Développement d'un outil informatique opérationnel d'aide à la décision et de modélisation des pollutions en Méditerranée

Laurent Aprin, S. Lefloch, Pierre Garreau, Alice James, Pierre Daniel, V. Daumail, Carmen Navarro Sanchez, M. Mouries, C. Casselman, J. Baccou, et al.

▶ **To cite this version:**

Laurent Aprin, S. Lefloch, Pierre Garreau, Alice James, Pierre Daniel, et al.. Développement d'un outil informatique opérationnel d'aide à la décision et de modélisation des pollutions en Méditerranée. Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Oct 2008, Avignon, France. pp.Com 2C-5. ineris-00973321

HAL Id: ineris-00973321
https://ineris.hal.science/ineris-00973321

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'un outil informatique opérationnel d'aide à la décision et de modélisation des pollutions en Méditerranée

Design of an operational decision aid software to model pollution in the Mediterranean Sea

AUTEURS

APRIN L.[a], LEFLOCH S.[b], , GARREAU P.[c], JAMES A.[d], DANIEL P.[e], DAUMAIL V. [f], SANCHEZ C.[f], MOURIES M.[g], CASSELMAN C.[h], BACCOU J.[h] THEBAULT H.[i], ETASSE C.[j], ROURE J.F.[k], MERCANTINI J.M.[l] , OLIER R [m],

[a] LGEI, Ecole des Mines d'Alès, 6 Avenue de Clavières, 30319 Ales Cedex, France, 04 66 78 27 58, 04.66.78.27.01, laurent.aprin@ema.fr

[b] CEDRE (Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux) service intervention, 715 rue Alain Colas - CS 41836 - 29218 Brest Cedex 2, France, 02.98.33.67.02, Stephane.Le.Floch@cedre.fr

[c] IFREMER (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer) service Applications Opérationnelles (DEL/AO), Z.I. Pointe du Diable, B.P. 70 29280 Plouzane, France, 02.98.22.43.59, Pierre.Garreau@ifremer.fr

[d] Cellule mixte Ifremer/INERIS d'Analyse des Risques Chimiques en milieu marin (ARC), Département Biogéochimie et Ecotoxicologie, Centre IFREMER de Nantes B.P. 21105, 44311 Nantes Cedex 3, France, 02.40.37.41.48, Alice.James@ifremer.fr

[e] Météo France, Direction de la prévision, division Marine et Océanographie, 42, avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1, France, 05.61.07.82.92, pierre.daniel@meteo.fr

[f] APSYS-EADS Agence Sud Est, CTMA - Bat B, 13127 Vitrolles, France, 04.42.89.80.82, capucine.sanchez@apsys.eads.net

[g] GEOCEAN-MERCLEAN, Quartier du Brégadan, ZA Technoparc, CS 60001, 13711 CASSIS Cedex, France, 04.42.18.02.18, m-mouries@merclean.fr

[h] Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, IRSN/DPAM/SEMIC,Bat. 702 – CE, Cadarache, 13108 Saint Paul lez Durance, France, 04.42.19.94.53, chantal.casselman@irsn.fr

[i] Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, Laboratoire d'Etudes Radioécologiques des milieux Continental et Marin, IFREMER BP 330, 83507 La Seyne-sur-mer, France, 04.94.30.48.46, Herve.Thebault@ifremer.fr

[j] TOTAL S.A., Trading & Shipping / Transports Maritimes/ Service Environnement et Lutte Anti-Pollution, Tour Coupole, 2 Place de la Coupole, La Défense 6, 92078 Paris La Défense Cedex, France, 01.47.44.82.23, celine.etasse@total.com

[k] Service Départemental Incendie et de Secours du Gard, 982 av Joliot Curie, 30900 Nîmes, France, 04.66.63.36.16, jfroure@sdis30.fr

[l] Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (LSIS), UMR CNRS n° 6168, domaine Universitaire de St Jérôme, Av. Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille cedex 20, France, 04.91.05.60.15, jean-marc.mercantini@lsis.org

[m] Laboratoire de Chimie, Electrochimie Moléculaires et Chimie Analytique, UMR CNRS 6521, Université de Bretagne Occidentale, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837 - 29238 Brest Cedex 3, France, 02.98.01.60.28, rene.olier@univ-brest.fr

Résumé :
Les pollutions maritimes ont toujours eu un impact fort sur les populations côtières. Un littoral souillé par une nappe de produits chimiques ou d'hydrocarbures engendre inexorablement une perturbation des écosystèmes et des risques importants pour les populations. Les pertes économiques pour la région touchée sont souvent importantes du fait des dommages subis par les secteurs du tourisme, de la pêche, des cultures marines. C'est dans ce contexte de gestion de crise que se positionne le projet CLARA II, et plus précisément dans un objectif de prévision et d'aide au diagnostic dans un contexte de pollution accidentelle en milieu marin. Le projet CLARA II aboutira à la création d'un outil de simulation permettant de prévoir la localisation d'un contaminant, ainsi que l'évolution de sa concentration dans la mer et dans l'atmosphère lors d'un déversement massif de polluant en Méditerranée. Il permettra de connaître les distances d'effets dans le cas d'un incendie, de renseigner sur les capacités de bioaccumulation de certains organismes marins et fournira des indices de sensibilité selon les zones polluées. Par ailleurs, pour être caractérisé comme un outil opérationnel de gestion de crise, le projet CLARA II proposera des méthodologies sur les conduites à tenir et les méthodes d'interventions basées sur une analyse pertinente de l'accidentologie. Ce projet d'une durée de quatre ans fédère un consortium composé de laboratoires de recherche académique, d'industriels, des services de l'état et d'une PME

Summary :
Maritime pollution always had a strong impact on the coastal populations. A littoral affected by a pollution of chemicals or hydrocarbons generates a disturbance of the ecosystems and important risks for the populations. The economic losses for the polluted area are often important because of the damage undergone by the sectors of tourism, fishing, and the marine cultures. It is in this context of crisis management that project CLARA II positions, and more precisely in an objective of forecast and assistance to the diagnosis in case of accidental pollution in marine environment. Project CLARA II will lead to the creation of a simulation tool making it possible to envisage the location of a contaminant, as well as the evolution of its concentration in the sea and the atmosphere during a massive discharge of pollutant in the Mediterranean Sea. It will make it possible to know the distances from effects in the case of fire, to inform about the bio-accumulation capacities of certain marine organisms and will provide indices of sensitivity according to polluted zones. In addition, project CLARA II will propose methodologies on the behaviour to be held and the methods of interventions based on a relevant analysis of the lessons learnt. This four years duration project is proposed by a consortium of academic research laboratories, industrialists, firemen and SME

1. Le projet CLARA II (Calculs liés Aux Rejets Accidentels en Méditerranée)

1.1 Contexte

Approximativement 30% du volume du trafic maritime international concernent les ports méditerranéens, ou transitant en Méditerranée, tandis que l'on estime que 50% des marchandises transportées par voie maritime peuvent présenter un risque à différents degrés. Le trafic (tonnage, fréquence) et, consécutivement, les risques d'accidents majeurs seront donc amenés à croître dans les années à venir dans cette région du monde.
Jusqu'à ce jour, les autorités chargées de prendre des mesures de protection sanitaire ou économiques face à des déversements de produits chimiques ou d'hydrocarbures disposent rarement d'outils de simulation performants et adaptés aux interventions opérationnelles.
C'est dans ce contexte de gestion de crise que se positionne le projet CLARA II (Calculs liés Aux Rejets Accidentels en Méditerranée), et plus précisément dans un objectif de prévision et d'aide au diagnostic dans un contexte de pollution accidentelle en Méditerranée. Ce projet est mené, depuis novembre 2006, par l'Ecole des Mines d'Alès, le Cedre, l'Ifremer, Météo-France et la cellule ARC (Ifremer/INERIS), APSYS-EADS, Géocéan-Merclean, IRSN, Total, le SDIS 30, l'UBO et le LSIS dans le cadre d'un financement de 48 mois par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le Programme Ecotechnologies et Développement Durable (PRECODD).

1.2. Objectifs et démarche

Dans un contexte de rejet accidentel en Méditerranée, l'objectif de CLARA II est de fournir une aide à la gestion globale des risques liés aux pollutions marines chimiques et pétrolières : mise en place rapide des zones d'exclusion pertinentes dans le but d'alerter, protection des populations, des biens et de l'environnement, mobilisation des moyens de lutte adaptés afin d'anticiper la situation à court ou moyen terme.
Dans ce but, CLARA II devra permettre de simuler conjointement l'évolution de l'hydrodynamisme côtier méditerranéen et le comportement physico-chimique des polluants, afin de visualiser leur devenir dans la totalité de l'environnement : dans la colonne d'eau, au fond, à la surface, voire dans l'atmosphère après évaporation.
Cet outil permettra d'évaluer les risques environnementaux à court terme sur la faune et la flore marines et de fournir des informations sur les potentiels effets à plus long terme. Le logiciel pourra également renseigner sur les capacités de bioaccumulation dans la chaîne alimentaire (poissons, crustacés, coquillages) des substances déversées et proposer une approche préliminaire des risques toxicologiques relatifs à l'homme en cas de dispersion atmosphérique de gaz toxiques.
Les conséquences prévisibles pour les écosystèmes côtiers et les usages économiques seront évaluées à partir d'un indice de sensibilité/vulnérabilité spatialisé sur l'ensemble du territoire concerné. L'outil proposé pour illustrer cet indice se présentera sous la forme d'un atlas hiérarchisé, régulièrement actualisé, de la sensibilité des zones littorales aux pollutions marines en fonction des caractéristiques propres à chaque secteur. Le couplage avec les sorties des modèles prévisionnels de risques issues des différents scenarii d'accidents permettra d'évaluer et de classer *a priori* la vulnérabilité de chaque zone.
CLARA II permettra de déterminer des distances d'effets pour les scenarii définis (pollution, dispersion, incendie, …) en tenant compte des incertitudes liées aux données principales, et de proposer des solutions techniques de lutte.
Grâce à ce projet, les gestionnaires de la crise (notamment les autorités maritimes et terrestres) disposeront ainsi d'un nouvel outil indispensable pour optimiser l'affectation des moyens de lutte et l'organisation post-accidentelle à court terme.

Les enjeux du projet CLARA II adressent des problématiques mobilisant l'ensemble de la communauté scientifique. Le comportement d'un produit chimique dans l'eau de mer est complexe : sa modélisation n'a pas de solutions simples, ni surtout universelles, et les informations issues des tests en laboratoire ne sont pas toujours adaptées à l'environnement marin ; elles ne répondent donc pas toujours aux attentes des professionnels en charge de la lutte contre la pollution maritime.

1.3. Construction du projet

Ce projet s'inscrit dans la continuité de programmes de recherche des différents partenaires et vise à proposer un outil complet de modélisation et d'aide à la gestion de crise lors d'un rejet ou déversement massif de polluants en Méditerranée. Il s'inscrit également dans la continuité des précédents programmes ayant poursuivi le même objectif (projet CLARA I).

S'appuyant sur l'approche méthodologique suivante, le projet est organisé en cinq tâches, elles mêmes subdivisées en différentes activités.

Trois tâches principales représentent le cœur de ce projet :
- L'analyse des besoins doit consolider les informations déjà exprimées dans le cadre de CLARA I et développer les exigences relatives aux méthodes d'assistance à la gestion de crise et des fonctionnalités du futur système.
- L'étude des produits, qui doit permettre la constitution d'une base de données pertinentes sur les produits à considérer dans CLARA II, sous l'impulsion des partenaires du projet : laboratoires de recherche, gestionnaires de crise et sociétés d'intervention. .
- La modélisation des conséquences, à travers laquelle seront développés les modèles d'évaluation des phénomènes (hydrodynamique, chimique, dispersion atmosphérique et incendie).

2. Analyse des besoins

L'objectif de la tâche 1 (Analyse des besoins) est de spécifier les exigences attachées au logiciel CLARA II, sur la base des informations produites lors du projet CLARA I.

2.1. Analyse de l'existant

Cette phase repose sur les analyses réalisées dans le cadre du projet CLARA I. L'objectif de cette première phase est de faire un bilan de l'existant en ce qui concerne :

- La gestion du transport maritime en Méditerranée
  L'objectif est d'identifier :
  - Les principales voies maritimes et leurs risques intrinsèques,
  - Les différents types de navires.

- L'étude des produits chimiques les plus fréquemment transportés dans le bassin méditerranéen
  En concertation, les différents partenaires ont sélectionnées les substances chimiques qui seront incluses dans la base de données de CLARA II (en complément de celles provenant de CLARA I), celles qui feront l'objet d'une caractérisation physico-chimique au laboratoire et celles qui seront étudiées lors de l'expérimentation en mer.

- L'élaboration d'une base de données physico-chimiques regroupant ces produits,

- L'accidentologie et le retour d'expérience
  L'accidentologie marine en Méditerranée, présentée sous forme de comptes rendus d'intervention recueillis auprès de diverses sources (CEDRE, BARPI, REMPEC…), est analysée et synthétisée : les accidents survenus sont classés selon les critères pertinents pour la suite du projet.

- Les techniques opérationnelles de lutte

  La prise en compte des différents plans de lutte (les plans POLMAR Terre et Mer, le plan RAMOGEPOL et le plan LIONPLAN) ainsi que le retour d'expérience des gestionnaires de crises, en particulier le plan POLMAR en ce qui concerne les accidents de l'Erika et du Prestige, permettront d'adapter l'aide que peut apporter CLARA II.

- Les modèles mathématiques et les logiciels scientifiques ou commerciaux de simulation :
  L'objectif est de présenter l'état de l'art des logiciels de comportement dans l'atmosphère et en mer des produits chimiques et des hydrocarbures.

- Les techniques de prise en compte des incertitudes dans les études de risque, notamment de pollution environnementale.
  L'outil pourra modéliser l'incertitude sur les données d'entrées en respectant le plus fidèlement possible la connaissance disponible. Les paramètres d'entrées, les données de sortie et les modèles concernant les incertitudes dans les études de risques seront définis par les partenaires.

- Les aspects juridiques liés à la dimension internationale des accidents.
  Les exigences concernant cet aspect sont notifiées dans le cahier des charges fonctionnel et technique.

2.2 Analyse des risques

L'objectif de cette phase est de proposer des scénarios d'accidents de rejets de produits chimiques et hydrocarbures à partir des résultats de la phase d'analyse de l'existant.

La démarche consiste à établir un corpus de documents relatifs à des accidents ou des presque accidents déjà intervenus. L'analyse de ce corpus aura pour objectif de mettre en évidence des scenarii-types d'accidents en vue d'élaborer leurs modèles conceptuels. Pour chacun de ces scenarii-types d'accident, les méthodes d'intervention (incluant la résolution des problèmes juridiques posés par la dimension internationale de tels accidents) seront analysées et modélisées en vue de constituer une bibliothèque de méthodes d'intervention. Des critères d'adéquation seront établis pour faciliter le choix des méthodes les plus pertinentes vis-à-vis d'un scénario d'accident particulier.

On distingue les cas suivants :
- Les accidents intervenant en zone portuaire lors de la manipulation des produits dangereux (chargement et déchargement),
- Les accidents en zones non-portuaires.

2.3 Cahier des charges

Le cahier des charges fonctionnel et technique permet la validation de l'ensemble des fonctionnalités présentes dans CLARA II. Ce cahier des charges permet de définir l'architecture du système en fonction des résultats synthétisés lors des deux premières phases. Il synthétise notamment les résultats de l'analyse de l'existant et spécifie les différents types d'exigences :

- Exigences Fonctionnelles : les fonctions principales de l'outil ainsi que ses données d'entrées et de sorties
- Exigences liées à l'environnement : conditions d'environnement, protection contre les agressions, autres contraintes,…
- Exigences Techniques : contraintes de développement, performances, structure, vérification et validation,…

- Exigences de sûreté de fonctionnement : disponibilité, sécurité, maintenabilité, …

2.4 Méthodologie sur les conduites à tenir

L'objectif de cette partie du projet est de développer un module informatique d'assistance à l'élaboration d'actions de lutte contre une pollution (méthodes et techniques) suite à un accident maritime. Les actions proposées doivent prendre en compte la situation et son évolution au cours du temps (scénario). Pour cela, nous recherchons à mettre en évidence des scenarii-types d'accidents et d'analyser les méthodes d'intervention les mieux appropriées en vue de constituer une bibliothèque de méthodes d'intervention. Des critères d'adéquation seront établis pour faciliter le choix des méthodes les plus pertinentes vis-à-vis d'un scénario d'accident particulier.

2.4.1 Démarche méthodologique

La démarche méthodologique suivie est conforme aux approches de type Génie Cognitif. Dans ce sens, le processus de développement d'un outil informatique d'aide à la résolution de problèmes nécessite d'exprimer de façon explicite le modèle de connaissance qui caractérise le triplet Td < Domaine, Problème, Méthode >. Ainsi, le modèle de connaissance structure le domaine (le domaine des accidents maritimes) au regard du problème à résoudre (planifier des actions de lutte) et compte tenu de la méthode de résolution de ce problème (construction d'une bibliothèque de méthodes et d'un système de navigation dans la bibliothèque). Nous ne traiterons pas dans cet article le problème de la validation du plan par la simulation qui doit faire l'objet de nos développements futurs.

L'élaboration du modèle de connaissance suit les cinq étapes principales suivantes :

1. Spécification. Cette étape a pour but de fournir une description claire du problème étudié ainsi que de la façon de le résoudre. Elle permet de préciser l'objectif, la portée et le degré de granularité du modèle qui sera construit.
2. Définition du corpus. Il s'agit de sélectionner parmi les différentes sources de connaissance celles qui permettront de répondre aux objectifs de l'étude, définis dans l'étape de spécification.
3. Étude linguistique du corpus. Cette étape consiste à analyser le corpus pour en extraire les termes porteurs de connaissance ainsi que les relations qui les lient.
4. Conceptualisation. Lors de cette étape, il s'agit de transformer les termes obtenus suite à l'étude linguistique du corpus : les termes seront transformés en concepts et les relations lexicales en relations sémantiques. Au terme de cette étape, un modèle conceptuel est obtenu.
5. Formalisation. Cette étape a pour objectif d'exprimer au moyen d'un langage formel le modèle conceptuel obtenu au terme de l'étape précédente.

Pour nous guider dans cette démarche nous avons mis en œuvre la méthode Knowledge Oriented Design (KOD) développée par Claude Vogel [1] [2]. Cette méthode repose sur une démarche inductive qui, sur la base d'un corpus constitué de documents, d'observations et de discours d'experts, permet d'exprimer de façon explicite le modèle cognitif (aussi appelé modèle conceptuel) des connaissances des experts ou celles contenues dans les documents produits par des experts.
Les principales caractéristiques de cette méthode sont qu'elle repose sur des principes issus de la linguistique et de l'anthropologie cognitive. Ses fondements linguistiques la rendent bien adaptée pour l'acquisition de connaissances exprimées en langage naturel et ses fondements anthropologiques, facilite l'analyse sémantique de la terminologie utilisée pour produire un modèle cognitif.

2.4.2 Le corpus

Dans le cadre de notre étude, les deux phénomènes importants qui définissent le domaine et le problème à traiter sont : (i) les accidents maritimes et (ii) les interventions visant à circonscrire les conséquences de l'accident. Ainsi, le corpus a été établi sur la base de documents relatifs à des accidents déjà intervenus ainsi qu'à la mise en œuvre d'actions de lutte. Les types de documents qui composent ce corpus sont les suivants :

- des documents relatifs à l'évaluation de chaque technique ou méthode de lutte,
- des documents généraux sur l'organisation de plan de lutte,
- des documents de retour d'expérience sur les grandes catastrophes maritimes telles que celle de l'Érika, du Prestige, etc.
- des documents de retour d'expérience sur des accidents maritimes de plus faible ampleurs.

2.4.3 Étude des méthodes et des critères (étude linguistique et conceptualisation)

Sur la base de ce corpus, deux types d'analyse sont effectuées :

- une analyse concernant chaque méthode ou technique d'intervention de façon à obtenir une représentation de chacune d'elle ainsi que la mise en évidence des critères d'adéquation qui les caractérisent vis-à-vis des situations possibles,
- une analyse des techniques, méthodes et stratégies en contexte de lutte. Cette analyse permet d'extraire de la connaissance relative à la dynamique de la lutte concernant en particulier (i) la logique d'enchaînement des actions de lutte, (ii) la logique de combinaison des actions de lutte, (iii) la logique de choix des stratégies, des méthodes et des techniques en fonction de la dynamique d'évolution des situations (scénario).

L'analyse des actions de lutte a mis en évidence que les critères d'adéquation qui les caractérisent permettent de définir une structure à quatre dimensions. Chacune de ces dimensions étant constituée de classes de critères comme le montre le tableau 1.

Dimensions	Classes
Organisation	Disponibilité des ressources
	Performance du matériel
	Caractéristiques des moyens logistiques
	Accessibilité du site
Pollution	Caractéristiques du polluant en mer
	Caractéristiques du polluant sur terre
	Caractéristiques de la source de pollution
Environnement physique	Caractéristiques océanographiques
	Caractéristiques géographique du site
	Conditions météorologiques
	Période de l'année
Enjeux	Vulnérabilité de la zone

Tableau 1 : Synthèse des dimensions et des classes qui caractérisent les critères d'adéquation associés à chaque méthode

2.4.4 Obtention des critères

Les critères sont obtenus à partir de l'analyse des documents du corpus concernant la mise en œuvre d'une technique ou d'une méthode que ce soit dans le cadre d'essais expérimentaux ou de retours d'expérience suite à des interventions (documents du Cèdre et du Rempec). La validation finale de ces critères est réalisée par les experts du consortium du projet CLARA II.

La méthode d'analyse suivie se présente en trois étapes :

- recensement et analyse de chaque méthode et technique d'intervention (étude linguistique),
- pour chacune d'elle, identification de ses critères d'utilisation ou d'adéquation (étude linguistique),
- analyse classificatoire de l'ensemble des critères obtenus (conceptualisation).

Le résultat de cette analyse est synthétisé dans le tableau 1.

Plusieurs remarques peuvent être formulées :

(i) Le résultat de la classification permet de définir la notion de situation dans le contexte d'actions de lutte contre une pollution à base d'hydrocarbures. Dans ce contexte, une situation est par conséquent définie au moyen des quatre dimensions :

< Organisation, Pollution, Environnement physique, Enjeux >

(ii) L'accident n'apparaît pas directement dans la notion de situation. Ceci vient du fait que les actions de lutte n'interviennent effectivement qu'après un accident, celui-ci faisant donc partie du passé. Par contre dans cette démarche l'étude de l'existence de corrélations entre le scénario d'accident et le scénario de lutte doit être abordée. Le point commun entre ces deux scénarii se situe au niveau des caractéristiques de la source de pollution.

2.4.5 Exploitation des critères

L'usage des critères permet d'interroger l'outil CLARA II de deux façons différentes :

- une méthode ou une technique d'action de lutte peut-elle convenir au regard d'une situation donnée ?
- compte tenu d'une situation donnée, quelles sont les méthodes ou techniques de lutte les mieux appropriées ?

Dans le premier cas l'outil contrôle que les critères d'adéquation de la méthode sont vérifiés par les données de la situation. Dans le deuxième cas, l'outil recherche dans la bibliothèque l'ensemble des méthodes dont les critères sont satisfaits par les données de la situation.

3. Etude expérimentale des produits

Le projet CLARA II intègre un logiciel d'aide à la décision et sa propre base de données physicochimiques et écotoxicologiques. Dans sa version initiale, la base de données référence un peu moins d'une centaine de substances, choisies parmi les substances liquides les plus massivement et fréquemment transportées par voie maritime en Méditerranée. Cette base de données est conçue pour être évolutive. Elle renseigne les paramètres nécessaires à la modélisation du comportement physicochimique des systèmes atmosphère/eau de mer/substance/fond marin. Le modèle prend en compte ces paramètres pour la prévision du comportement spatio-temporel et des effets écotoxicologiques de la substance déversée.

3.1 Physicochimie

La connaissance des propriétés physicochimiques des substances est nécessaire à la prévision de leur comportement. Celui-ci est considéré, dans le cours terme, comme régi par ces propriétés. Les évolutions à long terme ne sont pas concernées.
Les processus mis en jeu dans la dissémination de la substance dans l'environnement sont essentiellement :

- le comportement en fonction de la classification SEBC d'où résulte le comportement à très court terme de la substance. Le produit flotte ou coule.
- pour un produit flottant, le premier phénomène à prendre en compte est l'étalement de la nappe en surface. Secondairement, le produit peut s'évaporer, se dissoudre, être dispersé et former, en fonction de l'agitation du milieu, des aérosols, des gouttelettes dispersées dans la colonne d'eau, des mousses, des émulsions d'eau dans la substance.
- pour un produit coulant, le processus d'étalement en surface de la mer et l'évaporation pourront être, dans un premier temps, ignorés. Si la substance est peu soluble, le devenir de la nappe dépendra de la morphologie du fond marin (écoulement, stagnation, infiltration, …). L'impact écotoxicologique immédiat concernera les espèces vivant sur le fond (ou se nourrissant d'espèces y vivant).
- pour une substance soluble dans l'eau, il convient de distinguer les limites de solubilité, assez largement référencées dans la littérature (bien que peu y soit décrit en ce qui concerne l'influence de la salinité de l'eau de mer), de la vitesse de solubilisation, qui dépend fortement de l'énergie déposée dans le milieu (par le vent, la houle, les courants, ...). En dessous d'un certain seuil d'agitation, le phénomène prépondérant est la stratification en fonction des masses volumiques respectives de l'eau de mer et de la substance. Dans ce cas, bien que la solubilité-limite puisse être importante, la quantité solubilisée n'augmentera que très lentement. Ces vitesses de dissolution sont très peu référencées dans la littérature en raison même de leur dépendance des conditions d'agitation.
- Pour une substance dissoute, le processus de volatilisation peut également être pris en compte (à distinguer de l'évaporation de la substance pure)

Les paramètres physicochimiques retenus pour figurer dans la base de données sont les suivants : températures de fusion et d'évaporation, masse volumique, viscosité, pression de vapeur saturante, tension superficielle, limite de solubilité dans l'eau, enthalpie de vaporisation, chaleur spécifique du liquide, constante de Henry, coefficient de partage octanol-eau (K_{ow}), coefficient de partage carbone organique –eau (K_{oc}).

L'utilisateur renseigne les données environnementales : température, salinité, vitesse du vent, position initiale de la nappe ainsi que la quantité déversée.

Le logiciel prendra en compte l'évolution des paramètres avec la température et la salinité au lieu du déversement.

3.2 Ecotoxicologie

Le Projet CLARA II prévoit, comme le projet CLARA, de définir trois zones de risques croissants autour du point de déversement accidentel. Les limites de ces zones de risques sont les concentrations prédites sans effet sur les organismes pélagiques estuariens et marins à court terme ou PNECs (*Predicted No Effect Concentration*) pour une substance donnée. Ces PNECs sont définies pour des expositions à court terme (PNEC court terme) ou long terme (PNEC long terme). La PNEC court terme est obtenue à partir des données validées d'écotoxicité aiguë et correspond à un seuil de protection du milieu marin en cas de rejets ponctuels. Cette méthode de dérivation s'inspire de la méthodologie employée par le « Technical Guidance Document » ou TGD [4] dans le cas de rejets intermittents. La détermination de la PNEC long terme est, quant à elle, réalisée à partir des données validées d'écotoxicité chronique avec la méthode de dérivation recommandée par le TGD. Les trois zones de risque délimitées par ces PNECs seront représentées par l'intermédiaire d'un système de visualisation géo-référencé.

3.3 Sélection des substances chimiques

3.3.1 Substances figurant dans la base de données

Pour les substances chimiques pour lesquelles des informations seront disponibles dans la base de données, le travail de sélection a principalement consisté en la prise en compte du trafic maritime. Une mise en priorité des substances a donc été effectuée sur la base du tonnage transporté par an dans les plus grands ports méditerranéens [3]. Les substances solides, gazeuses ou sous forme de solide fondu, ne sont pas prises en compte dans CLARA II.
Au total, 71substances chimiques ont été identifiées afin d'alimenter initialement la base de données de CLARA II.
Un ordre de priorité a été établi pour l'étude de ces substances. Les substances à traiter en priorité sont celles pour lesquelles une partie des données ont déjà été collectées dans CLARA. Ensuite, le critère de priorité qu'il a été choisi d'appliquer est celui du trafic méditerranéen. Enfin, à l'exception des 2 substances en solution déjà présentes dans CLARA (ammoniaque et hydroxyde de sodium), les substances en solution seront traitées en dernier si le temps le permet.

3.3.2 Substances sélectionnées pour les expérimentations en laboratoire et en mer

Le projet CLARA II comprend également une phase d'expérimentations en laboratoire visant à caractériser sur le plan physico-chimique quelques substances afin d'évaluer leurs propriétés dans l'eau de mer et d'appréhender les principaux paramètres environnementaux pouvant influencer leur comportement une fois déversées dans l'environnement marin. Pour la sélection de ces substances chimiques testées en laboratoire, il a semblé pertinent que chaque comportement physico-chimique prépondérant à court terme soit représenté, ainsi qu'une substance en solution. Parmi les substances sélectionnées pour la base de données, 9 substances ont donc été choisies, chacune représentant des combinaisons différentes des comportements décrits dans la classification SEBC, classification des groupes de comportements des substances chimiques dans le milieu marin [5]: Flottant (F), Evaporant (E), qui se dissout (D) et/ou qui coule (S) (Tableau 2). Ces essais auront lieu à la fois à l'échelle du laboratoire et dans la colonne d'eau de mer de 5m du *Cedre*.
Enfin, le projet CLARA II prévoit une phase d'expérimentation en mer, qui consisterait en un déversement de substances chimiques afin de suivre *in situ* leur devenir, et notamment leurs cinétiques d'évaporation et de solubilisation. Au total, 3 substances ont été pré-sélectionnées du fait de leur comportement selon le code SEBC : les xylènes, le bis(2-ethylhexyl) adipate et le méthyl tert-butyl éther (MTBE). Le suivi de la substance F (bis(2-ethylhexyl) adipate) permettra de valider le module de dérive, et le suivi des substances FE (xylènes) et ED (MTBE) permettra de valider les équations définissant les cinétiques d'évaporation et de solubilisation. Ces essais en mer seront effectués en accord avec les autorités maritimes.

Priorité labo	Priorité BD	Priorité HASREP	Nom CAS	Numéro CAS	Comportement SEBC	Exp. en labo	Exp. en mer
1	9	24	methyl metacrylate	80-62-4	ED	X	
2	1	2	xylènes	1330-20-7	FE	X	X
3	36	57	acide adipique bis(2ethylhexyl)	103-21-3	F	X	X
4	1	(23)	1,2-dichloroéthane	107-06-2	SD	X	
5	1	5	MTBE	1634-04-4	ED	X	X
6	1	15	ethylène glycol	107-21-7	D	X	
7	32	53	n-butanol	71-36-3	D	X	
8	1	6	styrène	100-42-5	FE	X	
9	1	1	Hydroxyde de sodium en solution	1310-73-2	D	X	

Tableau 2 : Substances chimiques sélectionnées pour les essais expérimentaux en laboratoire et en mer

4. Modélisation des conséquences

La Méditerranée est un bassin mi-clos, parfois décrit comme « une piscine d'eau de mer à coefficient de marée nul », avec des caractéristiques hydrologiques et écologiques variées qui la rendent plus vulnérable aux effets de la pollution qu'une mer ouverte. Les modélisations hydrodynamiques proposées dans le cadre du projet concerneront une zone côtière qui ira de la région Provence-Alpes Côte d'Azur à la région Languedoc-Roussillon et s'intéressera plus finement à la zone portuaire comprise entre Marseille et Fos sur Mer. Les modélisations proposées dans le cadre du projet CLARA II concernent l'évolution de l'hydrodynamique marine, l'évolution du produit dans l'eau mais aussi dans l'air à travers la modélisation de la dispersion atmosphérique lorsqu'un produit s'évapore et la modélisation des flux thermiques dans le cas d'un incendie. La dernière partie du projet concerne la modélisation des incertitudes et leurs propagations dans les différents codes de calculs

4.1 Modélisation hydrodynamique en Méditerranée

L'absence de signal de marée en Méditerranée oblige à avoir une stratégie différente de celle développée pour la Manche et le Golfe de Gascogne (CLARA I). La détermination de situations thermohalines sur des bases simplement climatologiques est loin d'être suffisamment précise pour prévoir le comportement des polluants. De plus, les évolutions de l'océanographie opérationnelle côtière et hauturière font que

des prévisions de champs de courant sont déjà disponibles et accessibles par l'intermédiaire d'internet. En Méditerranée, l'Ifremer propose déjà des prévisions de circulation de courants le long du littoral PACA à une résolution de 1.2km. Des modèles plus fins sont également envisagés, tel qu'un modèle avec une résolution de 400 m sur une zone plus sensible (Fos/Marseille). Ces données hydrodynamiques sont géo-référencées et configurées pour être accessible depuis un poste de travail relativement léger (un PC, relié à Internet). En cas d'indisponibilité de l'information (pas de prévision ou pas de réseau) un catalogue de situations hydrodynamiques typiques pré-calculées sur la base de situations réelles antérieures permet alors une première estimation.

4.2 Modélisation du comportement physico-chimique

Le module de transport et d'évolution des contaminants chimiques développé au cours de CLARA I sera adapté afin d'être interfaçable au module d'acquisition des conditions hydrodynamiques. Par ailleurs, le module d'évolution physico-chimique des produits, implémenté dans CLARA I, ne prend en compte qu'un nombre limité de comportements et nécessite des données complémentaires afin d'obtenir une évolution réaliste des produits en mer. Sur la base des données physico-chimiques et des lois de dégradation des produits obtenues dans la tache précédente, le module d'évolution sera modifié et les nouvelles lois seront implémentées afin de fournir un outil opérationnel permettant une prévision réaliste et fiable lors d'un accident maritime.

4.3 Modélisation de la dispersion atmosphérique

La modélisation de la dispersion atmosphérique d'un gaz proposée dans le logiciel CLARA II consiste en une première approche de cette problématique. L'objectif principal est une évaluation rapide et simple des effets potentiels sur l'homme de la dispersion atmosphérique d'un gaz toxique issu de l'évaporation d'un polluant depuis la surface de l'eau. L'évaluation des effets sur l'homme se traduira par le tracé de courbes d'iso-concentrations relatives à l'IDLH. Ce module fait l'objet de développements spécifiques dans le but d'améliorer et de préciser l'impact toxicologique sur l'homme à travers l'utilisation de modèles plus précis prenant en compte les variations météorologiques (changement de direction du vent,...). La simulation de la dispersion atmosphérique proposée s'appuiera sur un modèle de type « gaussien » applicable aux émissions prolongées (jusqu'à quelques heures ou quelques jours). En effet les modèles « gaussiens » sont particulièrement adaptés aux situations de dispersion d'un gaz passif (gaz qui « subit » les mouvements de l'air) en champ libre, comme à la surface de la mer. La méthode utilisée pour modéliser une émission prolongée est celle des « bouffées gaussiennes » qui est simple et rapide à mettre en œuvre et donc adaptée à la gestion de crise [6] et [7].

4.4 Modélisation des incendies

La modélisation de l'incendie permet d'estimer les distances d'effets c'est-à-dire les distances pour lesquelles les flux thermiques atteignent des valeurs données (3, 5, 8 et 16 kW/m2) correspondant aux valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques pour l'homme et les structures [8]. La quantité et la composition de fumées émises par le feu peuvent être également estimées pour permettre la simulation de la dispersion atmosphérique des produits de la combustion. Pour calculer les distances d'effets, les modèles classiquement utilisés consistent à déterminer tout d'abord les caractéristiques géométriques du feu c'est-à-dire la vitesse de combustion et les dimensions du foyer. Pour ce faire, les données requises sont le débit massique surfacique et l'enthalpie de combustion du produit combustible et la surface du feu. Les premières données sont issues de la littérature ou peuvent, dans le cas où elles n'existeraient pas, être déterminées en laboratoire. La détermination de la surface du feu est effectuée sur la base des scenarii-type retenus par le projet et des retours d'expérience répertoriés. L'estimation des débits de gaz et des concentrations de produits brûlés à la sortie de la flamme est basée sur une réaction chimique de combustion pré-déterminée et sur une corrélation calculant le débit d'air entraîné par la flamme.

4.5 Caractérisation des incertitudes

L'estimation des effets sur l'environnement d'une pollution est établie à partir de données et de modèles entachés d'incertitude. Il est alors important, pour une meilleure prise de décision, de mesurer l'impact des incertitudes d'entrée sur l'incertitude associée aux sorties de l'outil de crise. En pratique, on cherche à estimer deux grandeurs statistiques qui sont : la marge d'incertitude en sortie (c'est à dire l'éventail des valeurs de sortie possibles en intégrant les incertitudes d'entrée) et la probabilité des sorties de dépasser un seuil qui entraîne un danger pour l'homme.

Le projet CLARA II utilise deux méthodes pour évaluer les incertitudes sur les résultats d'un calcul. La première est basée sur l'utilisation des probabilités pour la quantification des incertitudes sources et sur la technique de Monte-Carlo pour les propager à travers l'outil de crise. Cette approche est très simple à implémenter et fournit directement des estimateurs des deux quantités statistiques d'intérêt précédemment mentionnées. Cependant, les méthodes probabilistes nécessitent beaucoup d'informations sur les incertitudes « source » pour préciser les lois de probabilités associées à chaque paramètre ainsi que les dépendances éventuelles. En pratique, une telle information n'est pas toujours disponible et contraint l'utilisateur de ce type de méthodes à des choix arbitraires qui peuvent conduire à une réduction artificielle des marges d'incertitudes associées aux résultats. Pour pouvoir quantifier l'influence du choix des lois et des dépendances sur les marges d'incertitude, une deuxième approche est utilisée dans ce projet : elle est basée sur la théorie des probabilités imprécises (ou approche de Dempster-Shafer [9]) et permet d'évaluer la robustesse de l'analyse d'incertitude dans le cas où l'information sur les incertitudes « source » n'est que partielle.
Ces deux techniques ont été d'ores et déjà employées avec succès pour des problèmes de pollution environnementale. Par ailleurs, elles sont non-intrusives, dans le sens où elles ne nécessitent pas de développements particuliers dans les outils logiciels existants. Elles seront mises en œuvre dans le cadre de CLARA pour évaluer les incertitudes entachant les résultats des modèles de dispersion (atmosphérique) et d'incendie.

5. Conclusion

Outre les actions menées dans le but de prévenir toutes les autres pollutions telles le renforcement de la réglementation, des contrôles et des sanctions plus sévères, lorsqu'un sinistre survient, les populations et les pouvoirs publics souhaitent une gestion plus rapide et plus efficace des pollutions pour en limiter les conséquences. L'objectif de CLARA II est de proposer, aux gestionnaires de la crise, un outil de gestion des risques liés aux pollutions marines chimiques et pétrolières en Méditerranée, leur permettant de mettre en place rapidement des zones d'exclusion pertinentes dans le but d'alerter, mais aussi de protéger les populations, les biens et l'environnement, de mobiliser les moyens de lutte adaptés et d'anticiper la situation à court ou moyen terme. CLARA II devra être d'une grande simplicité d'utilisation car l'outil sera mis en œuvre sur le terrain par des organismes non-spécialistes des modèles de simulation.
Le projet CLARA II a pour ambition de combler en partie les vides existants notamment au travers de la modélisation de l'hydrodynamique méditerranéenne, de la compréhension de la physicochimie des produits étudiés et de leur mélange avec l'eau de mer, des méthodologies sur les conduites à tenir, de l'amélioration des techniques de lutte et du développement de nouvelles solutions de récupération. Cette

meilleure connaissance pourra permettre une approche technologique améliorée du confinement en mer des produits déversés et, plus généralement, du traitement de la pollution.
Les objectifs du projet Clara 2 sont multiples, et consistent à prévenir ou limiter les conséquences d'un déversement de produit chimiques pour l'environnement :

- du point de vue écologique, par la protection des zones naturelles sensibles,
- du point de vue économique, par la protection des usages et autres activités économiques à proximité,
- du point de vue de la protection de la santé des intervenants.

Remerciements

Les membres du consortium CLARA II remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et le Programme Ecotechnologies et Développement Durable (PRECODD) pour leur soutien dans la réalisation de ce projet.

References

[1] Vogel C., Génie cognitif, Masson (Sciences cognitives), Paris, 1988.

[2] Mercantini JM., Tourigny N., Chouraqui E., "Elaboration d'ontologies à partir de corpus en utilisant la méthode d'ingénierie des connaissances KOD", dans : 1ère édition des Journées Francophones sur les Ontologies (JFO 2007), n° ISBN : 978-9973-37-414-1, pp 195-214, 18 – 20 Octobre 2007, Sousse, Tunisie.

[3] AMRIE (2005). Report on task 1 « Monitoring of the flow of chemicals transported by sea in bulk and in package form ». Report of the European Union Project HASREP : Response to harmful substances spilled at sea. 38 p.

[4] E.C. (2003). Technical guidance document in support of Commission Directive 93/67/EEC on risk assessment for new notified substances and Commission Regulation (EC) No1488/94 on risk assessment for existing substances and Commission Directive (EC) 98/8 on biocides, European Commission.

[5] GESAMP (2002). Revised GESAMP Hazard Evaluation Procedure for Chemical Substances Carried by Ships. London, GESAMP (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection): 126.

[6] DOURY A., Limites d'utilisation de modèles panaches, Seminar on radioactive releases and their dispersion in the atmosphere following a hypothetical reactor accident April 1980, 615-616, 1980

[7] DOURY A., A design basis for the operational modelling of atmospheric dispersion, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1 : 156-162, 1988.

[8] SHAFER G. (1976). A Mathematical Theory, Princeton, University Press.