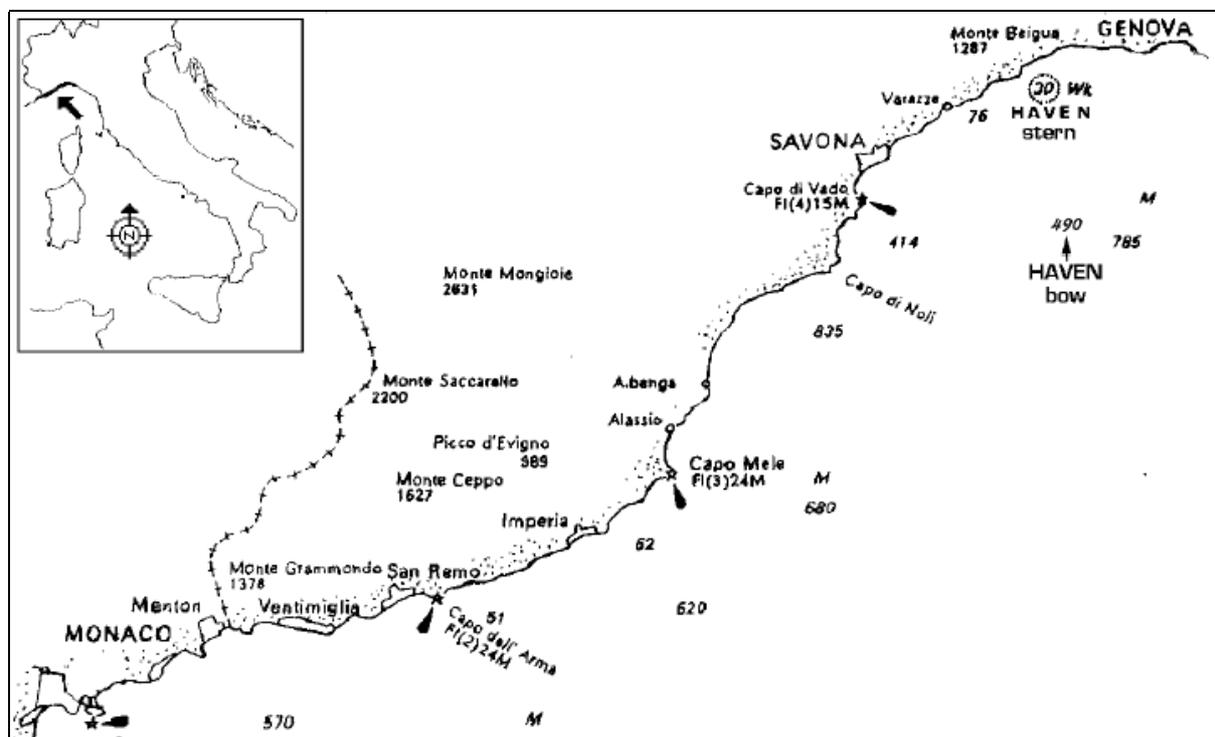


Figure 1. La côte ligurienne affectée par la marée noire. Position du super pétrolier HAVEN sur la carte.

A cause de la première explosion, le navire perdit le pont de la citerne centrale N°1 ainsi qu'une partie de la citerne centrale N°2. Lors du remorquage de l'épave en feu vers la côte, celle-ci se brisa en deux. La partie avant ainsi que deux citernes reposent à 490 m de profondeur, alors que la partie principale du navire (220 m de long) se trouve désormais à 75-78 m de profondeur, à 1,5 miles au large d'Arenzano (fig.1).



Figure 2. Le super pétrolier HAVEN brûlant devant la ville d'Arenzano.

Produits pétroliers déversés en milieu marin

Une fois déversés en mer, ces produits ont été exposés à une série de processus chimiques et physiques qui ont déterminé leur sort en mer. Une partie du pétrole déversé fut directement ramassée à la surface de l'eau (A.T.I. ENI-IRI, 1991a)⁵, une autre fut rejetée à la côte (A.T.I. ENI-IRI, 1991b)⁶, une autre se répandit en mer à partir de la zone d'intervention, tandis que le reste coula tout simplement. La quantité totale d'hydrocarbures qui brûlèrent pendant 70 heures à la suite de la première explosion a été estimée aux alentours de 95 500 tonnes sur 103 500, alors qu'on estime à 3 000 tonnes la quantité de pétrole emprisonnée à l'intérieur de l'épave sous forme solide principalement. Les valeurs contenues dans le tableau ci-dessous sont des estimations qui prennent en compte les conditions météorologiques marines au moment de l'accident, les jours suivant l'accident ainsi que les processus physico-chimiques qui ont eu lieu durant chaque phase de l'accident.

Tableau III. Produits pétroliers déversés en mer (Aquater S.p.A., Bonifica S.p.A., 1993, modified)⁷

Evaporés :	14 500/17 000 t
Brûlés :	95 500/103 500 t
Rejetés vers la côte :	1 000/1 500 t
Ramassés à la surface de l'eau :	2 000 t
Qui ont coulé :	10 000/50 000 t
Encore dans l'épave :	3 000 t
Dispersés en mer :	3 500/5 000 t

La phase d'urgence

Durant la phase d'urgence, les opérations commencèrent dans le but de contenir la pollution. Les équipes d'intervention durent faire face à de nombreuses difficultés car elles devaient également s'occuper de l'autre accident qui était survenu près de Leghorn 12 heures plus tôt. Cette phase d'urgence au niveau local débuta au moment de l'accident et dura jusqu'au 14 avril lorsque l'urgence nationale fut décrétée. Dans chacune des deux phases, toutes les opérations étaient coordonnées par le commandant de la Capitaneria di Porto (Gendarmerie Maritime) de Gênes Adm. A. Alati, lorsque l'urgence nationale fut décrétée le Comité d'Urgence Nationale le nomma responsable des opérations sur place. De plus, une cellule de crise fut créée au Ministère de l'Environnement dans le but de se charger spécifiquement des aspects environnementaux.

Alors que le HAVEN était en train de brûler, deux décisions importantes furent prises :

- Remorquer l'épave vers la côte pour l'empêcher de couler à des profondeurs où il serait extrêmement difficile d'entreprendre une quelconque action et de confiner la pollution sur la côte ;
- Autoriser que l'on brûle la majeure partie du pétrole déversé en mer (l'incendie fut circonscrit au moyen de lances à eau haute-pression) pour éviter qu'il ne se répande davantage sur la surface de l'eau ainsi que sur la côte.

Les opérations concernaient :

- Le confinement des produits pétroliers déversés au moyen de barrages flottants ;

- Le ramassage des produits déversés en mer au moyen d'écrèmeurs à disques;
- Le ramassage des produits déversés sur la côte ;
- La protection des ports et de la côte contre la marée noire.

Aucun dispersant n'a été utilisé.

Une série de paramètres fut contrôlée et des données furent collectées dans le cadre d'un plan de surveillance utilisant des navires, des satellites et des avions. Durant les deux semaines suivant l'accident, les navires anti-pollution travaillèrent près de 8 000 heures et ramassèrent en mer près de 11 000 tonnes d'émulsion. Près de 20 000 mètres de barrages flottants furent utilisés. Grâce aux bonnes conditions météorologiques survenues quelques temps après l'accident, les opérateurs purent travailler convenablement et contenir les dommages subis par le milieu.

Mesures de sécurité

Durant les jours suivant l'accident, un plan fut élaboré dans le but de commencer les opérations dès la fin de la phase d'urgence (le 22 mai). Ce plan fut divisé en plusieurs projets (Persiani, 1992)⁸ :

- Mesures de sauvegarde de la partie principale de l'épave. Celle-ci fut inspectée et les hydrocarbures liquides qui s'en échappaient furent ramassés au moyen d'appareils de succion (cette opération fut répétée trois fois jusqu'en 1995). Les parties de l'épave gênant la navigation furent enlevées.
- Inspection des fonds marins près de la partie principale de l'épave au moyen d'un sonar à balayage latéral, d'un profileur de sous-fonds marins et d'un engin télécommandé. Les résultats montrèrent que les fonds marins, entre 1 000 et 1 200 mètres de l'épave, étaient affectés par des dépôts de goudron d'une épaisseur de 10 cm qui couvraient une surface de 120 000 m².
- Contrôle de l'air, de l'eau de mer, des sédiments, des plages, des côtes rocheuses, de la faune et de la flore marines. Une base de données fut mis en place pour regrouper les informations déjà disponibles et celles collectées grâce au plan de contrôle et de surveillance.
- Opérations de nettoyage en mer. Les résidus pétroliers qui ont coulé à 10 mètres de profondeur, ont été localisé et récupérés. Cette opération s'avérait nécessaire car ces

dépôts auraient pu se transformaient en particules en suspension pouvant ainsi causer davantage de dégâts sur terre. Du fait qu'il n'y avait pas de précédent concernant l'assainissement de surfaces en milieu marin aussi étendues, plusieurs techniques déjà en vigueur ont été développées et testées pour garantir le respect de la morphologie du sol, de la faune et de flore sous-marines. La récupération manuelle au moyen de plongeurs est la méthode la plus souvent utilisée et celle qui s'est avérée la plus flexible et la plus souvent couronnée de succès car elle peut s'appliquer à tout type de sol marin. Cette technique a été complétée par l'utilisation par les plongeurs d'une sorte de couteau à palourde en acier. Ces opérations se terminèrent en août 1991 lorsque 200 m³ de produits solides furent ramassés sur les fonds marins (Morucci C. et al., 2002)⁹.

- Opérations de nettoyage à terre. Les étendues de côtes concernées par la présence de résidus pétroliers étaient plutôt discontinues. Le travail réalisé sur les plages était mécanique, avec le ramassage de la couche de polluants effectué au moyen de machines sauf dans certaines zones peu polluées où le ramassage était effectué manuellement (nettoyage de galettes de fuel, de rochers souillés, etc.). Le long de la côte rocheuse, des môles et des quais, l'action était à la fois mécanique et manuelle de par l'utilisation de nettoyeurs écologiques utilisant de l'eau de mer à température ambiante. Grâce à ce système, le pétrole brut était enlevé au moyen de jets d'eau haute-pression, après que la zone de travail ait été protégée de manière adéquate au moyen de barrages flottants. 91 kms de plages de sable, 5,7 kms de côte rocheuse et 7,3 kms de môles et quais ont ainsi pu être nettoyés. Cette opération d'assainissement concernait également 370 navires qui mouillaient dans les ports d'Arenzano et de Varazze. Les opérations ont commencé le 25 mai et se sont véritablement achevées en grande partie à la mi-juillet 1991. Un groupe d'urgence a travaillé jusqu'au 15 septembre pour nettoyer les redépôts de résidus d'hydrocarbures le long des côtes.



Figure 3. Plage souillée par la marée noire

- Enlèvement des déchets. Les substances ramassées en mer (une émulsion à base de résidus de pétrole brut et d'eau) ont été stockées dans des citernes de rejets à retraiter. Le procédé consistait à séparer l'eau des résidus d'hydrocarbures au Porto Petroli de Gênes Multedo au moyen d'un équipement mobile adéquat. Les résidus furent expédiés par bateau dans une raffinerie pour subir un traitement supplémentaire, comportant une dilution du pétrole brut, un dessalage accru, une séparation des polluants pour qu'enfin ces résidus soient récupérés sous la forme de produits pétroliers. Les substances recueillies au cours des travaux de récupération sur terre et en mer furent stockés temporairement dans un entrepôt situé à Voltri. Celui-ci abritait principalement :
 - des matériaux pierreux (sable, galets, gravier, etc.) ;
 - des résidus bitumineux ;
 - et autres (barrages absorbants, débris, etc.).

La plupart des matériaux pierreux furent utilisés comme remblai dans le port de Voltri alors que les autres résidus furent incinérés ou expédiés vers une décharge pour les déchets spéciaux.

Contrôle environnemental

La mer Ligurienne est un système complexe comprenant des chaînes trophiques diversifiées allant des phytoplanctons aux cétacés. Les caractéristiques géographiques et océanographiques de ce site, ajoutées à la qualité et à la quantité de produit déversée, ainsi que l'évolution des conditions météorologiques marines, sont parmi les variables qui peuvent influencer sur le sort du pétrole en mer et par conséquent les effets de ce produit sur l'environnement. Quelques semaines après l'accident, un plan de contrôle environnemental fut mis au point, bien que beaucoup de ses phases n'avaient pu être accomplies suite à une évaluation plus poussée et à un manque de capitaux manifeste. En plus du contrôle de l'eau et des sédiments, qui consistait essentiellement à mesurer la teneur totale en hydrocarbures et en HAPs (Hydrocarbures Aromatiques polycycliques), de nombreuses analyses ont été réalisées sur la faune marine. Deux cent échantillons de moules ramassées sur la côte près de l'épave ont été analysés. Une certaine quantité de moules « propres » ont été ramassées et transférées sur le site pollué pour tester leur taux de bioaccumulation. Des échantillons de la faune démersale furent collectés au moyen de chaluts dans 36 points d'échantillonnage (dont certains sont situés là où l'on pratique habituellement la pêche commerciale). Cette action, qui avait pour but d'obtenir des données sur le statut des stocks commerciaux, permit également de découvrir quelques dépôts bitumineux sur les fonds marins. A chaque poste, tous les spécimens de poissons pêchés furent mesurés et identifiés, la quantité de résidus pétroliers ramassée fut également pesée. Les résultats montrèrent que la plupart des dépôts étaient concentrés sur une zone allant de l'épave au Capo Napoli (Fig.1, Fig.4 et Fig.5).

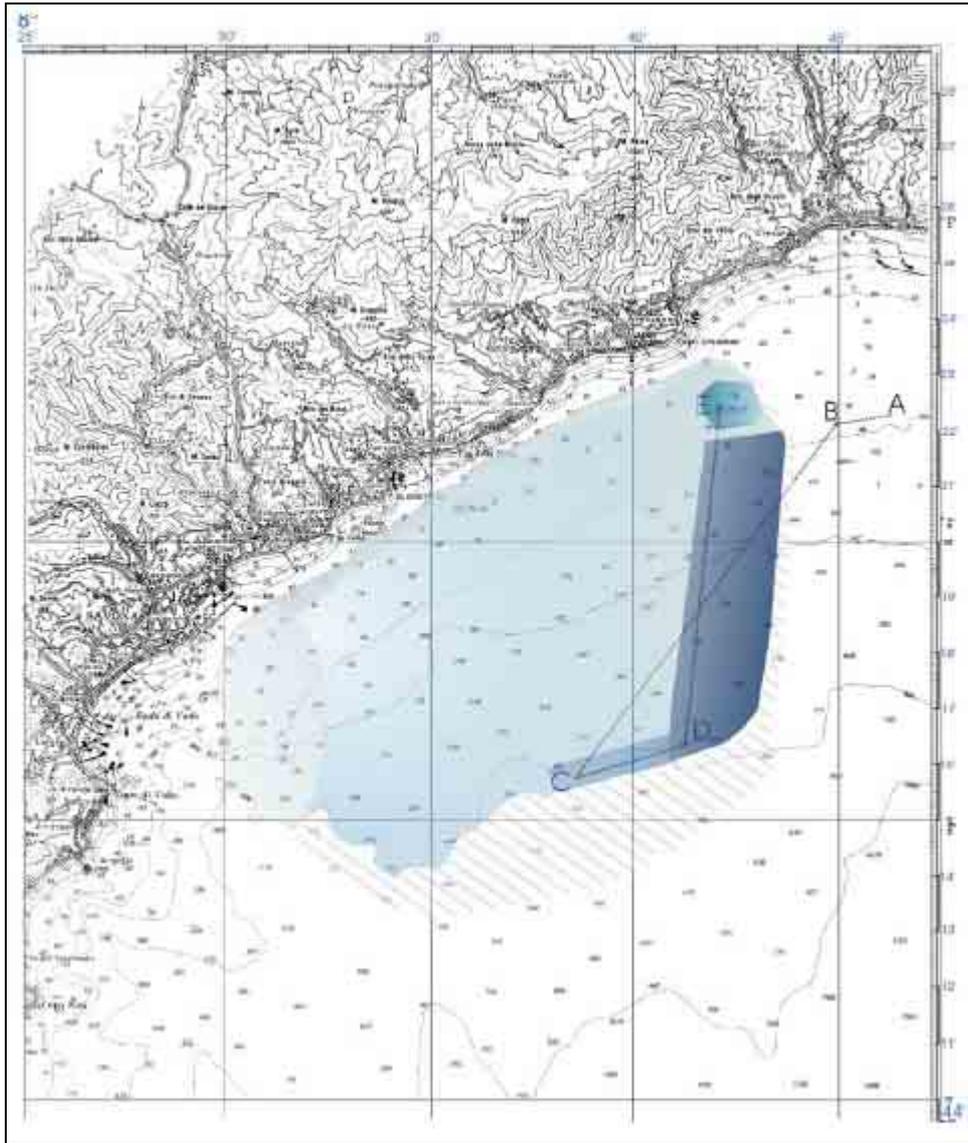


Figure 4. Carte montrant l'emplacement des dépôts de goudron sur les fonds marins

Des investigations ont été réalisées le long des zones où l'on trouve l'algue *Posidonia oceanica*. Une activité de contrôle a été conçue dans le but de détecter une quelconque régression des prairies sous-marines. Par ailleurs, des institutions scientifiques ont réalisé de nombreuses recherches, dont quelques exemples sont donnés ci-dessous.

Entre le 17 et le 22 avril, une équipe de chercheurs français et italiens ont mené un projet de contrôle (projet HAVECO) visant à évaluer les effets à court terme du pétrole déversé en mer (Amato et al., 1993)¹⁰. Dans le but d'acquérir des données sur le niveau et l'étendue géographique de la pollution résultant de l'accident du « HAVEN », quatre cages contenant des organismes sentinelles (spécimens de *Dicentrarchus labrax* (Linneus, 1758), *Mytilus*

galloprovincialis Lamarck, 1819 et *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793)) furent positionnées près des fonds marins à une profondeur entre 20 et 25 mètres. Les cages furent positionnées à des distances croissantes du site de l'accident d'après un gradient de la pollution le plus vraisemblable. Du fait de l'impossibilité de récupérer toutes les cages, seul les tissus des organismes contenus dans une cage, située à 15 miles nautiques du lieu de l'accident, furent analysés. Bien que la concentration d'hydrocarbures aliphatiques et polycycliques aromatiques dans les sédiments recueillis près de la cage était comparable à celui déjà reconnu pour cette zone, les niveaux de concentration de HAPs dans les matrices biologiques révélèrent l'existence d'un gradient lié au temps. Les eaux polluées ont affecté le site où se situait la cage, comme le montrent les résultats des expériences menées sur les organismes exposés aux effets de la marée noire dans cette zone.

Une autre étude menée en 1992 par l'ICRAM, dont le but était d'évaluer les effets de l'accident sur la pêche au chalut. La zone d'étude, située entre Arenzano et Savona, fut comparée à un site référence indirectement concerné par l'accident du HAVEN. Les résultats montrèrent que la zone soumise à un risque majeur était celle située en face d'Arenzano, étant donné que c'était l'endroit où la probabilité de ramasser des galettes de fuel dans ses filets était la plus élevée (Fig.4 et Fig.5). Les effets les plus évidents sur les activités de pêche concernaient la réduction des zones de pêche et les dommages occasionnés aux filets par les résidus pétroliers. Comme la taille des zones de pêche diminuait, il fut remarqué une baisse notable des prises de poissons. En comparant ces résultats avec les données antérieures pour la même zone de pêche, il a été enregistré une baisse de 43% des prises depuis 1990.



Figure 5. Principales zones de déposition des résidus pétroliers

En septembre 1994, trois plongées ont été effectuées au moyen du bathyscaphe CYANA appartenant à l'IFREMER, avec pour but de détecter la distribution, la morphologie et les caractéristiques de galettes de fuel profondément immergées et d'observer de visu la faune benthique qui s'y rapporte (Amato E. et al., 2002)¹¹. Les fonds marins à une profondeur de 350 m sont habituellement caractérisés par la présence d'organismes benthiques (Hydroida, Polychaeta, Serpulidae, Eledone sp., Munida sp., Antedon sp., etc.) ainsi que de poissons bento-nectoniques mais à cause de la pollution on pouvait également dénombrer de nombreux dépôts de fuel plutôt conséquents. D'après les niveaux de HAPs mesurés qui ont été décelés dans les carottes de sédiments (Tableau IV) ramassés au moyen du bathyscaphe près de galettes de fuel immergées en profondeur (figure 6), ces dépôts sont en mesure de déterminer la contamination des réseaux trophiques et de contribuer à la modification de l'équilibre de l'écosystème.

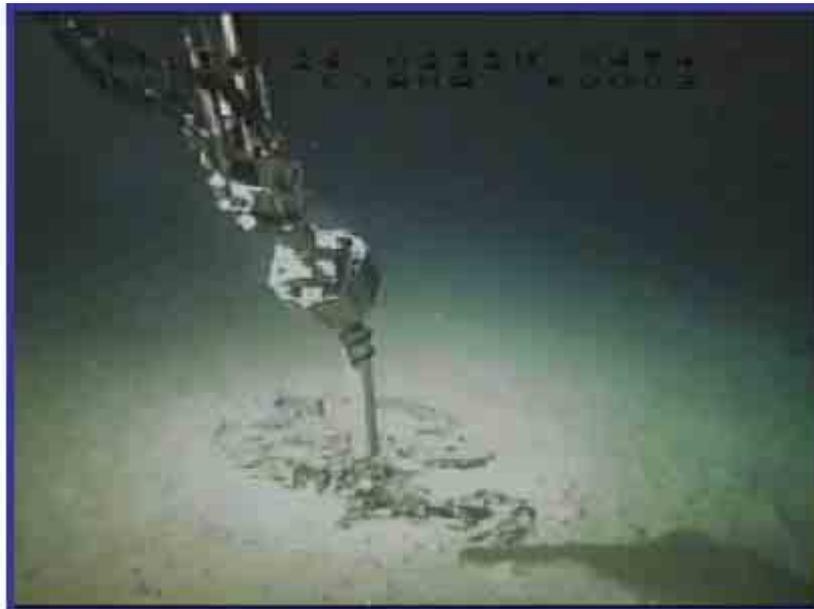


Figure 6. Prélèvement d'un échantillon de sédiment bathyal

Tableau IV. Concentrations d'hydrocarbures aromatiques polycycliques ($\mu\text{g g}^{-1}$ d.w) dans quatre sous-échantillons d'une carotte de sédiments prélevé lors de l'expédition CYACHUM '94

(1 = couche superficielle ; 2,3,4 = sous-couches superficielles).

	1	2	3	4
Naphtalène	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Acénaphène	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Phénanthrène	0,019	0,005	<0,001	<0,001
Anthracène	0,005	0,002	<0,001	<0,001
Fluoranthène	0,021	0,013	0,004	0,003
Pyrene	0,047	0,003	<0,001	0,001
Chrysène	0,079	0,014	<0,001	<0,001
Benzo(a)anthracène	0,037	0,005	0,004	0,003
Benzo(b)anthracène	0,087	0,019	0,005	0,004
Benzo(k)anthracène	0,027	0,004	<0,001	<0,001
Benzo(a)pyrene	0,041	0,006	<0,001	<0,001
Dibenzo(a,h)anthracène	0,003	<0,001	<0,001	<0,001
Benzo(g,h,i)perylene	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Indeno(1,2,3c,d)pyrene	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
TOTAL PAHs	0,366	0,071	0,013	0,012

Des études qui avaient pour but d'évaluer les dommages génotoxiques et les modifications du tissu hépatique prélevé chez les espèces démersales de poissons vivant dans cette zone, (Pietrapiana D. et al., 2002)¹² montrent clairement une réaction de la part des *Lepidorhombus boschii* face à la toxicité des dépôts de galettes de fuel pour le test du micro-noyau et les modifications subies par les des tissus du foie.

De plus, les fonds marins, qui sont composés principalement de sédiments incohérents, ont adopté les caractéristiques d'un substrat dur, permettant l'établissement et le développement d'espèces nouvelles dans cet environnement.

Deux projets de recherches concernant l'accident du « HAVEN » sont actuellement en cours. Le premier a pour but d'étudier les populations infectées sur la partie principale de l'épave. Dans cette optique, neuf cadres de 0,0125 m² ont été positionnés sur la partie interne du pont et la partie externe de la coque à 45 m de profondeur. Des plongeurs prennent actuellement des clichés de ces cadres à des intervalles réguliers dans le but de détecter le développement des populations associées à ce milieu. Le second projet se rapporte à des expériences d'encagement (surveillance des moules). Des spécimens d'*Ostrea edulis* sont mis en cage et descendus à une profondeur de 40 m près de l'épave pour une durée de trois mois. Par la suite, les organismes sont collectés, les niveaux de PAHs et les indices de stress mesurés puis comparés avec ceux d'autres spécimens en provenance d'un site référence et directement et directement sur l'épave. Les résultats montrent que les spécimens vivant sur l'épave et ceux

qui sont enfermés dans les cages environnantes, montrent effectivement des signes de stress et un taux de PAHs plus importants (Viarengo A., 2001)¹³.

Plans de remédiation

En 1999, huit ans après l'accident, en conséquence de l'accord établi avec l'IOPCF (Loi 239/98), 16,4 millions d'euros ont été mis à disposition pour entreprendre des études, des expériences et des interventions de restauration ; ainsi des plans de remédiation pourront être mis au point. Un accord a été signé entre le Ministère italien de l'Environnement, l'ICRAM et le Conseil Régional de Ligurie dans le but de réaliser, au moyen d'offres publiques d'achat, un projet de restauration et d'expérimentation imaginé par l'ICRAM¹⁴ et validé par les principales institutions scientifiques et techniques italiennes.

Directives du plan de nettoyage et d'expérimentation

- Réduire les effets à long terme de la marée noire concernant les risques posés par les hydrocarbures immergés et l'altération de l'habitat.
- Permettre, selon le cas, le rétablissement des conditions environnementales convenables à la sauvegarde de la population et la reprise durable des activités halieutiques.

Objectifs du plan de nettoyage et d'expérimentation

Localiser, enlever et recycler/détruire les hydrocarbures liquides restant dans la partie principale de l'épave

- Définir la quantité et la distribution des résidus pétroliers sur les fonds marins
- Découvrir et appliquer le BAT pour réaliser des opérations de nettoyage
- Evaluer la persistance, la pertinence et l'extension de la nocivité des hydrocarbures immergés ainsi que l'efficacité et une éventuelle poursuite des opérations de nettoyage
- Evaluer la persistance des dommages causés sur les massifs d'algues de même que les possibilités de restauration et de protection qui s'y rapportent

Le but premier de ce plan est :

- Le nettoyage des résidus liquides de pétrole présents dans la partie principale de l'épave ;
- Le nettoyage expérimental d'une partie des fonds marins concernés par la présence de galettes de fuel. Pour accomplir cette tâche, il sera nécessaire de dresser la carte de localisation de ces galettes et autres dépôts, pour évaluer leur toxicité et leur persistance, ainsi que de trouver la meilleure technologie de nettoyage disponible. Les résultats permettront d'évaluer le ratio coûts/bénéfices d'une vaste opération de nettoyage :
- La création d'une base de données ;
- La re-introduction et la protection de la *Posidonia oceanica* ;
- La mise au point d'un plan de contrôle à long –terme.

Pour réaliser l'intervention de restauration, en accord avec la législation italienne (Loi 471/99), il est nécessaire de mettre au point :

- Un plan de représentation :
 - a. Rassemblement des données existantes sur le sujet
 - b. Représentation du site

- Un projet initial :
 - a. Analyse des concentration en polluant
 - b. Sélection des technologies adéquates
 - c. Evaluation de la compatibilité environnementale de l'intervention
 - d. Tests visant à vérifier l'efficacité de l'intervention proposée

- Projet définitif :

- a. Plan détaillé du travail envisagé et coûts relatifs

- b. Plan de contrôle et de surveillance *Post-operam* En guise de première mesure, le comité établi par l'accord entre le Conseil Régional de Ligurie, l'ICRAM et le Ministère italien de l'Environnement a décidé de procéder au nettoyage des résidus liquides de pétrole présents dans la partie principale de l'épave. La tâche, d'après la structure mentionnée quelques lignes auparavant, parmi d'autres actions, prévoit une inspection détaillée de l'épave, qui vient récemment de faire l'objet d'un appel d'offres, cela principalement à cause des dimensions spacieuses de la structure interne de l'épave, de l'emplacement des citernes de stockage de fuel dans le double fond, de la turbidité de l'eau à l'intérieur des compartiments clos ainsi que dans la profondeur. Des technologies et des méthodologies appropriées doivent être développées et testées au cours de cette phase. Par ailleurs, des études supplémentaires seront nécessaires pour procéder convenablement au nettoyage de l'épave.

Références

¹R.E.M.P.E.C., 1991. M.T. « Haven » Rapport. Document d'information soumis par le REMPEC. Mai, 13 pp.

²Medugno M., 1992. L'Italia e l'inquinamento marino da idrocarburi. *Ambiente Risorse Salute*, **1**, n°1, January, 26-29.

³Fresi E., 1992. V.I.A. per il caso Haven. *VIA*, **VI**, n°24, December, 89-96.

⁴Volterra L., 1992. Inquinamento da petrolio. Parte I: danni ed effetti ambientali, rimozione naturale. *Ambiente Risorse salute*, **6**, n°6, June, 7-12.

⁵A.T.I. ENI-IRI, 1991a. Programma 3A, Repilogo sommario operazioni.

⁶A.T.I. ENI-IRI, 1991b. Programma 5A, Repilogo sommario operazioni.

⁷Aquater S.P.A. Bonifica S.P.A. Valutazione dei danni connessi all'incidente occorso alla M/C Haven nelle acque antistanti Genova. Stato di Avanzamento dei Lavori. Marzo 1993.

⁸Persiani L., 1992. Projet d'effacement des dommages causés à l'environnement par l'accident du M/C Haven. Réunions de la CONCAWE/DGMK Séminaire Scientifique "Remédiation aux déversements d'hydrocarbures", 18-21 Mai, 1992, Hambourg, Allemagne, pp. 171-182.

⁹Morucci C., Amato E., Caligiore A., Rallo F., 2002. Accident du super pétrolier Haven: Etude et récupération du pétrole lourd immergé soumis à combustion. Réunions de l'Organisation Maritime Internationale. Troisième Forum sur la Recherche & le Développement concernant le traitement d'un déversement d'hydrocarbures de grande densité, 11-13 Mars, Brest (F). PP 410-414.

¹⁰Amato E., Ausili A., Pellegrini D., Ciuffa G., Morlino R., Savelli F., 1993. Expérience concernant la marée noire causée par le super pétrolier « Haven »: Présence de HAPs dans les

organismes marins. Réunions de la conférence internationale “Clean seas ‘93”. Malte, Novembre, 1993.

¹¹Amato E., Ausili A., Gianni A., Vacchi M., 2002. Résidus de pétrole lourd immergés soumis à un écosystème bathyale. Réunions de l' Organisation Maritime Internationale Troisième Forum sur la Recherche & le Développement concernant le traitement d'un déversement d'hydrocarbures de grande densité, 11-13 Mars, Brest (F). PP 178-188.

¹²Pietrapiana D., Modena M., Guidetti P., Falugi C., Vacchi M., 2002. Evaluation des dommages génotoxiques et de la modification du tissu hépatique chez les espèces démersales de poissons: une étude cas en mer Ligurienne (Nord-ouest de la Méditerranée). Bulletin sur la Pollution Marine, 44, PP 238-243.

¹³Viarengo A. et al., 2001. Valutazione dell'inquinamento chimico prodotto dall'affondamento della m/n Haven lungo la costa ligure mediante l'utilizzo di bioindicatori. Relazione Finale per l'Assessorato Ambiente della Regione Liguria. 70 pages.

¹⁴Amato E. and G, Notarbartolo di Sciara, 1999. Relazione tecnica “Il sinistro Haven, interventi di bonifica”, 31 may 1999, 17 pp.

Biographie de l'auteur

Dr. Ezio amato

Maîtrise en Sciences naturelles, assemblages benthiques.

Chercheur à l'ICRAM depuis 1987 en tant que scientifique en chef, il a coordonné l'équipe chargée d'évaluer l'impact et les dommages environnementaux. Son expérience dans ce domaine inclut l'évaluation environnementale des pollutions chimiques et pétrolières en mer, des naufrages et du déversement d'armes conventionnelles et chimiques.