



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE
ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Séminaire du programme LITEAU
« Gestion du Littoral »

Thème 7
Gestion d'une pollution accidentelle sur le littoral

* * *

MEDD
20, avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP

20-22 janvier 2003

* * *



Paris, le 1 mars 2000

DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ADMINISTRATION
ET DU DÉVELOPPEMENT

SERVICE DE LA RECHERCHE ET DES
AFFAIRES ÉCONOMIQUES

Affaire suivie par : Michel ROBERT
Ligne directe : 01.42.19.17.84

LITEAU

Suite du Naufrage de l'Erika

Appel à propositions complémentaire

L'appel à propositions LITEAU est clos le 3 mars 2000.

Nous attirons votre attention sur le fait que les structures du programme sont susceptibles de servir de cadre à la réception et au financement des synthèses et des recherches finalisées concernant les suites de l'ERIKA et les impacts de la marée noire.

Il vous est donc possible d'adresser des projets sur ce sujet jusqu'au 31 Mars.

Cela concernera particulièrement :

- les conséquences écologiques,
- les conséquences écotoxicologiques,
- les conséquences économiques,
- les moyens de réhabilitation.
- les aspects sanitaires

Afin de faciliter les réponses dans les délais impartis, les lettres d'intention seront également acceptées et prises en compte. Les projets et lettres d'intention seront évalués par les conseils scientifiques des différents programmes de recherches du Ministère (Liteau mais aussi Pnetox, Piree ...)

Pour les aspects sanitaires nous rappelons que vous pouvez également répondre à l'appel à proposition santé environnement (clos le 15 avril)

Site internet: www.environnement.gouv.fr



SERVICE DE LA RECHERCHE ET DE LA PROSPECTIVE

Affaire suivie par : Michel ROBERT

Le Programme de recherche
« Gestion durable du littoral »
LITEAU 2000 - 2003

Première Synthèse
à la suite du Séminaire d'Arcachon 21-23 mai 2001

Dans l'ensemble de la problématique scientifique sur les "eaux marines", le Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement a fait le choix de mettre la priorité sur l'étude du littoral qui constitue la zone d'interface la plus fragile où les enjeux de durabilité sont les plus importants.

Le programme de recherche sur la gestion durable du littoral a été lancé en 1999 par le ministère pour une durée de 5 ans. Il a donné lieu à un financement incitatif d'environ 3 millions d'Euros (soit un investissement total de l'ordre de 10 millions) dont 1 million d'Euros consacrés à approfondir les conséquences d'une pollution accidentelle sur le littoral (suites de l'Erika). Il s'insère dans le dispositif national de recherche sur le milieu marin, en complétant en particulier le programme national d'environnement côtier (PNEC) qui rassemble l'INSU, l'IFREMER et l'IRD.

La caractéristique essentielle de Liteau est d'être un programme de recherche finalisée dont les objectifs et la problématique, définis dans les appels à proposition sont basés sur les besoins des gestionnaire du littoral. Un séminaire scientifique, tenu à la station Marine d'Arcachon du 21 au 23 mai 2001, a permis à la fois de lancer le programme et de faire un premier bilan sur les recherches en cours.

La présente note donne les grandes lignes des premiers enseignements tirés, autour des sept thèmes finalisés retenus.

1) Le premier thème (5 projets) concerne la gestion des apports et la maîtrise de leurs impacts sur le milieu marin.

Ce thème couvre les contaminants chimiques (éléments traces polluants organiques dont les dioxines), les éléments nutritifs en excès qui provoquent l'eutrophisation des milieux littoraux avec les développement algaires nuisibles ou toxiques, ainsi que les apports de sédiments avec en particulier le fonctionnement des bouchons vaseux des estuaires.

Plusieurs sites ateliers font l'objet de recherches :

- l'embouchure de la Seine avec une intégration des programmes poursuivis sur le fleuve (PIREN Seine, Seine aval, baie de Seine), et en particulier une mise en phase des modèles définis dans ces programmes ;
- le littoral d'un autre grand fleuve, la Garonne avec l'étude spécifique de l'estuaire de la Gironde ; par le biais de ce projet, le programme GIS-Ecobag participe au programme Liteau ;
- le Bassin d'Arcachon et la Bretagne, le littoral Breton étant évidemment plus concerné par les apports de nutriments du bassin versant et l'approche par modélisation.

Un projet permettra d'avoir une vision d'ensemble du littoral français et des apports fluviaux à l'interface continent, - océan et de fournir des éléments de synthèse pour les grandes conventions internationales (Barcelone, Oslo, Paris).

Pour la majorité des projets, il s'agit de synthétiser des données obtenues dans d'autres programmes, en faisant tourner et en affirmant des modèles. Des données nouvelles sont obtenues sur la contamination notable des moules et des huîtres.

2) Le thème pollution microbiologique (3 projets)

Ce volet constitue en réalité un sous-thème de la gestion des apports, mais il est distingué car il a sa propre cohérence scientifique et correspond à une problématique spécifique vis-à-vis des risques pour l'homme. Ce thème est marqué par un nouveau développement méthodologique avec l'introduction des méthodes issues de la biologie moléculaire ; on note aussi les coopérations avec les services hospitaliers. Un nouveau champ est ouvert pour la reconnaissance et le suivi des pathogènes : bactéries, virus, cryptosporidium et non plus le seul suivi d'*Escherichia coli* comme c'est souvent le cas.

Les 3 projets prennent en compte aussi bien l'Atlantique, la Méditerranée que le littoral de Guyane avec ses conditions tropicales spécifiques. La détection dans les eaux en particulier les eaux pluviales ou celles provenant des stations d'épuration, est axée vers la recherche d'une méthode de détection rapide et quantitative .

Des études spécifiques sont réalisées sur les coquillages qui constituent la principale voie de contamination alimentaire pour l'homme.

3) La gestion du trait de côte et de la zone intertidale (3 projets)

Les projets, concentrés sur le littoral méditerranéen avec des extensions possibles (Dunkerque), expérimentent des nouvelles méthodologies "plus douces" d'aménagement qui concernent par exemple la gestion des plages sableuses, l'utilisation des barres sédimentaires qui peuvent jouer le rôle de brise-lames. L'impact des ouvrages sera modélisé.

4) Gestion des écosystèmes sensibles (6 projets).

Il s'agit en général d'écosystèmes riches mais convoités : nourriceries (Manche orientale) soumises aux flux de pollution (éléments traces bioaccumulés), et espèces amphihalines ou migratrices (étang du Vaccarès) soumises aux variations de salinité. Les peuplements de substrats durs en Méditerranée (spongiaires, gorgones, bryozoaires) ont à la fois une importance emblématique et peuvent constituer des bioindicateurs des changements (en particulier climatiques).

Un projet porte sur une espèce invasive, la crépidule, dont la prolifération en Manche et Atlantique pose des problèmes socio-économiques : sur la base de l'étude des facteurs de prolifération, il devrait fournir un modèle spatialisé de développement des populations et une évaluation des effets. On doit noter que d'autres recherches sur les espèces invasives marines sont menées dans un autre programme du ministère sur les invasions marines.

Un travail de synthèse sur les connaissances nécessaires pour la préservation du littoral est réalisé, en se focalisant sur 3 façades et avec l'objectif de publier un guide méthodologique sur les critères et les modes de préservation.

5) Réhabilitation et dragages (3 projets)

La création de ce thème spécifique est justifiée par l'importance que revêt le problème du devenir des sédiments des estuaires ou des ports. L'évolution des législations implique de bien connaître les modalités et les impacts des rejets et de mettre au point des solutions alternatives au rejet .

Des approches in situ sont réalisées qui doivent permettre de caler des modèles. Les approches écotoxicologiques sont réalisées dans un autre programme du ministère (PNETOX), les approches écologiques devant encore être développées dans le futur.

6) Gestion des usages (4 projets)

Ce thème rassemble 4 projets socio-économiques consacrés aux politiques d'aménagement, à la gestion des espaces protégés où à certains usages récréatifs. Si on constate une grande diversité des sujets traités, l'objectif commun est d'apporter des outils d'aide à la gestion.

7) Gestion d'une pollution accidentelle sur le littoral (8 projets)

Ce thème a fait l'objet d'un appel à proposition spécifique en application des décisions du CIADT de Nantes de février 2000 sur la marée noire liée au naufrage de l'Erika .

Les recherches concernent d'une part la dynamique du polluant et son devenir (biodégradation), et d'autre part son impact sur les espèces (moules, poissons, oiseaux) ou d'une manière plus globale sur l'écosystème marin. Certaines conséquences économiques (pêche à pied) sont également évaluées.

Les recherches lancées sont complémentaires de la mise en place du réseau de suivi, et l'ensemble a fait l'objet d'un colloque le 6 novembre 2001 à Nantes.

LISTE DES PROJETS LITEAU-ERIKA

TITRE	Organisme	Chef de projet
Proposition de recherche concernant les effets de la marée noire de l'Erika sur les pertes d'aménités des résidents : le cas de la pêche à pied	INRA - RENNES	Pierre RAINELLI
Dégradation bactérienne d'hydrocarbures : Evaluation des capacités de dégradation des communautés présentes dans les tapis microbiens	Université de PAU	Robert DURAN
Evaluation des effets à moyen terme de la marée noire due au naufrage de l'Erika, sur l'écosystème marin de la zone intertidale atlantique de la région du Croisic	Institut Océanographique	Jean-François PAVILLON
Caractérisation , toxicité et bioaccumulation dans les moules des composés aromatiques du fioul de l'Erika	Université de BORDEAUX 1	Philippe GARRIGUES
Extension géographique de l'impact de la marée noire de l'Erika sur les oiseaux marins : approche génétique de l'origine des Guillemot de Troil échoués sur les côtes françaises	Université de PARIS VI	Thierry BOULIGNIER
Approche des risques sanitaires par l'étude du transfert de la contamination et de la toxicité des polluants de l'Erika par la voie alimentaire	Université de METZ	Paule VASSEUR
Evaluation du potentiel d'un modèle hydrodynamique 3D (mars3d) pour la prévision de dérive des hydrocarbures par rapport au modèle opérationnel MOTHY	IFREMER	Lionel LOUBERSAC
Impact de la pollution aux hydrocarbures sur l'écophysiologie et la pathologie des bivalves d'intérêt commercial (côte atlantique)	IFREMER	Philippe GOULLETQUER

EVALUATION DES DOMMAGES DES MAREES NOIRES : UNE ILLUSTRATION A PARTIR DU CAS DE L'*ERIKA* ET DES PERTES D'AGREMENT DES RESIDENTS

FRANÇOIS BONNIEUX ET PIERRE RAINELLI*

(Article à paraître dans Economie et Statistique)

L'évaluation économique des conséquences des marées noires a fait l'objet d'études couvrant des champs différents en raison des moyens déployés, du lieu de la catastrophe et de l'état des connaissances. Pour schématiser, on peut se référer en premier lieu à la marée noire de *l'Amoco Cadiz* en 1978 où les travaux étaient centrées sur les pertes de caractère monétaire. L'estimation des dommages non-marchands n'a pas fait l'objet de développements conséquents, compte tenu d'un certain nombre de difficultés théoriques et aussi de fortes réticences quant à ce type d'approche, surtout en France. A l'inverse, le naufrage de *l'Exxon Valdez* en Alaska, 11 ans après, a donné lieu à d'importantes recherches sur les dommages subis par le milieu naturel. Cela s'explique à la fois par les conditions locales, une zone à faible activité économique mais très riche du point de vue écologique, et aussi par la l'existence en cette période d'un cadre théorique plus pertinent. Ces recherches se sont d'ailleurs traduites par un certain nombre d'avancées méthodologiques, notamment quant à la notion de valeur d'existence et l'utilisation de la méthode d'évaluation contingente.

Les dommages du naufrage de *l'Erika* ont été relativement limités dans le temps mais ont touché un littoral très peuplé et proche d'une agglomération importante, celle de Nantes. Les **pertes d'agrément** de la population locale ont donc représenté une proportion beaucoup plus importante de l'ensemble des dommages subis que dans le cas des autres marées noires. Les efforts d'évaluation ont, en conséquence, porté prioritairement sur les atteintes subies par les habitants dans leurs loisirs, principalement la pêche à pied qui est une activité très pratiquée sur ce littoral.

Deux enquêtes auprès de la population du littoral touché par la pollution et de celle de Nantes ont permis d'évaluer les effets de la marée noire sur la pratique de la pêche à pied au cours du semestre qui a suivi le naufrage. La majorité des pêcheurs à pied a abandonné cette activité. Dans trois cas sur quatre, d'autres activités de plein air, la promenade en particulier, ont alors remplacé la pêche à pied. Les pertes des pêcheurs qui ont abandonné la pêche à pied sans activité de remplacement sont évaluées sur la base du surplus économique dégagé par cette activité en période normale. Pour ceux qui ont abandonné la pêche mais se sont tournés vers une autre activité de plein air, les dommages sont obtenus en comparant les surplus de ces deux activités.

La synthèse des données spécifiques recueillies après la marée noire auprès de la population touchée et de données d'autres enquêtes aboutit à une évaluation des dommages proche de 100 millions d'euros, valeur du même ordre de grandeur que les dépenses de nettoyage et de restauration. Ce résultat montre l'importance des **pertes d'agrément**, une catégorie que l'on peut qualifier « d'orpheline », dans la mesure où ces dommages n'ouvrent pas de droit à réparation. Cette évaluation participe donc à la prise de conscience quant à l'importance des pertes d'agrément dans l'ensemble des coûts sociaux des marées noires.

Dans la série des grandes marées noires, celle du *Prestige* demande probablement une approche beaucoup plus large que celle développée pour l'Amoco Cadiz, l'Exxon Valdez ou l'Erika. En effet, on a une pollution transfrontalière touchant le littoral atlantique sur un très grand linéaire avec des zones de nature très variée ce qui signifie des dommages marchands et non marchands touchant à des pertes en termes de valeurs d'usage et de valeurs de non-usage. Pour mener à bien une estimation il conviendrait de mettre en œuvre des moyens d'un tout autre ordre avec peut être un essai d'évaluation au plan européen afin de connaître le concernement des populations face à une catastrophe de cette ampleur.

BIBLIOGRAPHIE

Appéré G. (2002), *Analyse économique des comportements face à un risque sanitaire : le cas de la pêche récréative de coquillages*, thèse, Université de Bretagne occidentale, 28 juin 2002, Brest.

Appéré G. et Bonnioux F. (2002), « Analyse du comportement face à un risque sanitaire : cas de la consommation non marchande de coquillages », document de travail, Inra, Rennes.

Amigues J.-P., Bonnioux F., Le Goffe P. et Point P. (1995), *Valorisation des usages de l'eau*, Economica, Paris.

Arrow K., Solow R., Portney P.R., Leamer E.E., Radner R. et Schuman H. (1993), « Report of the NOAA Panel on Contingent Valuation », *Federal Register*, 58, January, 15: 1601-1614.

Bonnioux F., Daucé P. et Rainelli P. (1980), *Impacts socio-économiques de la marée noire provenant de l'Amoco Cadiz*, Rennes, Inra-UVLOE, rapport et annexes.

Bonnioux F. et Guerrier C. (1992), « Rapport sur la fréquentation de la forêt de Rennes », document de travail, Inra, Rennes.

Bonnioux F., Le Goffe P. et Vermersch D. (1995), « La méthode d'évaluation contingente : application à la qualité des eaux littorales », *Économie et Prévision*, n° 117-118, pp. 89-106.

Bonnioux F. et Rainelli P. (1991), *Catastrophe écologique et dommages économiques : problèmes d'évaluation à partir de l'Amoco Cadiz*, Inra, Economica, Paris.

Bonnioux F. et Rainelli P. (1993), « Learning from the Amoco Cadiz Oil Spill: Damage Valuation and Court's Ruling », *Industrial and Environmental Crisis Quarterly*, 7: 167-188.

Bonnieux F. et Rainelli P. (2001), « L'évaluation des pertes d'aménité des pêcheurs à pied suite au naufrage de l'Erika », colloque Erika, Ifremer, Nantes, 6 novembre 2001.

Bonnieux F. et Vermersch D. (1993), « Bénéfices et coûts de la protection de l'eau : application de l'approche contingente à la pêche sportive », *Revue d'Économie Politique*, n° 103, pp. 131-152.

Clawson M. (1959), *Methods of Measuring Demand for and Value of Outdoor Recreation*, Reprint n° 10, Resources for the Future, Washington D.C.

Clawson M. et Knetsch J.L. (1966), *Economics of Outdoor Recreation*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Garrod G. et Willis K. (1999), *Economic Valuation of the Environment: Methods and Case Studies*, Edward Elgar, Cheltenham UK.

Haab T. et McConnell K. (2002), *Valuing Environmental and Natural Resources*, Edward Elgar, Cheltenham UK.

HM Treasury (1991), *Economic Appraisal in Central Government: a Technical Guide for Government Departments*, HMSO, London.

Le Goffe P. (1999), « Évaluation des politiques d'assainissement en zone littorale : analyse coûts-bénéfices appliquée au cas de la rade de Brest », in P. Point (éd.) *La valeur économique des hydrosystèmes : méthodes et modèles d'évaluation des services délivrés*, Economica, Paris, pp. 63-79.

Loomis J.B. (1997), *Recreation Economic Decisions: Comparing Benefits and Costs*, Venture Publishing Inc., State College, Pennsylvania.

Mäler K.G. (1974), *Environmental Economics: a Theoretical Inquiry*, Johns Hopkins University Press, Baltimore.

NOAA (1983), *Assessing the Social Costs of Oil Spills: the Amoco-Cadiz Case Study*, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration.

Randall A. (1997), « The NOAA Panel Report: a New Beginning or the End of an Era », *American Journal of Agricultural Economics*, 79: 1489-1494.

Rainelli P. (2001), « La problématique des transferts dans l'évaluation des changements dans les services fournis par les hydrosystèmes », séminaire, Direction de l'Eau (MATE) et Inra, 21 décembre 2001, Paris.

Rosenberger R. et Loomis J.B. (2000), « Using Meta-Analysis for Benefit Transfer: in Sample Convergent Validity Tests for Outdoor Recreation Database », *Water Resources Research*, 36: 1097-1107.

Smith K. (1991), « Household Production Functions and Environmental Benefit Estimation », in Braden et Koldstad (eds.) *Measuring the Demand for Environmental Quality*, North Holland, Amsterdam, pp. 41-76.

Trice A.H. et Wood S.E. (1958), « Measurement of Recreational Benefits », *Land Economics*, 34: 195-207.

United States District Court for the Northern District of Illinois Eastern Division (1988), in *Re Oil Spill by the « Amoco Cadiz » off the Coast of France on March 16, 1978*.

Ward K.M. et Duffield J.W. (1982), *Natural Resources Damages: Law and Economics*, Wiley.

DEGRADATION BACTERIENNE D'HYDROCARBURES : EVALUATION DES CAPACITES DE DEGRADATION DES COMMUNAUTES PRESENTES DANS LES TAPIS MICROBIENS

Robert DURAN¹, Aude FOURÇANS¹, Sophie BLANCHARD¹, Hélène BUDZINSKI²,
Marisol GOÑI¹, Rémi GUYONEAUD¹, Pierre CAUMETTE¹

¹Laboratoire d'Ecologie Moléculaire, Université de Pau ; ²Laboratoire de Physico- et toxico-Chimie des systèmes Naturels, Université Bordeaux I

Les tapis microbiens photosynthétiques se développent à l'interface eau-sédiment dans les environnements peu profonds tels que les estuaires, les lagunes, les plages sablonneuses abritées, les marais salants. La plupart de ces tapis sont constitués de couches horizontalement stratifiées comportant différents types des micro-organismes distribués, selon leur physiologie, le long de microgradients verticaux d'oxygène, de sulfure et de lumière. Généralement, il s'agit respectivement de Cyanobactéries, bactéries phototrophes anoxygènes, bactéries chimiolithotrophes sulfo-oxydantes et de bactéries sulfato-réductrices. Les microorganismes hétérotrophes aérobies et les bactéries fermentatives jouent également un rôle important au niveau fonctionnel, ils réalisent les étapes préliminaires de la dégradation de la matière organique. Ainsi, comme production et consommation de matière organique ne sont séparés que de quelques microns à quelques millimètres, les tapis microbiens présentent un énorme potentiel métabolique pouvant être exploité pour des processus de bio-réhabilitation.

Les tapis bactériens ont été bien documentés et intensivement étudiés à différents endroits géographiques. Toutefois, des études supplémentaires de biodiversité sont nécessaires afin de comprendre comment les divers micro-organismes coexistent au sein des tapis. Des études récentes ont prouvé que de tels tapis ont joué un rôle significatif dans la bio-réhabilitation des zones côtières du Golfe Arabe polluées par le pétrole pendant la guerre du Golfe de 1991. Les tapis microbiens ont rapidement couvert des domaines entiers de sédiments pollués par les hydrocarbures et leur dégradation a été réalisée en quelques mois. De tels systèmes de tapis microbiens sont susceptibles de jouer un rôle de plus en plus important dans la gestion efficace des écosystèmes côtiers, notamment lors de déversements accidentels de pétrole dans ces environnements sensibles. Cependant leurs rôles dans la bio-réhabilitation des sédiments pollués par les produits pétroliers est actuellement inconnu.

Le principal objectif de ce projet de recherche est d'évaluer les capacités de dégradation d'hydrocarbures par les communautés bactériennes composant les tapis bactériens. Dans cette perspective, nous avons développé notre recherche selon trois axes principaux : (1) dégradation du pétrole par des tapis microbiens maintenus en microcosmes au laboratoire ; (2) étude du comportement et suivi de l'évolution des communautés bactériennes présentes ; (3) isolement et caractérisation de souches bactériennes aérobies et anaérobies intervenant dans la dégradation des hydrocarbures.

Les résultats de nos travaux devraient donc permettre d'évaluer le rôle des communautés bactériennes présentes dans les tapis microbiens dans les processus de biodégradation et de bio-transformation d'hydrocarbures. Les études menées devraient tout particulièrement permettre d'évaluer la possibilité d'utilisation de tapis microbiens dans des procédés de bio-réhabilitation des sites pollués par des composés dérivés du pétrole.

Des échantillons de tapis bactériens de Camargue et des salins de Guérande sont maintenus en microcosmes au Laboratoire d'Ecologie Moléculaire. Ces échantillons ont été contaminés par différents types de pétroles, un pétrole léger (Casablanca), un pétrole lourd riche en sulfure (Maya), et le pétrole de l'Erika. La dégradation du pétrole et la variation de la biodiversité bactériennes ont été analysées.

Après plusieurs mois d'incubation en présence de pétrole, les tapis microbiens maintenus en microcosme semblent avoir un aspect sain, une couche verte dense de cyanobactéries recouvre leur surface. Macroscopiquement, les tapis apparaissent comme ils étaient avant la contamination d'hydrocarbures.

Analyses de la biodiversité Les études de biodiversité basées sur l'analyse des gènes codant pour les ARN ribosomiques réalisées par T-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism) ont permis de suivre les variations dans la structure des communautés bactériennes du tapis.

L'analyse réalisée sur l'ensemble des micro-organismes (amorces universelles) révélé que les communautés microbiennes s'adaptent aux nouvelles conditions : couche d'hydrocarbures opaque et dense, différentes sources de carbone, etc.... Les populations majoritaires présentes avant la pollution ne sont plus les mêmes 252 jours après. Ce changement fondamental traduit la mise en place de métabolismes différents en adaptation à ce stress. Il est important ici de considérer que le système ne retrouve pas sa structure originelle après 252 jours d'incubation en présence d'hydrocarbures. Ce temps (T252) correspondant à 8 mois paraît trop court pour ce type d'étude de contaminations. Une autre hypothèse, restant à tester, est de savoir si la structure des communautés bactérienne de ce tapis sera ou non réellement restaurée à son état d'origine après un tel stress environnemental.

L'analyse de la biodiversité des bactéries sulfato-réductrices (BSR) à l'aide d'amorces spécifiques a également montré une modification de la structure de ces communautés. Toutefois ces modifications semblent moins importantes suggérant que les communautés de BSR réagissent plus lentement aux modifications.

Une méthode d'analyse de la biodiversité des gènes codant pour les dioxygénases (gènes codant pour des enzymes impliquées dans la dégradation d'hydrocarbures aromatiques) a été mise au point. Les premiers résultats montrent une grande diversité de ces gènes au sein des tapis microbiens étudiés. Cette biodiversité varie également avec le temps d'incubation en présence de pétrole.

Dégradation du pétrole Les analyses qualitatives de la contamination avec le pétrole ont montré une légère dégradation des alcanes entre le jour de la contamination et 40 jours plus tard. Une diminution lente des taux de C17/pristane et de C18/phytane a été observée après 12 jours d'incubations tandis que le témoin pétrole abiotique demeurait au même niveau. Pour ce qui concerne les composés aromatiques, les taux de phénanthrène/méthyl phénanthrène ont diminué considérablement après la contamination, tandis que le taux de dibenzothiophène/méthyl dibenzothiophène est resté inchangé. Les analyses quantitatives des modifications du pétrole brut seront intéressantes pour déterminer le vrai rôle des tapis dans la biodégradation.

Analyse de consortium bactériens capable de dégrader les hydrocarbures et isolement de souches La caractérisation des différentes communautés anaérobies se développant sur trois hydrocarbures s'est effectuée en alliant les techniques d'enrichissement et d'isolement de la microbiologie classique des anaérobies et les techniques de biologie moléculaire. L'ensemble de ces outils a permis de montrer que la communauté sélectionnée sur octadécane est dominée par des bactéries phototrophes pourpres, de types *Chromatium*, *Rhodobium* et

Roseospira. Ces organismes peuvent avoir un métabolisme photoautotrophe même si les bactéries phototrophes non sulfureuses sont très souvent retrouvées dans des zones eutrophes ou elles recyclent les produits de dégradation de la matière organique. Outre ces organismes des bactéries sulfato-réductrices ainsi que des bactéries fermentatives sont présentes dans la communauté sélectionnée. Il semble d'après les premiers résultats que les taux de dégradation obtenus pour cette communauté soient supérieurs à ceux de souches pures.

Parmi les colonies sélectionnées sur octadécane, quelques-unes semblent pouvoir utiliser l'octadécane comme seul substrat. Ces souches réalisent les premières étapes de la dégradation qui sont les plus lentes. Par contre, la croissance sur l'acide correspondant, l'acide stéarique est très rapide et abouti à la production d'une importante biomasse. Il ne faut pas oublier que la dégradation de l'octadécane en aérobiose est beaucoup plus rapide. Au sein d'un tapis bactérien, la proximité entre les bactéries aérobies et les bactéries anaérobies est telle que les secondes peuvent, selon les variations des conditions du milieu, en fonction de l'alternance jour-nuit par exemple, bénéficier des produits du métabolisme des premières.

Ces résultats préliminaires montrent les capacités des tapis bactériens pour la dégradation d'hydrocarbures. L'étude des communautés bactériennes et leurs implications dans la biodégradation des hydrocarbures des différents pétroles est toujours en cours d'évaluation par différentes approches :

- Les études de biodiversité par T-RFLP sur les communautés totales via le gène codant pour l'ARNr 16S, et les genres sulfato-réducteur particuliers, seront complétées par l'analyse des bactéries phototrophes pourpres anoxygéniques en ciblant un gène métabolique spécifique *pufM*
- Afin d'évaluer la diversité et surtout le niveau d'expression des dioxygénases et autres enzymes impliquées dans la dégradation d'hydrocarbures des analyses par RFLP et RT-PCR sont en cours
- Les analyses quantitatives de la dégradation des pétroles bruts au cours du temps sont envisagées

Ces nouvelles données associées nous fourniront des informations plus précises sur le rôle des tapis microbiens dans la biodégradation du pétrole.

**IMPACT DE LA MAREE NOIRE, DUE AU NAUFRAGE DE L'ERIKA, SUR UN
ECOSYTEME MARIN DE LA COTE ATLANTIQUE
LES FLAQUES A COPEPODE TIGRIOPUS BREVICORNIS ET ENTEROMORPHA
INTESTINALIS DE LA POINTE DU CROISIC**

¹PAVILLON J.-F. , ²L. BODINEAU, ³F. DENIS, ⁴F. QUINIOU, FRANÇOISE, ²J.-F. BARTHE ; ⁴X. CASEY, ¹R. MENASRIA

¹ Institut océanographique : jf.pavillon@oceano.org

² Université des Sciences et technologies de Lille 1 : bodineau@ustl-univ.fr

³ Université du Mans : Francoise.Denis@univ-lemans.fr

⁴ Ifremer Brest Quiniou@ifremer.fr

L'Ecosystème des flaques à *Tigriopus brevicornis* et *Enteromorpha intestinalis* est situé à l'interface de l'étage mediolittoral et supralittoral des zones côtières rocheuses d'origine granitiques. Son fonctionnement est rythmé par le cycle des marées. Les influences terrestres et atmosphériques sont prépondérantes pendant les phases d'émersion qui peuvent atteindre 3 semaines, pour certaines flaques, selon leur situation par rapport à la hauteur des marées.

La région du Croisic a été l'une des plus touchée par la marée noire et le nettoyage de cette région s'est poursuivi pendant toute l'année 2000 et jusqu'en mai 2001.

Bien que le programme n'ait commencé qu'en juin 2001, soit 18 mois après le naufrage de l'Erika, des tests de toxicité pour le copépoде ont été effectués au laboratoire et des échantillons de fioul collectés à la pointe du Croisic analysés tous les trois mois depuis janvier 2000 (Pr. Oudot, MNHN).

2 flaques A et B ont servi de modèle à l'étude et comparées à une flaque C de référence située à Roscoff dans une région non soumise à la pollution de l'Erika. 7 missions de 5 jours (pour moitié au Croisic et pour moitié à Roscoff) se sont succédées au rythme d'une par trimestre. Selon un cycle de marée de 24 heures (2BM, 2PM), des prélèvements de copépodes, d'algues, d'eau de mer et de sédiment ont été effectués, température, salinité, oxygène, ph mesurés, sels minéraux, chlorophylle a, COP, COD et HAP analysés.

Dégradation du fioul au niveau de l'écosystème

Les flaques A et B ont été exposées au fioul de l'Erika. Lors du commencement du programme d'étude en juin 2001, et bien que l'environnement immédiat ait été nettoyé, des traces de fioul subsistaient dans les zones rocheuses. Les analyses de ce fioul, prélevé *in situ* de janvier 2000 à mars 2002, fortement incrusté dans la roche, ont montré une dégradation faible. Les composés légers du fluxant (C<20) ont été éliminés par évaporation, dissolution et biodégradation microbienne. Les plus lourds, majoritaires, n'ont pas évolué. Les enteromorphes des flaques étudiées, ont révélé la présence de fioul sur leurs thalles en mars 2000. Mais pas en juin 2000.

Connaissance de l'écosystème

Le fonctionnement de l'écosystème à *Tigriopus* et *Enteromorpha* s'est révélé comme un milieu extrême du aux phase d'émersion-immersion. Pendant les phases d'émersion de grandes variations des paramètres abiotiques : salinité (de 12g/l à 70g/l du fait de l'évaporation ou des

précipitations), pH (variations de quelques unités), température (pouvant aboutir au gel superficiel des flaques en hiver) sont constatés sous l'influence des paramètres atmosphériques. Zones de dépôt de grandes algues (*Pelvetia*, *Fucus*, *Chondrus*, *Palmaria*, *Laminaria*), lors des marées de fort coefficient, les flaques constituent de véritables réacteurs de décomposition de la matière organique en particulier en été et au mois de septembre.

Qualité des milieux

C'est le test normalisé : embryon d'huître qui a été appliqué. Les résultats obtenus sur des sédiments du Croisic prélevés en septembre 2001 n'ont révélé aucune toxicité. En ce qui concerne l'eau « de mer » des flaques les salinités variables, ont été ramenées à une salinité de référence de 35,2g/litre. Les premiers résultats indiquent l'incompatibilité de ce milieu avec le développement des embryons d'huître.

Genotoxicité

L'objectif des travaux est de rechercher l'existence d'une sélection ou de dérives génétiques d'une population naturelle de copépodes soumise à des conditions environnementales stressantes (due à la pollution, à des phénomènes naturels : sur-salure, variations de température etc...). Les deux populations prélevées au Croisic et à Roscoff sont étudiées en parallèle. Bien que l'analyse individuelle soit rendue difficile par la taille des animaux (800 à 1000µm) après différents essais il semble que l'électrophorèse sur gel d'acétate soit satisfaisante. 9 enzymes ont été testées, 6 se sont révélées positives et 4 d'entre elles la phosphoglucoisomérase (EC 5319), la glucose-6-phosphatase-déshydrogénase (EC 111 49), la malate-phosphatase-isomérase (EC 5318) et la Malate-déshydrogénase (EC 111 37) semblent polymorphes pour au moins une population de sites non pollués.

Dynamique de population des copépodes

Les *Tigriopus brevicornis* se reproduisent toute l'année sur les deux sites de Roscoff et du Croisic. Sans données fiables avant juin 2001, il est difficile d'évaluer les conséquences, de la marée noire, sur la dynamique de la population de copépodes du Croisic, qui s'est maintenue, et est plus abondante qu'à Roscoff (différence due à la latitude, au mode d'exposition). Les périodes de reproduction se situent principalement au printemps et en juin. Le recrutement dans chaque flaque est fortement dépendant de la marée. A une phase de développement de la population pendant les périodes d'émersion, malgré des variations de forte amplitude des paramètres abiotiques, succède une phase de dispersion entre les flaques de l'ensemble rocheux et de « pertes » vers la haute mer lors du recouvrement par les marées de fort coefficient. 224 échantillons ont été recueillis au cours des différentes missions, les stades naupliens, copépodites, mâles, femelles, femelles avec sacs d'œufs et couples, dénombrés. L'analyse des différentes population est en cours.

Croissance de l'algue

Des échantillons d'*Enteromorpha intestinalis* ont été prélevés, à chaque saison, sur une surface de 300 cm² et pesées. Les périodes de croissance intenses se situent au Printemps. Le développement de l'algue est plus important au Croisic qu'à Roscoff où les conditions semblent moins favorables.

Analyse des HAP dans les différents compartiments prélevés (eau, sédiment, copépode, enteromorphe), du COP et du COD est en partie effectuée.

A mi-parcours du programme, le nombre d'observations et de données sont importants et permet de mieux connaître l'écosystème. Des effets toxiques directs, sur les copépodes, de la marée noire ne sont pas démontrés. Cependant des expériences menées au laboratoire sur une chaîne alimentaire courte : copépode-crevette, semble indiquer que des crevettes *Palaemon serratus* nourries avec des copépodes *Tigriopus* contaminés après avoir été exposés au fioul et à des HAP montrent une altération de la glande digestive de la crevette.

4 missions en 2003 permettront d'achever le projet terrain et les 6 premiers mois 2004 de rédiger le rapport de fin de programme.

Publications

-Pavillon J.-F., L. Bodineau, F. Denis, F. Quiniou, J. Oudot : *Impact de la marée noire, due au naufrage de l'Erika sur l'écosystème marin à Tigriopus brevicornis (Copépode Harpacticoïde) et enteromorphe Enteromorpha intestinalis*. Colloque Erika – Ifremer Nantes – 6 novembre 2001

-Pavillon J.F, J. Oudot, A. Dlugon, E. Roger and G. Juhel : *Impact of the Erika oil spill on the Tigriopus brevicornis ecosystem at the Le Croisic headland (France): Preliminary observations*. J. Mar. Biol. Ass. UK (2002), 82, 409-413

-Pavillon J.-F., Reinert M., Bougeard M., Bodineau L., Lemaire S. *Bioaccumulation du fioul de l'Erika dans une chaîne alimentaire expérimentale courte : le copépode Tigriopus brevicornis (Müller) et un prédateur du copépode, la crevette Palaemon serratus (Pennant)*. Actes du colloque UOF-AFL Paris 9-12 septembre 2002 (soumis)

**ORIGINE DES OISEAUX MARINS TOUCHES PAR LA MAREE NOIRE DE L'ERIKA :
GENETIQUE DES POPULATIONS DU GUILLEMOT DE TROÏL ET
ECHELLE SPATIALE DE L'IMPACT ECOLOGIQUE**

Exposé présenté par: Claire TIRARD, Université Pierre & Marie Curie, Paris
(ctirard@snv.jussieu.fr)

Responsable du projet: Thierry BOULINIER
*Laboratoire d'Ecologie, CNRS-UMR 7625, Université Pierre et Marie Curie, 7 Quai St
Bernard, F-75005 Paris* (tboulini@snv.jussieu.fr)

Collaborateurs : Claire TIRARD (UPMC); Léa RIFFAUT (UPMC), Karen McCOY,
(Université de Queen's, Canada) et Vicki FRIESEN (Université de Queen's, Canada).

Suite au naufrage du pétrolier ERIKA en Décembre 1999, le nombre d'oiseaux mazoutés venus s'échouer sur les plages a été impressionnant (plus de 60 000). L'accident a eu lieu dans une zone importante pour l'hivernage de plusieurs espèces d'oiseaux marins des côtes européennes et ce sont les populations d'oiseaux d'une large zone géographique qui sont susceptibles d'avoir été affectées par tel événement.

Etant donné l'enjeu international de l'évaluation de l'impact écologique d'un tel accident, il nous a semblé important d'évaluer l'intérêt de l'utilisation de méthodes d'investigation modernes afin de déterminer l'échelle spatiale de cet impact. Dans ce contexte, nous présentons ici l'état d'avancement du travail de recherche que nous nous sommes proposé de réaliser sur le Guillemot de Troïl *Uria aalge*, espèce dont le plus grand nombre d'individus a été touché. Le but du travail était de tenter de déterminer (1) la localisation géographique des colonies d'origine des individus touchés par l'accident, et (2) l'importance des flux de dispersion entre colonies à différentes échelles, ce qui pourra nous renseigner sur les capacités de telles populations à revenir à des niveaux comparables à ceux précédent un accident du type de la marée noire. Dans un même temps, un objectif était donc d'évaluer la possibilité d'utiliser les techniques de génétique des populations pour répondre à ces questions dans le cas d'accidents comparables.

Le travail conduit repose sur des analyses génétiques qui sont réalisées à partir d'échantillons d'oiseaux échoués et d'échantillons prélevés sur les colonies de reproduction. Il implique des collaborations au niveau national, mais aussi international. Les premiers résultats, obtenus par l'analyse de marqueurs microsatellites sur des échantillons provenant de 15 colonies reproductrices du Guillemot de Troïl en Europe du Nord, suggèrent une très faible structuration génétique des populations de cet oiseau à l'échelle considérée. Comme il a pu être vérifié en analysant l'ADN d'un échantillon d'oiseaux bagués récupérés suite au naufrage, un tel manque de structuration rend difficile la possibilité d'assigner statistiquement les individus à leur colonie reproductrice d'origine. Cette faible structuration génétique des populations suggère par ailleurs l'existence de flux de gènes entre les populations considérées.

Il faut souligner néanmoins que ces résultats sont préliminaires. Ils n'incluent notamment pas toutes les colonies échantillonnées.

Nous travaillons actuellement à compléter ces résultats par (1) l'analyse d'échantillons complémentaires et (2) la considération de données obtenues en utilisant d'autres marqueurs génétiques (travaux menés en collaboration directe avec l'équipe de Vicki FRIESEN, Université de Queen's). Nous voyons par ailleurs comment les informations produites par une telle étude peuvent être combinées aux approches de type démographique plus classiques menées par d'autres chercheurs à partir des oiseaux échoués et à partir de suivis menés sur les colonies de reproduction et en mer. Les résultats de la génétique des populations pourront de plus être comparés avec les résultats qui seront disponibles sur la structuration des populations d'autres espèces d'oiseaux marins.

D'un point de vue scientifique, les résultats qui sont en cours d'obtention sur la structuration génétique des populations de l'espèce considérée nous apportent des éléments importants pour comprendre le rôle potentiel de la dispersion des individus dans le fonctionnement des populations d'oiseaux marins et donc dans la gestion et la conservation de telles populations.

Du point de vue du gestionnaire, un premier résultat est qu'il sera sans doute difficile de pouvoir évaluer l'étendue géographique de l'impact d'une marée noire en utilisant principalement les données de la génétique des populations d'une espèce comme le Guillemot de Troïl. En revanche, dans l'état actuel des connaissances, la conservation d'échantillons de différentes espèces d'oiseaux échoués permettant une extraction ultérieure d'ADN est néanmoins à recommander (ceci est en particulier à considérer dans le contexte de l'accident du pétrolier 'Prestige' au large de la côte espagnole, où les espèces principalement touchées en termes d'effectifs sont le Petit pingouin *Alca torda*, le Guillemot de Troïl et le Macareux moine *Fratercula arctica*).

APPROCHE DES RISQUES SANITAIRES PAR ETUDE DU TRANSFERT DE LA CONTAMINATION ET DE LA TOXICITE DES POLLUANTS DE L'ERIKA PAR LA VOIE ALIMENTAIRE

S. CHATY¹, S. LEMIERE¹, C COSSU-LEGUILLE¹, F. RODIUS¹, A. BISPO², M.J. JOURDAIN², M.C. LANHERS³, D. BURNEL³ et P. VASSEUR¹

¹E.B.S.E. Univ. Metz, ²IRH Nancy, ³INSERM U 420 Nancy

Le transfert des polluants accumulés par les moules suite au naufrage de l'ERIKA est étudié chez le rat dans le but de rechercher si l'absorption de nourriture contaminée entraîne des effets chez les mammifères. Les objectifs sont également de cerner les seuils sans effet chez le consommateur des produits de la mer contaminés.

Les marqueurs étudiés ont été choisis de manière à identifier les effets génotoxiques éventuels d'une contamination par les HAPs (hydrocarbures polycycliques aromatiques), notamment les modifications de la structure de l'ADN et l'induction de l'expression de l'isoforme 1A1 du cytochrome P450 (CYP1A1).

L'intoxication des rats par voie alimentaire a été réalisée à l'aide de plusieurs lots de bivalves (*Mytilus* sp.) prélevés par les équipes de l'IFREMER de Nantes sur des zones plus ou moins impactées par la marée noire.

Les effets biochimiques, génotoxiques et génomiques sont étudiés chez le rat recevant quotidiennement, ou un jour sur deux, pendant 15 et 30 jours, une nourriture constituée de moules témoins ou contaminées. Les essais doivent permettre d'établir les niveaux de contamination des moules sans effet détectables chez le rat et d'identifier les indicateurs appropriés pour le contrôle des populations exposées.

La recherche comprend plusieurs volets :

1. analyse de la contamination de bivalves
2. étude de l'impact de la nourriture contaminée chez le rat, par mesures de :
 - génotoxicité au niveau du foie, de la moëlle osseuse, et du sang,
 - mise en évidence de l'induction d'une activité EROD, en tant que marqueur précoce de contamination par les HAPs et indicateur d'une biotransformation en métabolites réactifs,
 - mise en évidence de l'induction du gène de l'isoforme 1A1 du cytochrome P450.

La génotoxicité est étudiée au niveau tissulaire par la mise en évidence des altérations structurales de l'ADN par le test COMET (1,2) ou la recherche des micronoyaux (chez le rat). L'étude de l'expression de l'isoforme 1A1 du cytochrome P450 est réalisée par rétro-transcription des ARNm, suivie d'une amplification par PCR des ADNc à l'aide d'amorces de l'isoforme 1A1 (3).

Les HAPs présents dans les moules sont analysés par LC-MS.

L'étude préliminaire a permis d'optimiser les conditions expérimentales des intoxications alimentaires. Des effets de génotoxicité dose-dépendants ont été trouvés dans les hépatocytes, ainsi qu'une augmentation des transcrits du CYP1A1 en cas d'apport d'une nourriture constituée par les moules fortement contaminées (2500 µg/kg m.s.).

Deux séries d'expérimentation, chacune de 15 et 30 jours, ont été réalisées ensuite avec des lots de moules dont les taux en HAPs totaux encadraient la valeur guide fixée par l'AFSSA de 500 µg/kg de matières sèches dans les produits de la mer.

Les niveaux de contamination étudiés ont été les suivants :

- 0, 100 et 1200 µg/kg m.s. en HAPs totaux dans les moules lors de la première expérimentation, avec un apport de nourriture à base de moules, un jour sur deux pendant 15 et 30 jours,
- 0, 300, 500, 750 µg/kg m.s. en HAPs totaux dans les moules pour la seconde expérimentation, réalisée avec un apport de moules tous les jours.

Dans tous les cas, les rats ont été sacrifiés deux jours après le dernier repas de moules.

Les essais COMET ont mis en évidence des effets de génotoxicité significatifs au niveau du tissu hépatique chez les rats ayant reçu une nourriture dont le niveau de contamination est supérieur ou égal à 300 µg/kg m.s en HAPs totaux. Les effets sont dose-dépendants, mais n'augmentent pas avec la durée de l'expérimentation. Des altérations structurales de l'ADN sont également observées au niveau de la moëlle osseuse ; par contre, il n'y a pas de dommages au niveau des cellules sanguines nucléées.

La mesure des micronoyaux dans les cellules sanguines nucléées et les cellules de moëlle osseuse sont restés négatifs pour les concentrations de 100 et 1200 µg/kg de HAPs dans les moules. Les analyses sont en cours pour les autres modalités d'intoxication.

Aucune induction significative de l'expression du CYP1A1 n'a été observée au niveau hépatique, et aucune augmentation de l'activité EROD n'a été trouvée.

Les questions posées à l'issue de ces essais sont les suivantes :

1. est-ce que l'induction de l'expression du CYP1A1 et de l'activité EROD pourrait être transitoire et avoir lieu dans les premières phases de l'intoxication, avec un retour au niveau initial au 15^e et 30^e jour d'intoxication ? Ce qui expliquerait les résultats négatifs antérieurs.
2. quel est le degré de persistance des lésions génomiques : un retour à la normale est-il possible après l'arrêt de l'intoxication alimentaire ?

De nouvelles expérimentations ont été initiées pour répondre à ces questions. L'analyse des activités CYP1A1 est en cours. La mesure de la réversibilité éventuelle des dommages génomiques est programmée à la suite.

Références

1. Ostling O. et Johanson K.J., 1984. Microelectrophoretic study of radiation-induced DNA damage in individual mammalian cells. *Biochem. Biophysic. Res. Com.*, 123, 1, 291-298
2. Singh N.P., McCoy M.T., Tice R.R. et Schneider E.L., 1988. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Exp. Cell Res.*, 175, 184-191
3. Nelson D.R., Koymans L., Kamataki T., Stegeman J.J., Feyereisen R., Waxman D.J., Waterman M.R., Gotoh O., Coon M.J., Estabrook R.W., Gunsalus I.C. et Nebert D.W., 1996. P450 superfamily: update on new sequences, gene mapping, accession numbers and nomenclature. *Pharmacogenetics*, 6, 1-42

EVALUATION DU POTENTIEL DE MARS3D POUR LA PREVISION DE DERIVE D'HYDROCARBURES ET COMPARAISON AVEC MOTHY DANS LE CAS DE L'ERIKA

PASCAL LAZURE, MATHIEU JOUAN
IFREMER/DEL/AO
Centre de Brest, BP70, 29280 Plouzané-France

PIERRE DANIEL, PATRICK JOSSE
Météo-France,
Division Marine et Océanographie, 42 avenue Coriolis, 31057 Toulouse Cedex – France

Introduction

A Météo-France, la prévision de dérive de nappe de polluant est effectuée à l'aide d'un modèle spécifique, MOTHY, développé dans la division prévision marine et océanographie de Météo-France. MOTHY est un modèle d'océan qui calcule les courants de marée et les courants induits par le vent (les vents utilisés sont les vents prévus par les modèles météorologiques de prévision numérique). Ces courants sont utilisés pour calculer la dérive du polluant en prenant en compte les informations disponibles sur le produit. Le modèle est décrit en détail dans Daniel (1996). MOTHY peut être mis en œuvre 24 heures sur 24 par un prévisionniste marine à partir d'éléments fournis par les autorités en charge de la lutte.

Depuis environ 6 ans, IFREMER/DEL/AO développe un modèle hydrodynamique 3D de la façade atlantique (Lazure, Jégou, 1998). Ce modèle est destiné à représenter, de la manière la plus fidèle possible, le transport et le mélange des masses d'eau sur des échelles de temps variant de l'heure à la journée. Le modèle Mars3D est plus proche de l'état de l'art scientifique que ne peut l'être MOTHY. En effet, les contraintes liées à l'utilisation opérationnelle, notamment en ce qui concerne les délais de mise en œuvre, imposent des choix de modélisation plus simples.

L'objectif est ici d'étudier, sur des situations de l'Erika, les comportements respectifs du modèle MOTHY opérationnel à Météo-France et du modèle modèle MARS3D développé par IFREMER.

Le système MOTHY

Le système MOTHY est constitué d'un modèle d'océan, qui a été développé pour représenter le mieux possible le courant de surface, et d'un modèle de nappe. Le modèle d'océan est constitué d'un modèle 2D couplé à un modèle 1D.

Le modèle 2D utilise un schéma numérique aux différences finies en trois pas explicites fractionnés pour résoudre les équations de Saint Venant. Il est forcé par le vent, la pression atmosphérique et la marée. Près des côtes, le calcul est fait sur une grille de maille 1' imbriquée dans une grille de maille 5' qui couvre le Golfe de Gascogne et la Manche.

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.

La nappe d'hydrocarbures est considérée comme un ensemble de particules indépendantes qui dérivent en fonction du courant horizontal calculé précédemment. Le mouvement vertical est

déterminé par la flottabilité et la diffusion turbulente. La flottabilité dépend de la taille et de la densité des particules.

Le système est opérationnel depuis 1994. Il peut être activé 24h/24 par un prévisionniste marine. Il est activé régulièrement sur des situations réelles très diverses (localisation géographique, situation météorologique, caractéristiques du polluant...).

Le modèle MARS3D

Le modèle Mars3D a été développé à l'Ifremer. Ce modèle utilise un schéma numérique aux différences finies pour résoudre les équations primitives de la mécanique des fluides sous l'hypothèse hydrostatique. Les équations sont résolues en employant la technique de séparation des modes de surface (externe) et interne (Blumberg et Mellor, 1987). Un changement de coordonnées sur la verticale est opéré afin de considérer un nombre constant de niveaux et de mieux prendre en compte la bathymétrie.

La résolution verticale est de 15 niveaux avec un net raffinement près de la surface libre. Le modèle couvre la zone comprise entre les latitudes 43.83° et 49° nord et les longitudes 0.5° et 7° ouest

Ce modèle a eu plusieurs applications en biologie (production primaire) et en halieutique (recrutement des larves d'anchois). Sa version bidimensionnelle a également été utilisée pour traiter le cas du chimiquier « Ievoli Sun » en 2000.

MARS3D a été adapté pour la dérive d'éléments flottants peu miscibles dans l'eau de mer : La discrétisation vertical a été affinée et une description de la nappe directement inspirée de celle de MOTHY a été mise en place.

Simulations en mode hindcast

Un premier jeu de simulations a été réalisé en mode hindcast. Le fuel lourd est lâché au moment et à la position du naufrage de l'Erika, le 12 décembre 1999 à 09h utc. Les vents utilisés sont des vents produits par les analyses opérationnelles de Météo-France. Ces vents intègrent des observations et représentent une description bidimensionnelle réaliste de la situation météorologique. Les simulations sont poursuivies jusqu'à l'arrivée à la côte fin décembre.

La figure 1 présente le résultat de ces simulations pour le 24 décembre à 12h utc. Après 2 semaines de dérive, l'accord avec les observations aériennes semble satisfaisant et la chronologie du déplacement des nappes principales est correctement représentée.

L'étalement horizontal est légèrement plus important avec MOTHY et la tête des nappes est en avance de 5 à 10 nautiques par rapport à MARS3D. La cohérence entre les deux simulations reste cependant satisfaisante.

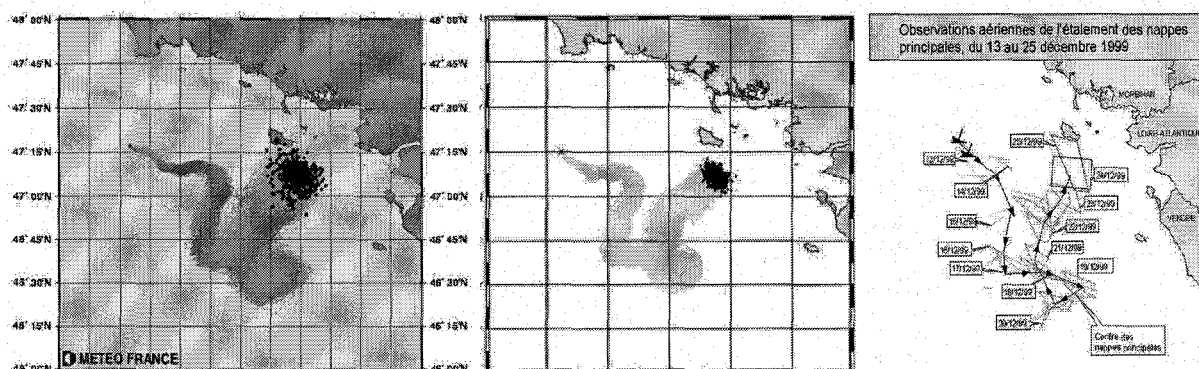


Fig. 1 : gauche et centre : Simulations MOTHY et MARS3D en mode analysé de la dérive des gouttes en surface. Les vents utilisés en forçage par le modèle de nappe sont des vents réanalysés. droite : synthèse des observations aériennes effectuées entre le 12 et le 25 décembre 1999 (source Cedre)

Simulations en mode prévision

Des simulations ont également été réalisées en mode prévision. Les vents utilisés sont alors des vents prévus à l'époque. On cherche ici à rejouer les prévisions opérationnelles dans les conditions où elles ont effectivement été réalisées. En particulier, on s'intéresse aux échéances prévues opérationnellement, typiquement quelques jours.

La figure 2 présente les prévisions à quatre jours réalisées à partir des observations du 21 décembre à 18h utc ainsi que la simulation analysée MARS3D correspondante (à droite). Il est à noter que MOTHY est utilisé dans sa version opérationnelle, en particulier avec une distribution de taille de gouttes (utilisées pour simuler les nappes de fuel) différente de celle de MARS3D. Seule la position des gouttes en tête de nappe (les plus rapides) est comparable entre les simulations.

La comparaison des deux simulations MARS3D, montre que les vents prévus étaient plus forts que les vents analysés. La dérive MOTHY, pourtant réalisée avec les mêmes vents prévus semble plus proche de la simulation MARS3D analysée. La différence de taille de gouttes vient en effet compenser la surestimation du vent prévu.

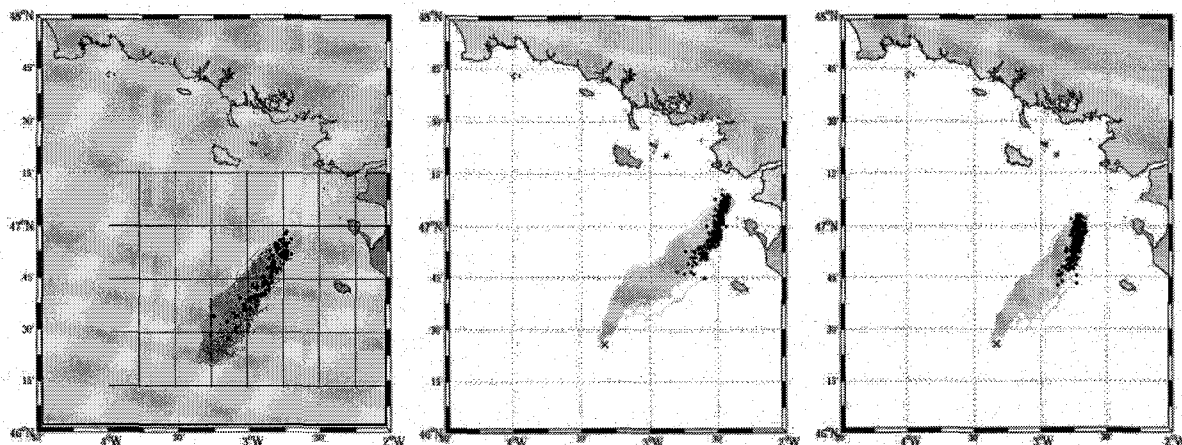


Fig. 2 : Simulations MOTHY (gauche) et MARS 3D (centre) en mode prévision et simulation MARS3D en mode analyse (droite)

Conclusion, perspectives opérationnelles

Malgré les incertitudes qui entourent les conditions initiales de la catastrophe, les simulations réalisées à l'aide du modèle 3D de l'Ifremer sont pour la plupart conformes à la réalité. A partir d'un formalisme relativement simple (représentation par particules), ce modèle décrit désormais la dérive d'hydrocarbures en mer de manière satisfaisante. Sa capacité à reproduire la structure tridimensionnelle du courant fut peu mise à contribution dans ce cas, car le fuel lourd de l'Erika s'est peu fragmenté malgré les conditions de tempête, et a peu plongé. On voit cependant néanmoins, à travers les derniers exemples, de nettes différences entre la trajectoire du pétrole en surface et celle des gouttes en suspension dans la

masse d'eau. Une perspective naturelle serait donc de réaliser le même type d'étude en choisissant des zones et des situations plus favorables à la mise en évidence de l'apport d'un modèle tridimensionnel. On peut par exemple envisager une étude comparée de MARS3D et du modèle opérationnel MOTHY dans la zone d'action du courant liguro-provençal en Méditerranée.

Un des intérêts de ce travail est d'offrir une validation des résultats du modèle grâce à de nouvelles méthodes qui permettront en outre d'étendre le champ d'application au domaine de la biologie, comme par exemple le suivi des algues flottantes.

Enfin, ce travail apporte également des éléments quant à une utilisation éventuelle d'un modèle PE tridimensionnel pour succéder à MOTHY : sur le cas de l'Erika, le modèle MARS 3D contraint par les forçages météo opérationnels utilisés pour MOTHY simule des trajectoires de dérive comparables à celles de l'outil opérationnel actuel. Cette conclusion demande à être étendue à d'autres zones géographiques et à d'autres situations météorologiques, mais elle constitue un premier pas encourageant.

Dans cette marche vers une utilisation opérationnelle, l'étape suivante pourra être de mener une comparaison systématique « sur la durée » des deux modèles, par exemple en réalisant une simulation MARS3D pour chaque lancement opérationnel de MOTHY.

Bibliographie

- Daniel, P. 1996 : Operational forecasting of oil spill drift at Meteo-France. *Spill & Science Technology Bulletin*. Vol. 3, pp 53-64.
- Daniel P., P. Josse, P. Dandin, V. Gouriou, M. Marchand, C. Tiercelin, 2001 : *Forecasting the Erika oil spills, Proceedings of the 2001 International Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Washington, D.C*, pp 649-655.
- Lazure, P., Jegou, A. M., 1998 : *3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay Bay continental shelf. Oceanologica Acta*, vol. 21, No. 2.

IMPACT DE LA POLLUTION AUX HYDROCARBURES SUR L'ECOPHYSIOLOGIE ET LA PATHOLOGIE DES BIVALVES D'INTERET COMMERCIAL DE LA COTE ATLANTIQUE

J.L. MARTIN-J.HAURE, LABORATOIRE CONCHYLICOLE DES PAYS DE LOIRE
A.THEBAULT, M. ROBERT, LABORATOIRE GENETIQUE & PATHOLOGIE
P. GOULLETQUER, LABORATOIRE CONCHYLICOLE DE POITOU-CHARENTES, COORDINATEUR

L'évaluation des conséquences écologiques et économiques de la pollution pétrolière de l'Erika implique la mise en oeuvre d'observations, d'analyses et d'expériences scientifiques à court, moyen et long terme. Parmi ces effets à évaluer, l'impact direct sur la biologie et les performances de production des principales espèces conchylicoles mérite une attention particulière dans la mesure où près de 30 % de la production nationale (de l'ordre de 130 000 tonnes d'huîtres et 60 000 tonnes de moules par an) se situent dans la zone impactée. Les difficultés dans l'évaluation des effets de contaminants sur une partie de l'écosystème dominée par une population d'élevage résident dans les différentes approches à mettre en oeuvre comme dans les réponses variables en fonction des espèces concernées. Notamment, les effets à court terme d'une toxicité aigue susceptible de toucher une fraction des stocks exposés à des apports polluants massifs doivent être discernés des effets retardés d'une toxicité chronique due à une faible exposition et à une bio-accumulation sub-létale. Les espèces d'huîtres comme de moules sont considérées comme d'efficaces bioaccumulateurs d'éléments traces et de différents micropolluants, avec une capacité limitée de régulation pour limiter l'accumulation de contaminants dans leur tissus (De Kock and Kramer, 1994). Ceci justifie leur utilisation dans les réseaux nationaux de biosurveillance ("Mussel watch" aux USA, RNO en France). La toxicité à court terme a déjà été abordée (2000) par l'analyse de la décontamination des huîtres et moules, ainsi que par les suivis de phase larvaire, stade de développement particulièrement sensible. Les analyses des taux d'HAP dans les coquillages de la baie de Bourgneuf réalisés avant l'arrivée de la marée noire puis dans les semaines qui l'ont suivie, ont montré que la contamination pouvait être extrêmement rapide. Une expérience de 51 jours avec un apport de phytoplancton (*Skeletonema costatum*) distribué par une eau salée souterraine traitée (épuration physico-chimique et biologique), a mis en évidence une décontamination initiale rapide des animaux, les huîtres et les moules atteignant respectivement des valeurs inférieures ou égales au seuil fixé par l'AFSSA en 9 et 26 jours, résultats variables en fonction des contaminations initiales (850 µg/kg - huîtres & 4000 µg/kg - moules). La pente de décontamination des deux espèces étudiées ne diffère pas significativement. A moyen terme, les effets d'une toxicité chronique sur les performances individuelles de croissance, reproduction et taux de mortalité sont évalués globalement par des suivis in-situ en intensifiant les différents réseaux de surveillance de l'IFREMER (REMORA, REMOULA). Cependant, compte tenu de la plasticité des bivalves face à des fluctuations environnementales naturelles (e.g., trophique) ou/et anthropiques, les processus induisant ces modifications de rendement doivent être compris. Une des hypothèses de travail concerne des perturbations d'ordre physiologique, détectables par le suivi des fonctions métaboliques (respiration, assimilation, excrétion), affaiblissant les animaux et par la même leurs défenses immunitaires. Les efforts de recherche ont porté sur les effets à moyen et long terme des polluants sur les populations de bivalves d'intérêt commercial selon deux approches : -1 globale par l'intensification des réseaux de suivi de la reproduction, de la croissance et de la qualité des mollusques d'élevage, via le réseau pérenne REMORA (1994→) concernant l'huître creuse *Crassostrea gigas* sur différents sites de production (impactés et non impactés) de la façade atlantique; -2 analytique afin de comprendre les voies physiologiques responsables des effets éventuels et d'établir des corrélations entre les différents moyens

expérimentaux mis en œuvre (écophysiologie, histopathologie). Cette dernière méthode est considérée comme essentielle en biomonitoring pour déterminer les effets d'agents biologiques, physiques et chimiques comme ceux des contaminants anthropogéniques sur les animaux (Yevich and Yevich, 1994). L'objectif final de l'étude est d'établir des corrélations entre les mesures in-situ de rendement de production, les processus physiologiques observés dans la première étude, le statut parasitaire et le niveau de contamination de polluants.

Le premier volet de l'étude a estimé l'état physiologique d'huîtres de la Baie de Bourgneuf présentant divers degrés de contamination en hydrocarbures par comparaison avec des témoins issus de Marennes-Oléron. L'influence du taux de contamination a été mesurée par l'activité biologique de l'animal (filtration et consommation d'oxygène) ainsi que par l'efficacité de ses fonctions métaboliques dans l'utilisation de la nourriture capturée (ingestion, digestion, absorption). Cette activité est basée à la fois sur le niveau (valeurs absolues) et sur la durée de celle-ci (temps). Les animaux ont été étudiés individuellement pendant 22 heures dans un milieu reproductible (eau salée souterraine) avec un apport constant de nourriture (phytoplancton *Skeletonema costatum*). Des enregistrements continus de mesures physiques ont permis d'estimer individuellement les taux de filtration (fluorimètre) et de consommation d'oxygène (oxymètre). Les biodépôts (fèces et pseudofèces) sont récupérés en fin d'étude pour le calcul des différentes fonctions physiologiques de l'animal (ingestion, absorption, production nette). L'ensemble des résultats permet d'établir un potentiel de croissance (SFG, "Scope For Growth") donnant une réponse intégrée utilisable comme un paramètre de biomonitoring (Smaal and Widdows, 1994).

L'ensemble des résultats a permis d'établir un potentiel de croissance (SFG, "Scope For Growth") (fig. 1) qui donne une réponse intégrée pouvant être utilisée comme un paramètre de biomonitoring (Smaal and Widdows, 1994).

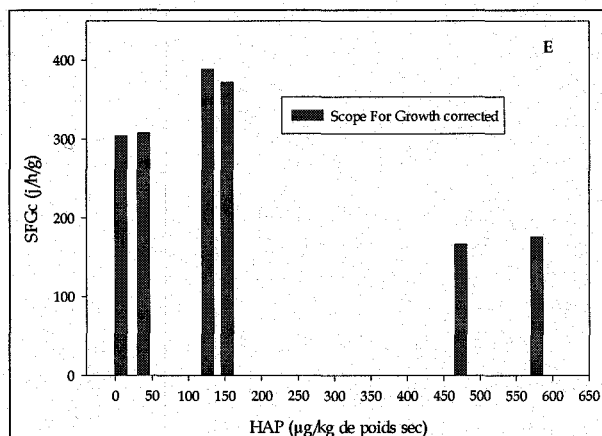


Figure 1 : Potentiel de croissance ou "Scope For Growth" (SFG) d'huîtres contaminées à différents niveaux.

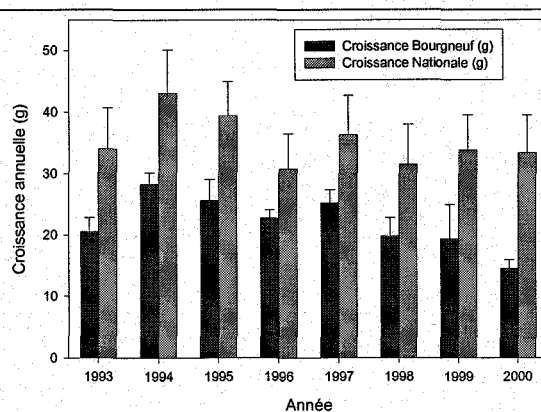


Figure 2: Evolution des gains moyens de croissance annuelle de la baie de Bourgneuf, comparés à ceux de la moyenne nationale.

Globalement, les temps d'activité comme le potentiel de croissance semblent peu affectés par des concentrations en hydrocarbures inférieures à 200 µg/kg alors que ces paramètres diminuent de moitié pour des teneurs au delà de 450 µg/kg. Des résultats similaires ont été obtenus sur les bivalves *Venus verrucosa* (Axiak and George, 1987) et *Mytilus edulis* (Widdows et al., 1982) contaminés par des hydrocarbures, confirmant nos propres observations. L'impact de la pollution au niveau de la biomasse d'huîtres en élevage en baie de Bourgneuf est évaluée par les données de croissance recueillies par le réseau national de l'Ifremer (REMORA). Ces informations existent depuis 1993 et les gains moyens

de croissance annuels peuvent être comparés à ceux de la moyenne nationale (fig. 2). Les croissances d'huîtres en baie de Bourgneuf sont en général médiocres : ainsi on observe de 1993 à 1999 les mêmes tendances que les performances moyennes au niveau national. Par contre, alors que les valeurs nationales indiquent un état stationnaire de la croissance en 2000, elles se traduisent en baie de Bourgneuf par une chute hautement significative par rapport à 1999. Ces déficits de la croissance peuvent s'expliquer en partie par des conditions météorologiques peu favorables au cours du premier semestre 2000 (températures basses, forte pluviométrie, coups de vent violents entraînant une forte turbidité), période pendant laquelle se réalise habituellement plus de 80 % de la production annuelle de la Baie (Haure et Baud, 1995). C'est également à cette période que les concentrations en HAP étaient élevées (>400 µg/kg) dans la plupart des secteurs ostréicoles. Compte tenu des résultats écophysiologiques, précédemment énoncés, l'impact de la pollution dû au naufrage de L'Erika sur les élevages conchylicoles ne peut donc être écarté.

La seconde étude concerne l'impact de la pollution aux hydrocarbures sur la pathologie de bivalves d'intérêt commercial. L'impact des hydrocarbures sur les invertébrés se traduit par une baisse des défenses immunitaires, les sensibilisant à l'action de pathogènes opportunistes. L'effet peut être recherché pour des doses sub-létales sur des mollusques d'intérêt commercial. Les connaissances sur les prévalences et leurs variations pour les principales espèces de ces régions sont connues avant l'arrivée de l'Erika, grâce aux résultats du Réseau de surveillance zoosanitaire des pathologies des mollusques (REPAMO). Par exemple, les coques font l'objet de suivis annuels au Croisic, en Baie de Bourgneuf et sur d'autres secteurs. Douze agents intratissulaires ont ainsi été détectés à des niveaux de prévalence ou d'infestation faibles (trématodes *Meigymnophallus minutus*, *Labratrema minimus*, *Himatshla* ; protozoaires, coccidies, grégarines, ciliés; bactéries, Rickettsies; métazoaires, *Paravortex cardii*, *Mytilicola*, larves de Nématodes; pathologies d'origine indéterminée, hématosarcomes). Un dérèglement de l'équilibre hôte-parasite est possible si les coquillages sont affectés par ailleurs. L'étude a consisté à mettre en évidence l'impact d'une pollution par des agents opportunistes utilisés comme indicateurs d'un état de fragilisation des animaux, tout en s'appuyant sur les données existantes des réseaux IFREMER (e.g., REPAMO). Cette approche permet de mieux comprendre l'agressivité potentielle et la pathogénie de certains parasites. De plus, l'activité cancérigène des polluants déjà décrites sur les coquillages (sarcomes) (Peters, 1988) a fait l'objet d'un suivi. Les moules, coques, palourdes, huîtres creuses ont été échantillonnées (30 individus/lot) en fonction de la taille, de la zootechnie, et des paramètres environnementaux. Les concentrations de polluants sur les coques et les huîtres étaient évaluées simultanément sur des lots de même origine, et pour les palourdes de façon directe, ou bien indirecte par la mesure de polluants sur une autre espèce comme la moule (Biomarqueurs-LITEAU). Les espèces fouisseuses sont logiquement les plus exposées à moyen et long terme lorsque les polluants s'y concentrent. Ainsi plus de 2 000 individus ont été analysés.

A ce jour deux agents parasitaires semblent émerger de l'impact de la pollution de l'Erika.

- Le premier concerne les Ciliés dans les branchies des moules exposées aux HAP. Les Ciliés sont des protistes, du phylum des *Ciliophora*, et de la famille des *Sphenophrydae* (Kinne, 1983). Ce sont des opportunistes, et seule une infestation massive pourrait avoir un effet sur son hôte (Kinne, 1983). Leur présence accrue pourrait soit venir d'une pullulation de ce type d'agents dans le milieu ou d'une sensibilité accrue des moules, agressée par des facteurs externes comme les HAP. L'hypothèse d'une multiplication intempestive dans le milieu n'est pas évidente car les moules sont les seules à montrer ce

type d'agents aussi présents dans leur tissu, comparées aux huîtres, aux palourdes et aux coques. Les ciliés ne sont pas spécifiques vis à vis des espèces hôtes à partir de nos connaissances actuelles. Cependant une taxonomie basée sur une phylogénie moléculaire permettrait une confirmation. Bien que la biologie des Ciliés soit peu connue, il est possible d'admettre que les deux critères ont du jouer un rôle pour aboutir à cette tendance de prévalence. Les Ciliés sont souvent présents dans des environnements dégradés (Bower *et al.* ; 1994, De Kinkelin *et al.*, 1985), et les branchies des moules ont pu être relativement agressées par les HAP. Il faut cependant être prudent dans l'interprétation, car un facteur tiers a pu jouer un rôle localement. Néanmoins l'hypothèse d'un effet de l'Erika sur la présence de Ciliés dans les branchies de moules reste plausible d'un point de vue biologique.

- Le second agent est réellement inattendu. Il s'agit vraisemblablement d'une levure intracellulaire, parasite des coques, occasionnant une réaction importante d'infiltration hémocytaire de la part des coques. Même si sa présence au Croisic est plus ancienne que l'Erika, son émergence coïncide curieusement et sur différents sites du Croisic à l'impact de l'Erika. Seule une étude menée sur un plus long terme permettra de relier ces lésions à l'impact des HAP. La mycologie n'est pas une branche classique de la pathologie des coquillages (Bower *et al.* , 1994). Aucune maladie à déclaration obligatoire des coquillages n'est liée à un agent fongique et la maladie observée au Croisic n'est pas décrite sur les coques. Seuls quelques champignons utiles en agroalimentaire ou néfastes en santé publique ont fait l'objet d'un séquençage permettant l'utilisation d'outils moléculaires qui auraient pu être utilisés sur les blocs histologiques (Pouchus, com. pers.). Les méthodes classiques de culture ont abouti à l'isolement de plusieurs souches, ce qui est fréquent en milieu marin et au Croisic en particulier, sur les coques de surcroît (Sallenave, 1999). Mais il n'a pas été possible d'établir de lien entre ces cultures et les lésions. L'aspect des champignons en culture et *in situ* chez l'animal peuvent être très différents. Lorsque les boîtes de cultures et la méthodologie ont été acquises, les taux de prévalence chez les coques avaient diminué. Par ailleurs, il est possible que le milieu de Sabouraud ne soit un milieu favorable à la culture, toujours lente et hasardeuse, des champignons présents dans ces lésions. Le matériel, blocs et souches obtenues sont cependant gardées pour des travaux futurs. D'autres approches expérimentales par exemple permettraient de progresser dans l'identification. Toutefois, de façon similaire aux résultats d'écophysiologie, l'ensemble des résultats scientifiques et l'évolution sur quelques années devrait permettre la confirmation de la corrélation avec la pollution liée à l'Erika. Nos connaissances sur la pathologie des coques est encore parcellaire, et le mérite de cette étude sera au moins d'avoir décrit une nouvelle pathologie. En 1999, des cas de néoplasie sur les coques du Croisic ont été décrits pour la première fois sur ce site, sans aucun lien avec un changement d'origine environnemental. Par conséquent, l'occurrence d'une pathologie nouvelle coïncidant avec une pollution aux hydrocarbures ne constitue pas en soi une démonstration définitive du lien de causalité entre les deux. Le suivi à plus long terme permettra de confirmer si le champignon a proliféré dans un milieu dégradé ou si les coques étaient fragilisées par les HAP. Les coques semblent fragilisées sur le plan physiologique par les hydrocarbures (Savari *et al.*, 1991). Par ailleurs ce champignon est virulent pour la coque, déclenchant notamment une forte réaction inflammatoire.
- L'intérêt d'une étude d'observation est de suggérer des pistes qui seront démontrées par des études complémentaires. Les coques apparaît ainsi comme une espèce potentiellement indicatrice dans le cas de nouvelles pollutions accidentelles aux HAP telle que celle du Prestige et également en routine dans le cadre du réseau de surveillance.