The background of the cover features a complex molecular structure with blue and green spheres connected by thin lines. A central, large, glowing green sphere is surrounded by a dense network of smaller green spheres, creating a spherical cluster. Other smaller clusters of blue and green spheres are scattered throughout the scene. The overall color palette is dominated by blues, greens, and purples, with a subtle grid pattern overlaid on the central part of the image.

# Rapport scientifique

## 2010/2011

**INERIS**  
maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



Créé en 1990, l'INERIS, Institut national de l'environnement industriel et des risques, est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement.

## 02 Introduction

- 02\_\_ Édito par Vincent Lafèche, Directeur Général
- 03\_\_ La parole à... Pierre Toulhoat, Directeur scientifique
- 04\_\_ Les sciences au service de la société
- 04\_\_ Effet des faibles doses : preuves et inférences
- 08\_\_ Risques émergents – iNTeg-Risk : des approches intégrées pour la gouvernance

## 10 Nouvelles filières technologiques

- 11\_\_ Interview de Henri Molleron : analyser les risques en toute indépendance
- 12\_\_ La filière captage et stockage du CO<sub>2</sub>
- 15\_\_ Focus : le volet CO<sub>2</sub> iNTeg-Risk
- 16\_\_ Captage du CO<sub>2</sub> : le projet OXYCOMB
- 19\_\_ Transport du CO<sub>2</sub> par canalisation : évaluations des risques
- 22\_\_ Focus : carburants alternatifs au kérosène – projet ALFA-BIRD
- 23\_\_ Référentiel de certification
- 25\_\_ Focus : la méthanisation

## 26 Substances chimiques

- 27\_\_ Interview de Robert Barouki : la recherche translationnelle en marche
- 28\_\_ Les outils QSAR dans un contexte réglementaire : l'importance d'une validation scientifique externe
- 31\_\_ Focus : le projet PREDIMOL
- 32\_\_ Les défis du règlement européen REACH

- 33\_\_ Le groupement d'intérêt scientifique FRANCOPA
- 34\_\_ La peroxydation de l'éther éthylique : étude théorique et expérimentale
- 39\_\_ Focus : les polybromodiphényl éthers (PBDE)

## 40 Nano-technologies

- 41\_\_ Interview de Rémy Maximilien : approfondir les connaissances en toxicité et écotoxicité
- 42\_\_ INERIS : acteur européen dans la sécurité des nanotechnologies
- 44\_\_ Mise en évidence de l'émission de nanotubes de carbone lors de la combustion de polymères nanocomposites
- 48\_\_ Focus : la biodistribution des nanomatériaux
- 49\_\_ Nanoparticules : influence des conditions d'essais et des paramètres physico-chimiques sur l'écotoxicité pour le milieu aquatique
- 53\_\_ Focus : modélisation et simulation numérique de la dynamique des nanoparticules appliquée aux atmosphères libres et confinées

## 54 Sites et territoires

- 56\_\_ Interview de Philippe Hubert : risques sanitaire et environnemental
- 57\_\_ Inégalités environnementales
- 60\_\_ Crises environnementales : la modélisation au service de la gestion
- 63\_\_ Focus : l'outil INTER'MODAL
- 64\_\_ Biomarqueurs, vers leur utilisation pour la surveillance des milieux aquatiques
- 66\_\_ La cytométrie de flux, un outil innovant en écotoxicologie

- 69\_\_ Bioaccessibilité orale des éléments traces métalliques dans les sols pollués
- 72\_\_ Focus : le projet PHYTOSTAB
- 73\_\_ Mesure des métaux rejetés par l'industrie nucléaire dans l'environnement marin
- 77\_\_ Interview de Yann Macé : risques industriels
- 78\_\_ Phénomènes naturels, prévenir les accidents majeurs
- 81\_\_ Facteurs humains, management des risques et apport des outils de simulation basés sur la réalité virtuelle
- 84\_\_ Interview de Christophe Didier : sols et sous-sols
- 85\_\_ Vulnérabilité, conséquences des aléas accidentels et naturels sur les biens
- 88\_\_ Focus : les risques miniers liés aux puits de mine

## 89 Annexes

- 89\_\_ Programmes 190
- 90\_\_ Programmes de recherche soutenus par l'Agence nationale de la recherche – ANR (en cours au 15 septembre 2011)
- 91\_\_ Autres programmes (financements sur fonds publics) – en cours au 1<sup>er</sup> septembre 2011
- 92\_\_ L'INERIS, partenaire de 28 programmes européens (au 15 septembre 2011)
- 93\_\_ Sujets de thèse sélectionnés en 2011
- 94\_\_ Gouvernance scientifique (au 3 novembre 2011)
- 95\_\_ Les Commissions scientifiques (au 3 novembre 2011)
- 97\_\_ Indicateurs du Contrat d'Objectifs 2006-2010
- 98\_\_ Publications



# Édito

Par Vincent Lafèche, Directeur Général

**L**a période couverte par ce rapport scientifique illustre bien ce qu'est devenu l'INERIS en peu d'années. Il est aujourd'hui un acteur reconnu de la recherche sur les risques liés à l'activité industrielle. Deux exemples présentés dans ce rapport en sont particulièrement représentatifs :

- sa place dans les programmes à forts enjeux sociétaux, comme les nanotechnologies, les nouvelles filières technologiques ;
- son rôle majeur dans le développement de la recherche en toxicologie et écotoxicologie prédictive, concrétisé par la mise en œuvre du pôle national applicatif.

La synergie entre recherche et expertise est la pierre angulaire d'un organisme de recherche appliquée comme l'INERIS. Nous la favorisons en promouvant des cursus conjuguant des activités dans l'un et l'autre domaine. C'est le sens de l'engagement que nous avons pris dans le contrat d'objectifs 2011-2015 signé avec l'État, de développer la recherche partenariale. Ce rapport en présente plusieurs illustrations : les référentiels de certification Nano-Cert et ELLICERT. Par ailleurs, les travaux réalisés autour de la technique LIBS, utilisée pour la détection des nanoparticules, ont été distingués par le prix de « La Recherche » 2011.

L'INERIS exerce son expertise dans un contexte où la crédibilité du chercheur, ou expert, qui conclut à l'absence de risque est fragile. L'INERIS en a la capacité comme l'illustrent les travaux du Nord Cotentin et ceux réalisés en temps réel sur l'impact du volcan islandais. L'INERIS estime nécessaire de renforcer sa gouvernance. L'adoption de la

charte de l'expertise en 2010 et la mise en place formellement en 2011 de la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE) en attestent. La CORE va contribuer à renforcer la cohérence entre les travaux scientifiques de l'INERIS et les attentes de l'ensemble des acteurs de la société.

The period covered by this scientific report illustrates well what INERIS has become in just a few years. Today it is a recognized player in the research into the risks associated with industrial activity. Two examples presented in this report are particularly representative of this:

- its place in programmes involving societal issues, such as nanotechnologies and the new technological disciplines
- its major role in the development of research into toxicology and predictive ecotoxicology, which was given concrete expression by the establishment of the national applications centre.

The synergy between research and expertise is the cornerstone of an applied research body such as INERIS. We can encourage this by promoting courses which combine activities in both of these areas. This is the idea behind the commitment we made to developing partnership-based research in the agreement which we signed with the government on our objectives for 2011-2015. This report presents several illustrations of this: the frames of reference for the Nano-Cert and ELLICERT certification. In addition, the work undertaken around the LIBS technology which is used for the detection of nanoparticles was honoured by being awarded the Prix de la Recherche [French scientific research prize] in 2011.

INERIS exercises its expertise in a context where a researcher or expert who concludes that there is an absence of risk can suffer from fragile credibility. INERIS has the capacity for this, as was demonstrated by our work in the Northern Cotentin and the work undertaken in real time on the impact of the Icelandic volcano. INERIS considers it necessary to strengthen its governance. The adoption of the charter on expertise in 2010 and the formal establishment in 2011 of the Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise (Commission for the Orientation of Research and Expertise [CORE]) bear witness to this. CORE will contribute to strengthening the coherence between the scientific work of INERIS and the expectations of all the players in society.



# La parole à...

## Pierre Toulhoat, Directeur scientifique

**E**n matière de recherche, le contrat d'objectifs de l'INERIS, signé en juillet 2011 pour la période 2011-2015, reprend les priorités suivantes:

- viser l'excellence scientifique de la recherche appliquée;
- développer les connaissances sur la sécurité, l'impact et l'efficacité environnementale de nouvelles filières de la croissance verte;
- être un acteur clé européen de la maîtrise des risques liés aux nanoparticules;
- animer le pôle national applicatif en toxicologie et écotoxicologie;
- comprendre et maîtriser les risques à l'échelle d'un site ou d'un territoire.

Les résultats de recherche présentés dans ce rapport montrent clairement l'engagement des équipes de l'Institut. Ainsi, la qualité et le nombre des publications se renforcent d'année en année, et la notoriété de l'Institut s'accroît régulièrement. Nous avons eu ainsi la satisfaction de voir une reprise des résultats de nos écotoxicologues dans le numéro du 15 août 2011 de la prestigieuse revue *Nature*. Par ailleurs, les chercheurs de l'INERIS ont été distingués ou récompensés à plusieurs reprises cette année. L'année 2011 a vu aussi se renforcer nos résultats européens (7<sup>e</sup> programme-cadre), notre taux de succès dépassant 40%. La montée en puissance du pôle Tox Ecotox<sup>1</sup> va se concrétiser fin 2011 par l'accueil des premières équipes sur la nouvelle plateforme expérimentale pour la validation et le développement de méthodes alternatives en expérimentation animale. Cette installation va permettre de renforcer les moyens nationaux, notamment pour la validation de méthodes alternatives en expérimentation animale, à travers le réseau ANTIOPES animé par l'INERIS, l'unité PERITOX avec l'UPJV (université de Picardie Jules Verne),

renouvelée en 2011 après une évaluation très favorable par l'AERES (Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur), et l'accord de collaboration signé le 21 juin 2011 avec l'IRSET (Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail) de Rennes. Enfin, l'INERIS s'engage plus que jamais dans une recherche finalisée, visant à préparer l'avènement de nouvelles filières technologiques qui soient d'emblée mieux acceptées, grâce à des référentiels en matière de maîtrise des risques élaborés avec toutes les parties prenantes.

### Note

1. Pôle national applicatif en toxicologie et écotoxicologie.

With regard to research, the INERIS objectives contract, signed in July 2011 for the 2011-2015 period, returns to the following priorities:

- To aim at the scientific excellence of applied research,
- To develop knowledge on safety, the impact and environmental effectiveness of new channels in green growth,
- To be a key European player in controlling the risks linked to nanoparticles,
- To run the national application centre for toxicology and ecotoxicology,
- To understand and to control the risks on the scale of a site or a territory. The research results presented in this report clearly show the commitment of the Institute's teams. In this way, the quality and the number of publications increase from year to year, and the Institute's reputation is constantly growing. In this way, we had the satisfaction of seeing a repeat of our ecotoxicologists' results in the prestigious magazine *Nature* in its issue of 15 August 2011.

Furthermore, the INERIS researchers received distinctions or awards on several occasions this year. Our European results (7<sup>e</sup> PC) were also increased in 2011, our success rate exceeded 40%. The centre's build-up will be materialised at the end of 2011 by the arrival of the first teams on the new experimental platform for the validation and development of alternative methods in animal experiments. This installation will enable national resources to be reinforced, particularly for validating alternative methods for animal experiments, through the ANTIOPES network, run by INERIS, the PERITOX unit with the UPJV, renewed in 2011 after a very favourable evaluation by AERES, and the collaboration agreement signed on 21 June 2011 with IRSET in Rennes. Finally, INERIS is more than ever engaged in targeted research, with the aim of preparing the advent of new technological channels which are immediately better accepted, thanks to data repositories in the field of risk control drawn up by all the stakeholders.

# Les sciences au service de la société

Essentielles au développement de notre pays, les activités économiques – notamment industrielles – sont porteuses de risques, alors que les citoyens expriment, de manière de plus en plus forte, une demande de protection. Le Grenelle de l'Environnement, notamment à travers le deuxième plan national santé-environnement, a voulu répondre à cette demande. Dans le domaine des risques chimiques, l'Institut a réagi à l'insuffisante structuration de la recherche en toxicologie et écotoxicologie par la mise en place du Pôle national applicatif en toxicologie et écotoxicologie avec les universités picardes – université de technologie de Compiègne, université de Picardie Jules Verne et l'institut polytechnique LaSalle Beauvais. Le Grenelle de l'Environnement engage aussi à intégrer plus fortement les préoccupations de développement durable au cœur de l'innovation. L'INERIS s'est fortement investi dans l'accompagnement de nouvelles technologies plus propres et plus sûres, véhicules électriques, développement de nouvelles filières énergétiques, nanomatériaux...

## Effet des faibles doses: preuves et inférences\*

Les définitions d'une dose et ses concepts physiques associés varient notablement: énergie par unité de masse de tissu (*e.g.* joule/kg); énergie par unité de masse et de temps (*e.g.* watt/kg); masse par unité de masse corporelle et par jour (*e.g.* mg/kg de poids corporel et par jour). Certains appellent « dose » des concentrations dans l'air (*e.g.* mg/m<sup>3</sup>), avec référence explicite (*cf.* toxicité aiguë, subaiguë) à la durée, ou sur des durées floues. Ainsi, la dose n'est pas forcément une incorporation (d'énergie ou de masse) sur une durée. Malgré ce flou, la discussion sur les grandeurs physiques reste secondaire. La question des « effets des faibles doses » est en réalité celle des « doses à faible effet » et, au-delà, celle de la façon d'inférer des effets potentiels en deçà de ce qui est observé avec les outils d'investigation du vivant.

### Faibles doses et outils d'investigation du vivant

Ces outils sont variés, et aboutissent à des « frontières des faibles doses » différentes. L'expérimentation porte sur des « modèles animaux » (toxicologie *in vivo*), du matériel biologique cellulaire (toxicologie *in vitro*) et intracellulaire (génétique, protéomique ou métabonomique). Modifications de l'équilibre des populations, de la morphologie, décès, pathologies, altérations fonctionnelles, modifications de marqueurs biologiques (biomarqueurs) peuvent être les effets observés. L'observation est souvent la base de l'épidémiologie, c'est-à-dire portant sur une gamme

d'effets observés plus restreinte (malgré l'accroissement de l'usage des biomarqueurs). Ces deux disciplines prépondérantes ne doivent pas faire oublier l'importance d'autres sources: observations cliniques, pharmacovigilance, toxico-vigilance et, en particulier, les observations sur les espèces animales. Ces dernières ont par exemple soulevé le problème des perturbateurs endocriniens (reproduction d'oiseaux, malformations de coquillages, malformations sur les alligators et batraciens). Force est de constater que ces outils d'investigation du vivant sont mal reliés entre eux.

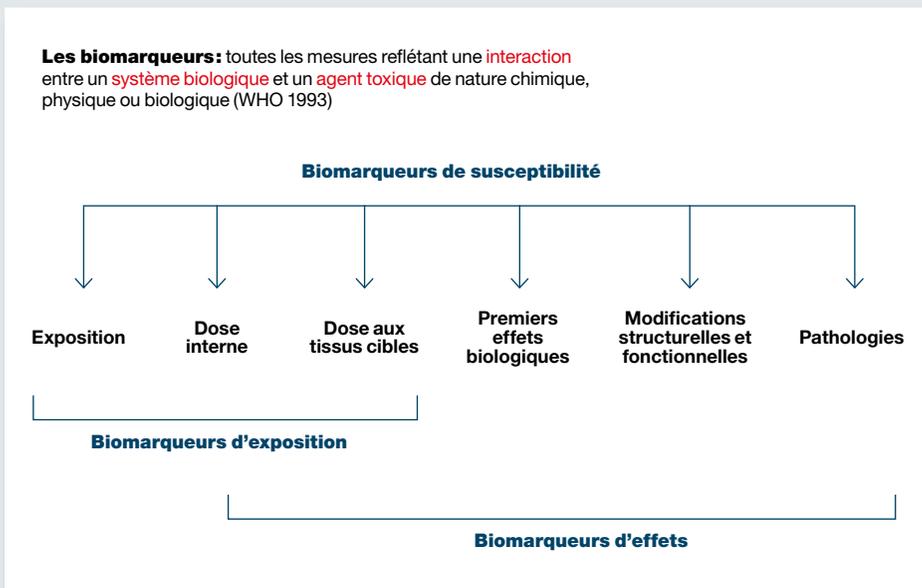
### Réponse toxicologique: l'obstacle de la signification

Pour les toxicologues, la démarcation se construit sur la « disparition d'une réponse toxique », quand les doses décroissent (*voir par exemple* « LOAEL » [*Lowest Observed Adverse Effect Level*] et « NOAEL » [*No Observed Adverse Effect Level*]). Pour reprendre l'exemple des rayonnements ionisants, l'absence d'effets en termes de changement hématopoïétique, d'érythème cutané, a défini historiquement des seuils en dessous desquels les doses sont « faibles ». Parmi les effets cliniquement observables aux niveaux inférieurs, on peut citer les effets réversibles sur les stérilités qui ont conduit la CIPR (Commission internationale de protection radiologique) à expliciter une notion de « faibles doses » vers 100 mGy (milligray), valeur en dessous de laquelle « *aucun tissu*

**Les biomarqueurs:** toutes les mesures reflétant une **interaction** entre un **système biologique** et un **agent toxique** de nature chimique, physique ou biologique (WHO 1993)

Figure 1

Les biomarqueurs: effet ou signal?



n'exprime une altération qui ait une signification clinique » [1]. Or, tout effet n'est pas clinique, et on peut tenter de baisser ce seuil en s'intéressant à des effets de type « biomarqueur » de réponse biologique traduisant l'absence d'effet dommageable. C'est là que surgissent les difficultés.

La question de la frontière entre les « effets dommageables » et les « réponses nettes mais sans impact pour la santé » peut faire l'objet d'une discussion serrée.

Le développement généralisé des biomarqueurs ouvre des perspectives car les réponses à l'exposition à un agent peuvent être tracées à des niveaux très bas. Mais il s'agit de réponses dont la signification en termes de toxicité potentielle n'est pas forcément établie (figure 1). Le cas exemplaire est celui des perturbateurs endocriniens, car ceux-ci sont définis par le mécanisme d'action et non par la nature toxique de l'effet. L'activation d'un récepteur peut ainsi fournir une « réponse » claire, marquant la réponse à un perturbateur endocrinien potentiel, décelable par des tests *in vitro* qui peuvent être très sensibles. Pour autant, les essais de toxicologie peuvent ne donner aucune réponse décelable en termes de reprotoxicité ou cancérogénèse, d'effet histopathologique ou de réponse hormonale *in vivo* [2].

Un autre exemple d'actualité concerne les champs électromagnétiques, où des relations significatives ont pu être établies à des niveaux faibles, à peine supérieurs aux valeurs des

normes en usage, pour un marqueur de stress – la GFAP (*Glial Fibrillary Acidic Protein*) – sur des modèles animaux. Pour autant, l'accroissement du taux de cette protéine s'observe fréquemment, y compris lors de la simple manipulation des animaux. La signification de la réponse n'implique pas ici sa signification en termes de toxicité [3].

Jugement d'expert et expertise collective sont ainsi mis à contribution.

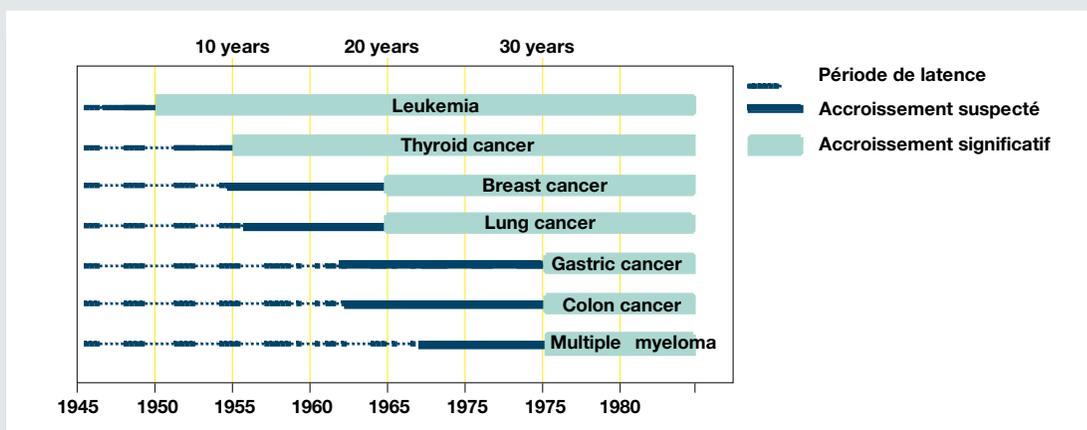
### Réponse épidémiologique: l'obstacle de la significativité?

La définition la plus fréquente de la frontière des faibles doses vient de la « significativité statistique » de données épidémiologiques. En deçà d'un certain niveau de dose, l'excès de risque cesse d'être significatif et les doses sont dites « faibles ». En effet, cette significativité décroît au fur et à mesure que l'on se restreint à une plage de doses plus faibles. Par exemple, lors de l'analyse de 2003 sur les décès par cancer de 1950 à 1997 à Hiroshima et Nagasaki [4], la relation ne restait significative et linéaire que sur la plage 0-150 mSv (millisieverts). Comme la précédente, cette démarcation des « faibles doses » souffre d'une faiblesse conceptuelle car, ici, elle dépend de la « puissance » d'une étude (capacité, au vu du nombre de cas étudiés, de mettre en évidence un excès). Ce phénomène est particulièrement remarquable pour les grandes études de cohorte. Le temps qui passe augmente années d'observation et nombre de cas cumulés. Ainsi, à Hiroshima et Nagasaki, c'est au fil des années que →

### Note

\* Hubert P., *Effet des faibles doses: preuves et inférences*, « Environnement Risques & Santé », 2010, volume IX, n° 4, pp. 295-302.

**Figure 2**  
Significativité statistique d'une réponse; une donnée évolutive. Les excès suspectés puis significatifs sur la cohorte des survivants d'Hiroshima et Nagasaki.



## Références

- [1] The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP, 2007, p. 37.
- [2] Porcher J.-M. et al., *Mechanisms of endocrine disruptors. A tentative overview*, Devillers J. (Ed.), Endocrine disruption modeling, CRC Press, 2009.
- [3] Ammari M. et al., *GFAP expressions in the rat brain following sub-chronic exposure to a 900 MHz electromagnetic field signal*, Int. J. Radiat. Biol. 2010, vol. 86, No 5, pp. 1-9.
- [4] Preston D. L. et al., *Technical Report No. 24-02. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997*, Radiat Res 2003, p. 160.
- [5] Hubert P., *Inférence dans l'évaluation du risque et éléments qualitatifs pour décrire l'incertitude*, in « Journal de la société française de statistiques », 2004, tome 145, n° 3, pp. 33-46.
- [6] *Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk*, ICRP 99, *Annals of the ICRP* (December 2005), volume 35, issue 4.
- [7] Shore R. E., *Low-dose radiation epidemiology studies: status and issues*, Health Physics, November 2009, volume 97.
- [8] Chiu W. A. et al., *Toxicokinetics of inhaled trichloroethylene and tetrachloroethylene in humans at 1 ppm*, Toxicological Sciences, 2007.
- [9] Rupp B. et al., *Chronic Oral LOAEL prediction by using a commercially available computational QSAR tool*, Arch. Toxicol. Published on line March 12, 2010.
- [10] Guzelian P. et al., *Evidence-based toxicology: a comprehensive framework for causation*. Human and Experimental Toxicology, 2005.
- [11] Expertise collective parue sous le titre « *Cancers-environnement* », Éditions INSERM 2008.

→ les effets ont acquis une significativité statistique (figure 2). Le changement d'outils statistiques peut aussi modifier cette frontière.

### Méthodes d'inférences et mécanismes pour l'inférence

Cette démarcation entre doses « où l'on peut observer » et « faibles doses » étant – même difficilement – établie, il faut réaliser une inférence pour déduire le risque pour des doses dites « faibles ». C'est cette opération qui est au cœur des controverses. Trois mécanismes d'inférence distincts peuvent être appliqués [5] :

- l'« extrapolation » proprement dite, vers des doses plus faibles que celles sur lesquelles des coefficients de risque auront pu être ajustés;
- la transposition, lorsque des données d'autres populations humaines, ou des données animales, voire d'exposition par d'autres voies sont utilisées;
- l'analogie, lorsque les propriétés d'une substance sont établies à cause de sa ressemblance avec une autre aux effets connus.

Ces trois opérations sont fréquentes en évaluation du risque, autour de sites industriels ou de zones polluées ou pour l'application des réglementations telles que REACH.

### Éléments de critique pour l'extrapolation

L'extrapolation a été très documentée pour les rayonnements ionisants [6]. Une question est le choix de la relation fonctionnelle à ajuster pour une inférence statistique. Un autre point de vue consiste à replacer les études disponibles au regard des situations d'exposition. Il est ainsi possible de caractériser empiriquement l'ampleur de l'opération d'inférence. On peut s'intéresser à des expositions environnementales 2 fois, 10 fois ou 100 fois inférieures à celles pour lesquelles on a des résultats. C'est une bonne mesure de la « prise de risque ». Cette vision empirique peut être consolidée par la connaissance des mécanismes. Quand la conti-

nuité des mécanismes est démontrée par d'autres outils, l'extrapolation vers des doses plus basses peut se faire avec plus de rigueur. C'est le rôle qu'a joué la génotoxicité pour les rayonnements et pour le principe de linéarité appliqué aux cancérogènes génotoxiques, principe discuté aujourd'hui.

Un autre moyen de consolider le raisonnement est l'utilisation des modèles toxicocinétiques, reliant exposition et charge corporelle du métabolite suspecté d'être à l'origine de l'effet.

C'est ce qui a été fait pour le perchloroéthylène, montrant qu'une réduction de la dose d'exposition conduisait à une augmentation de la fraction métabolisée [8]. Ici (figure 3), le modèle conforte l'extrapolation vers les doses plus faibles car la métabolisation se fait toujours, et suggère, de plus, qu'une extrapolation linéaire est minorante. Cette modélisation et sa critique sont d'ailleurs au cœur du débat en cours aux États-Unis sur la révision des valeurs limites d'exposition au perchloroéthylène.

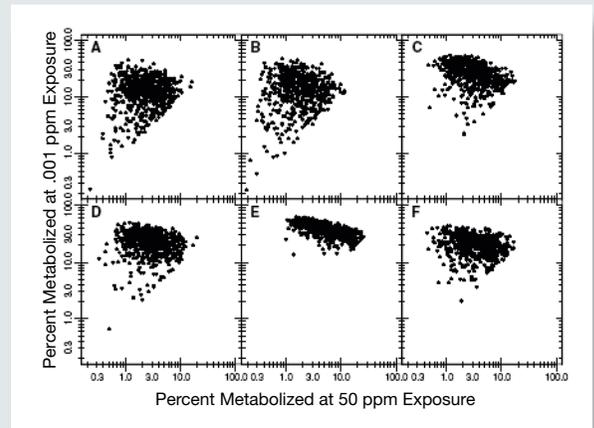
### Éléments de critique pour la transposition

Là aussi, une hiérarchisation empirique peut estimer la « distance » parcourue: de l'homme adulte à l'homme adulte, de l'homme adulte à l'enfant ou à des sous-populations particulières, mais aussi de l'animal à l'homme, avec une hiérarchie selon la proximité du modèle animal (d'ailleurs variable selon les mécanismes).

Les aléas de la transposition de l'animal à l'homme sont souvent évoqués. Mais les écarts existent aussi entre populations humaines. L'écart à franchir pour transposer les risques des expositions aux rayonnements ionisants vers la population des États-Unis à partir de celle du Japon [7] a été souligné, à cause des forts écarts sur les taux de cancer du sein (plus élevés aux États-Unis), ou sur les taux de cancer de l'estomac (plus faibles) (respectivement 4 et 1/7 selon l'OMS en 1988).

Figure 3

La modélisation PBPK  
(*Physiologically Based  
Pharmacokinetics*)  
en appui à l'extrapolation:  
fraction de perchloroéthylène  
métabolisé à 0,001 ppm  
vs 50 ppm.



### Des modèles pour appuyer les analogies

Depuis longtemps, l'analogie est utilisée pour présupposer des effets, pour associer neurotoxicité et métaux lourds (uranium, plomb, arsenic, mercure), ou assigner les mêmes dangers aux composés dans lesquels le chrome a la même valence. L'essor du règlement REACH pousse à un recours de plus en plus systématique à ces inférences par « lecture croisée » ou « catégorisation ».

Les progrès de la modélisation permettent de se fonder sur des descriptifs fins, des caractéristiques chimiques et physiques de la molécule, utilisés comme « prédicteurs ». C'est l'approche dite QSAR (*Quantitative Structure Activity Relationship*) en toxicologie prédictive [9].

Une autre approche de l'analogie concerne les facteurs d'équivalence toxique qui utilisent des propriétés biologiques. Ainsi, les dioxines et certains furanes ou polychlorobiphényles (PCB) ont une affinité mesurable, mais différente, pour le récepteur cellulaire AhR (récepteur aryl-hydrocarboné).

### Conclusion: les perspectives ouvertes par les nouveaux outils de la toxicologie prédictive

Les questions posées sur les « faibles doses » demandent d'inférer la réalité et l'ampleur d'un risque pour des expositions de populations à des niveaux rencontrés dans l'environnement, dans des ambiances de travail ou des ambiances domestiques, à partir de données qui ne sont pas immédiatement applicables. Cette opération, souvent décriée comme hasardeuse, repose en fait sur des démarches clairement identifiées, parfois caractérisables en termes d'ampleur, et de plus en plus souvent étayées par des mécanismes.

L'intégration des disciplines reste souvent limitée et empirique. Pour des réglementations telles que REACH, comme pour l'établissement de classifications internationales, il est

demandé de confronter ces « éléments de preuve » d'origine diverse (clinique, épidémiologie, expérimentation, etc.).

Fort heureusement, les nouveaux outils de la toxicologie peuvent non seulement mieux fonder l'analyse critique des relations causales en toxicologie [10] mais aussi enrichir l'approche épidémiologique. Les progrès en toxicologie prédictive avec les modélisations (toxicocinétique, QSAR, etc.) des nouveaux outils (génomique, protéomique, métabonomique) conduisant à des biomarqueurs opérationnels contribuent à résorber les cloisonnements entre les approches [11]. Ainsi, alternatives en expérimentation animale et effets des mélanges profitent de ces développements.

Philippe Hubert

## ABSTRACT

Discussing how plausible are the “low dose” effects related to environmental issues is a necessity. However, it is not a “low dose” but rather a “low effect”. To be more accurate, because “low effects” on large populations are not that small, it should be better to say “doses with undetectable effects”.

Hereafter, this “poorly detectable effect” concept is described from a toxicology and epidemiology view point. We also discuss how to set up a boundary for the low effect region. Once it is done, the different types of inference from observed situations (*i.e.* high effects) to situations of relevance for public health are reviewed, with a view to characterize their level of confidence. The first type is extrapolation from higher to lower doses, or higher dose rates to lower dose rates. The second type is transposition from human to human or from animal to human. The third type can be called “analogy” as is done in the “read across” approaches, where QSAR (Quantitative Structure Activity Relationship) methodology can be used. Those three types of inferences can be associated with an estimate of the “distance” between observed and predicted areas, but also they can be backed by mechanistic theories. The new tools of predictive toxicology are helpful both in deriving quantitative estimates and grounding inferences on sound bases.

# Risques émergents

## iNTeg-Risk : des approches intégrées pour la gouvernance

Les évolutions technologiques modernes doivent répondre à un double objectif : poursuivre la recherche et offrir des solutions innovantes à des sociétés demandeuses de sécurité sans émergence de nouveaux risques. L'accompagnement de ces développements génère de multiples questions : risques sur les systèmes vivants ? Conséquences à court, moyen et long termes ? *Quid* des générations futures ? Quelles organisations mettre en place pour gérer ces risques ? Quelles réglementations ? Le délai de réponse à ces questions est souvent long, incompatible avec celui de mise sur le marché souhaité par les opérateurs économiques. Une telle incompatibilité donne lieu à des débats. La nécessité de développer des cadres, méthodes et modèles adaptés à ces risques, dits émergents, constitue un enjeu important dans lequel l'INERIS s'investit totalement. Ainsi, il participe au projet européen iNTeg-Risk, coordonné par le GEIE EU-VRI<sup>1</sup> (plus de 70 partenaires, industriels, universités et organismes de recherche). Ce projet porte sur la détection précoce, la maîtrise et le management intégré des risques technologiques émergents.

### Les risques émergents

Conformément à la terminologie OSHA [1], les risques émergents regroupent des risques nouveaux résultant de technologies, procédés ou formes organisationnelles nouvellement implémentés, des risques identifiés mais sur lesquels les connaissances scientifiques ont récemment évolué et des risques connus mais dont la perception par le public a récemment changé. Ces risques font souvent l'objet d'un manque de retour d'expérience, d'un manque de connais-

sances scientifiques pour leur évaluation et leur maîtrise, et d'un flou organisationnel entourant les modalités de leur gouvernance. En effet, l'émergence d'un risque précède l'existence d'un cadre, réglementaire ou non, spécifiant les modalités d'exploitation sûre et les droits et devoirs des parties prenantes. Dans ce cas, la communication est extrêmement difficile à réaliser et une nouvelle technologie risque de voir sa mise sur le marché retardée – voire annulée – en raison d'un rejet fort exprimé par la société civile.

### iNTeg-Risk : quelles réponses dès aujourd'hui à ces défis ?

Le projet iNTeg-Risk arrive au bout de sa troisième année (sur les quatre années et demie prévues) et fournit déjà des résultats.

Le développement d'un paradigme et d'un modèle de gouvernance pour les risques émergents s'est effectué sous la double contrainte de la nécessité d'apporter des réponses novatrices aux défis soulevés compatibles avec les modèles de gouvernance des risques plus conventionnels déjà mis en place par les opérateurs publics et économiques.

C'est donc sur la base des modèles de l'IRGC [2] et de l'ISO 31000 [3] que la réflexion s'est articulée (figure 1). La spécificité des risques émergents a impliqué des développements particuliers pour permettre aux organisations d'améliorer leur capacité à détecter très tôt l'émergence de risques nouveaux (voir premières phases du modèle). De plus, un certain nombre de principes ont été clairement explicités :

- développer des approches intégrées permettant de considérer conjointement les différentes

dimensions du risque de manière à éviter la recherche d'optimums locaux ;

- considérer l'ensemble du cycle de vie des technologies liées au risque émergent considéré ;
- adopter un principe de robustesse dans la prise de décision. Ce principe s'intéresse à l'identification de solutions susceptibles d'être satisfaisantes pour différents scénarios d'évolutions dans le futur ;
- implémenter une démarche d'amélioration continue.

### Un exemple d'outils opérationnels : les indicateurs de performance

La mise en place de systèmes d'indicateurs permet d'anticiper l'occurrence de situations à risques en détectant des signes avant-coureurs de l'émergence d'un risque ainsi que l'évolution de sa possibilité d'occurrence et/ou de son potentiel catastrophique. Basés sur une approche processus conforme aux pratiques organisationnelles déjà largement constatées sur le terrain (à l'image des normes ISO 9001 pour la qualité), ces indicateurs aident l'organisation à cibler les processus clés pour son fonctionnement, les aspects risques majeurs, risques chroniques, risques au poste de travail et, enfin, la dimension sociétale de l'entreprise.

### Des outils et méthodes pour la gestion de risques émergents représentatifs

Un premier sous-projet a permis d'illustrer ces principes sur un ensemble de 17 risques émergents représentatifs (*Emerging Risk Representative Applications – ERRAs*) de la typologie établie sur la base de la définition de l'OSHA. On peut citer pour exemple le captage et le stockage du CO<sub>2</sub>, les nanotechnologies, l'augmentation du recours à la sous-traitance dans les industries à risque ou l'opération à distance de plateformes offshore en milieu sensible. Pour chacun de ces risques des outils spécifiques ont été développés : indicateurs, méthodes d'analyse de risques, modèles pour l'évaluation des conséquences, modèle d'évaluation des processus de communication, etc. Ils ont été positionnés dans le processus global de gouvernance des risques décrit en figure 1 et ont ainsi permis d'en démontrer la

## Références

- [1] OSHA, *Expert forecast on emerging risks related to occupational safety and health*, European Agency for Safety and Health at work, Bilbao, Spain, 2005.
- [2] International Risk Governance Council IRGC, *Risk governance: Towards an integrative approach*, Genève, Suisse, 2005.
- [3] ISO, ISO 31 000: 2009. *Management du risque: lignes directrices*, Suisse, 2009.

cohérence globale. Plusieurs de ces outils ont fait l'objet d'un partage entre ERRA, et ont ainsi confirmé leur caractère générique.

### Des outils de partage et de diffusion des connaissances

Le projet iNTeg-Risk débouchera à terme sur un guichet Internet unique (*one stop shop*) permettant de mettre à disposition des connaissances actualisées en permanence sur les risques émergents et de créer une véritable communauté d'expertise pour leur maîtrise.

Par ailleurs, le projet a entrepris la préparation d'un CEN Workshop Agreement pour capitaliser les résultats du projet dans une série de documents à caractère normatif. Ce travail est également effectué en liaison avec le groupe de l'ISO en charge de la norme ISO 31 000 (Management des risques).

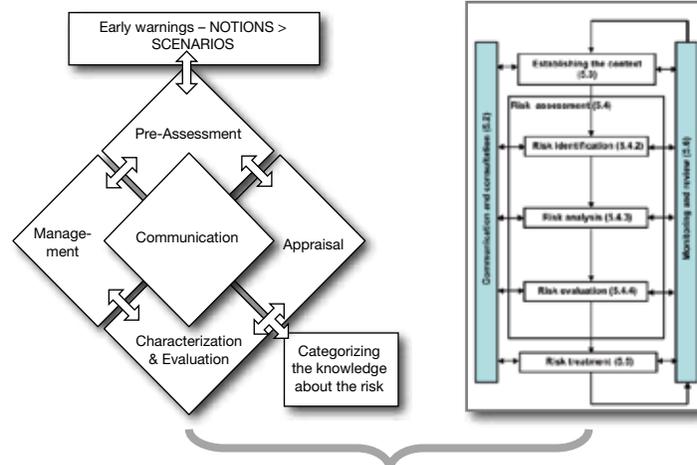
### CONCLUSION

La réflexion sur les risques technologiques émergents est encore en pleine évolution dans le cadre du projet iNTeg-Risk. Dans un tel contexte, l'INERIS, en tant qu'organisme national de référence sur les risques, continue son investissement européen en restant mobilisé et investi dans cette recherche. À ce niveau, l'INERIS s'intéresse particulièrement à ce que cette recherche reste à l'écoute des attentes des parties prenantes pour leur apporter des réponses et pour s'assurer que les outils développés permettront une véritable approche intégrée alliant l'ensemble des dimensions: technique, humaine, organisationnelle, sociétale, réglementaire.

Chabane Mazri et Bruno Debray

#### Note

1. EU-VRI: GEIE dont l'INERIS est membre fondateur.



### ERMF

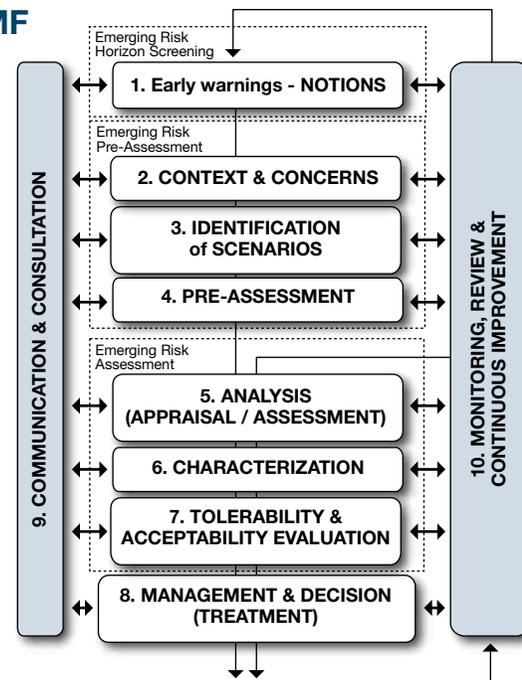


Figure 1

Cadre formel de gestion des risques émergents proposé au sein d'iNTeg-Risk.

## ABSTRACT

If science and technology bring more and more comfort into our everyday way of life, the technical, behavioral and social changes they introduce quickly modify the portfolio of risks we need to handle.

Risk governance has thus entered an era where technical and organizational answers need to be brought as fast as the society evolves. More than that, it is sometimes highly preferable for risk governance to anticipate some of those changes so to avoid the emerging of adverse and irreversible consequences.

The concept of emerging risks identifies all new or evolving risks that require new ways of dealing with. CO<sub>2</sub> storage and sequestration, nanotechnologies or impacts of natural hazards on industrial facilities are examples of new or evolving risks.

The iNTeg-Risk project in which INERIS has been highly involved aimed to develop, according to 17 real cases studies, an innovative and unified set of paradigm, framework and methodologies to help stakeholders dealing with all dimensions (technical, human, organizational and regulatory) related to those types of risks.

# Nouvelles filières techno- logiques



## Interview



**Henri Molleron,**  
Directeur  
Environnement  
COLAS SA

# Analyser les risques en toute indépendance

### **En quoi l'accompagnement du développement des nouvelles filières technologiques en matière de maîtrise des risques est-il important et quel rôle l'INERIS peut y jouer?**

— **H. M.:** Avec les nouvelles filières technologiques, nous sommes dans le cadre du principe de précaution, tel qu'il est rédigé dans la charte adossée à la Constitution: il y a une véritable incertitude scientifique et c'est donc aux pouvoirs publics d'organiser un encadrement renforcé de la poursuite des travaux; les nanotechnologies ont depuis le début été considérées comme un bon exemple d'application de ce principe. L'équilibre est très difficile à concevoir puisqu'on soupçonne le risque sans en connaître véritablement la nature et qu'on a la volonté de continuer d'aller de l'avant, notamment pour mieux connaître ce dont il s'agit vraiment. Pour être crédible dans la conception et la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées (*cf. la Charte*), il faut être indépendant des intérêts économiques concernés, compétent sur les plans technique et scientifique, ouvert aux progrès de la connaissance et respecté de tous. N'est-ce pas au fond, la meilleure définition qu'on puisse donner de l'INERIS et de son histoire?

### **La certification volontaire est-elle une réponse possible pour attester d'un niveau suffisant de maîtrise de la sécurité, particulièrement quand les connaissances sont encore lacunaires?**

— **H. M.:** Cette question de la certification sur un sujet aux connaissances lacunaires est un véritable paradoxe, surtout si l'objectif est de maîtriser les risques. Comment, en effet, les maîtriser si on ne les connaît pas vraiment? Comment certifier selon un référentiel qui n'est pas encore éprouvé? À l'inverse, on sent bien que l'idée d'une méthode

rigoureuse pour évaluer les risques et accompagner au plus près la démarche, à l'avancement de la recherche et du développement, est bien la seule façon d'accéder à un certain degré de confiance dans de tels travaux. Cette démarche ne peut être que volontaire car elle repose sur un dialogue total entre les équipes objets de la certification et leur certificateur. Il faut, toutefois, faire attention à la communication autour de cette notion de certification: il ne s'agit pas de certifier un résultat (le niveau de risque maîtrisé), mais plutôt de certifier la qualité d'une démarche ou d'un processus de précaution.

### **Dans la filière captage, transport, stockage du CO<sub>2</sub>, en quoi l'approche de l'INERIS, qui propose une méthode d'analyse intégrée des risques, est-elle originale?**

— **H. M.:** Avec la filière de captage, transport et stockage du CO<sub>2</sub>, on n'est pas dans le principe de précaution parce que la science elle-même est connue, mais il faut appliquer tous les savoirs de prévention au risque industriel d'une nouvelle filière, ce qui est le domaine de compétence le plus ancien de l'INERIS. Si je me limite à l'aspect du stockage, qui est le plus médiatisé (ce qui est regrettable, car les risques ne sont pas mineurs sur le transport, par exemple), l'INERIS était idéalement positionné pour en faire l'analyse de risque: connaissance scientifique pointue sur les cavités souterraines, les milieux salins et la mécanique des sols et des roches, de par son expérience minière; savoir-faire développé en analyse des risques; intégration pluridisciplinaire des retours d'expérience (domaine de l'expertise), de la modélisation, de l'expérimentation et de l'instrumentation en grand, etc. Fort peu d'instituts sont capables d'intégrer autant d'aspects différents d'une telle question en leur sein: c'est toute la force de l'INERIS par rapport au découpage du sujet en objets scientifiques spécifiques pour une recherche académique.



## Contributeurs



Olivier  
Bour



Régis  
Farret



Philippe  
Gombert



Corinne  
Hulot



Alain  
Thoraval

# La filière captage et stockage du CO<sub>2</sub>

## Références

[1] Celia M.A., Bachu S., Nordbotten J.M., Gasda S.E., Dahle H.K., *Quantitative estimation of CO<sub>2</sub> leakage from geological storage: analytical models, numerical models and data needs*, In Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Volume 1: Peer-Reviewed Papers and Plenary Presentations (E.S. Rubin, D.W. Keith and C.F. Gilboy, ed.), 2004, IEA Greenhouse Gas Programme, Cheltenham, UK.

[2] Damen K., van Troost M., Faaij A., Turkenburg W., *A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO<sub>2</sub> capture and storage, Part A: "Review and selection of promising conversion and capture technologies"*, Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006), pp. 215-246.

[3] Farret R., Gombert P., Salmon R., Toulhoat P., *Definition and application of a method for risk analysis of CCS combining CO<sub>2</sub> and impurities, long-term and short-term issues. Sustainable Fossil Fuel for Future Energy*, Rome, 6-9 July 2009.

[4] Farret R., Bour O., Hulot C., Gombert P., *État de l'art et analyse des risques pour un stockage de CO<sub>2</sub> en aquifère salin*, rapport INERIS-DRS-10-100887-12619A, pgr 190 EVARISTE, publié en janvier 2011.

[5] Gombert P., Farret R., Lahaie F., *Adaptation des outils d'analyse de risques aux futurs complexes de stockage géologique de CO<sub>2</sub>. Tunnels et ouvrages souterrains*, 2009, n° 213, pp. 142-154.

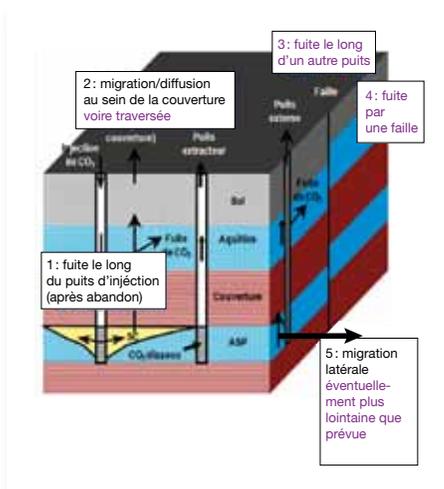
La filière captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CSC) figure parmi le panel de solutions envisagées pour réduire la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), principal gaz contribuant à l'effet de serre. L'objectif est de le piéger dans le sous-sol de manière sûre et permanente comme l'exigent les réglementations française et européenne, la période de temps concernée étant de l'ordre de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'années.

Sans préjuger du développement de la filière CSC par rapport aux autres options pour lutter contre l'effet de serre, l'INERIS étudie les risques liés à l'ensemble de la filière, incluant captage, transport et stockage – et donc à la fois les risques à court et à long terme. En ce qui concerne le stockage, nous nous sommes en priorité attachés à l'impact de l'injection de CO<sub>2</sub> à l'état supercritique en aquifère salin profond. Toutefois, certains phénomènes étudiés dans ce cadre sont également pertinents dans le cas des gisements d'hydrocarbures déplétés (ou en fin de vie). Le travail présenté ici se situe dans le cadre du programme de recherche EVARISTE de l'INERIS, que vient compléter un état de l'art sur les risques réalisé en collaboration avec l'Ademe (étude Eureka). D'autres actions ont lieu par ailleurs dans le cadre de projets menés en collaboration avec d'autres partenaires (financement Ademe, ANR, ou Union européenne).

En premier lieu, le travail réalisé par l'INERIS permet d'exposer les principes d'une méthode d'analyse des risques applicable à l'ensemble de la filière CSC: elle se fonde à la fois sur les pratiques en analyse des risques industriels, sur la connaissance des processus ayant lieu dans le

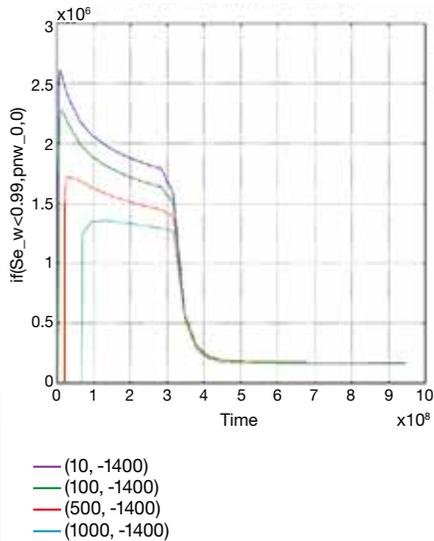
sous-sol, et sur l'état de l'art en analyse des risques sanitaires pour les substances chimiques. Cela nous a permis d'identifier, de manière générique, l'ensemble des scénarios possibles concernant le stockage souterrain. À ce jour, peu de travaux considèrent les scénarios de risque dans leur globalité, depuis les causes jusqu'aux impacts (santé humaine, enjeux vulnérables), et aucun ne tente de les hiérarchiser. L'INERIS a ainsi défini une typologie exhaustive en huit familles de « phénomènes impactants », c'est-à-dire susceptibles de causer des impacts sanitaires ou environnementaux: phénomènes de type hydraulique (montée en pression des fluides et modification des écoulements); mécaniques (fissuration, montée des terrains, voire sismicité induite); migration (ou fuites) de CO<sub>2</sub> vers les aquifères sus-jacents (pollution) et vers la surface (émanation), voire émission massive en surface; phénomènes de migration impliquant d'autres substances que le CO<sub>2</sub> (impuretés). Précisons qu'en complétant avec incendies et explosion/éclatement, qui sont exclusivement liés aux installations de surface, on obtient les dix « phénomènes impactants » pour l'ensemble de la filière, établis dans le cadre du projet iNTeg-Risk.

Les évolutions – normale et altérée – du stockage devront être considérées dans l'analyse des risques potentiels. Une situation « altérée » diffère de la situation « normale » en ce que l'évolution du site ne correspond pas aux prévisions. Cela peut être dû soit à des défaillances ou événements spécifiques (séisme exogène, défaut de cimentation d'un puits, atteinte d'une faille non détectée), soit aux cas où des paramètres du stock-



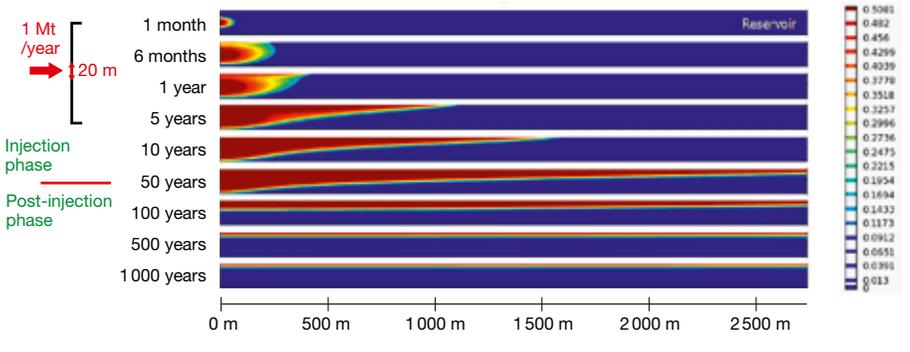
**Figure 1**  
Les principaux chemins de fuites à partir du stockage. En violet: scénarios n'apparaissant qu'en évolution «altérée».

Évolution temporelle de la surpression de CO<sub>2</sub>



**Figure 2**  
Évolution de la surpression de CO<sub>2</sub> en fonction du temps (chaque courbe est un point différent, au toit du réservoir) – modélisation INERIS avec le code COMSOL.

Iso-values of CO<sub>2</sub> effective saturation



**Figure 3**  
Évolution du panache de CO<sub>2</sub> au sein du réservoir en évolution normale – modélisation INERIS avec le code COMSOL.

kage ne posséderaient pas les valeurs prises en compte lors de la conception du projet: couverture plus perméable que prévu, surpression plus importante suite à l'injection, etc. En phase de stockage à long terme, même en évolution normale, des processus géochimiques verront le jour, non seulement au niveau du puits (corrosion ou altération des ciments) mais surtout au sein du réservoir: l'INERIS a ainsi montré que le CO<sub>2</sub> joue un rôle significatif dans la mise en solution de certains éléments métalliques: il est toutefois difficile d'estimer, à ce jour, la cinétique de ces processus, et donc de savoir si un impact significatif est prévisible à long terme. Nos travaux sur ce thème se poursuivent.

Nous avons ensuite sélectionné quatre scénarios de fuite: en évolution normale, la fuite au travers d'un puits d'injection après abandon et le flux diffus par la couverture et, en évolution altérée, la fuite par un ancien puits non colmaté, ou par une faille supposée perméable (figure 1). Ils ont ensuite été quantifiés à l'aide de modèles numériques, de façon à estimer les transferts de CO<sub>2</sub> (figures 2 et 3). Selon une approche volontairement simplifiée, les impuretés susceptibles d'accompagner le CO<sub>2</sub> injecté sont prises en compte, dans la mesure où certaines (gaz annexes, métaux, composés organiques) peuvent être toxiques (figure 4): en cas de fuite, elles sont alors susceptibles soit de contaminer un aquifère sus-jacent, soit de rejoindre la surface et →

## Références

[6] Gombert P., Farret R., *Definition of a risk analysis method combining long-term and short-term issues*, CO<sub>2</sub>NET Annual Seminar 2009, Trondheim (N), 18-19 June 2009 [Poster].

[7] Iding M., Ringrose P., *Evaluating the impact of fractures on the long-term performance of the In Salah CO<sub>2</sub> storage site*, Energy Procedia 00/2008, 8 p.

[8] Kharaka Y. K., Thordsen J. J., Hovorka S. D., Nance H. S., Cole D. R., Phelps T. J., Knauss K. G., *Potential environmental issues of CO<sub>2</sub>-storage in deep saline aquifers: geochemical results from the Frio-1 brine pilot test*, Texas, USA. App. Geochemistry 24 (6), 2009, pp. 1106-1112.

[9] Kirchsteiger C., *On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 12, 1999, pp. 399-419.

[10] Nordbotten J., Vetski D., Celia M., Bachu S., *Model for CO<sub>2</sub> Leakage Including Multiple Geological Layers and Multiple Leaky Wells*, Environmental Science & Technology, 43 (3), pp. 743-749, Dec. 2008.

[11] Savage D., Maul P. R., Benbow S., Walke, R. C., *A generic FEP database for the assessment of long-term performance and safety of the geological storage of CO<sub>2</sub>*, Quintessa Report QRS-1060A-1, 2004.

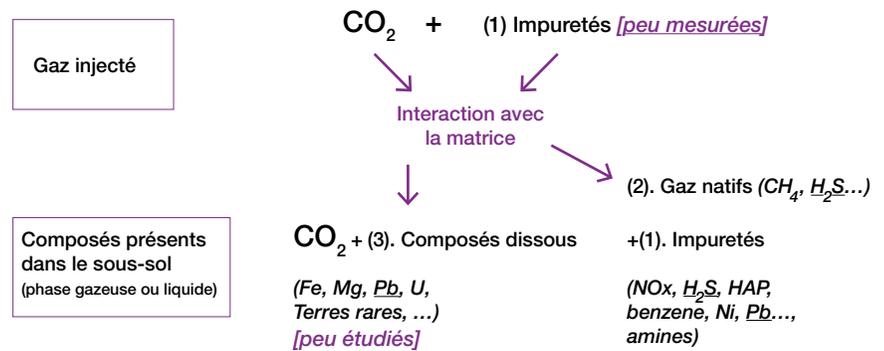
[12] Thoraval A., Farret R., Cherkaoui A. and Gombert P., *Evaluation of CO<sub>2</sub> Leakages from an Aquifer Storage*, COMSOL Conference, 17-19 Nov. 2010, Paris.

[13] Thoraval A., Farret R., Houdu E., Le Guen Y. Le Meur R., *Evaluation of CO<sub>2</sub> leakage to aquifers and the surface from a multiscale approach combining flow along the wellbore and the overburden*, 6th conference on CO<sub>2</sub> Capture, Transport and Storage TCCS-6, Trondheim, June 14-16, 2011.

[14] Toulhoat P., Gombert P., Farret R., Thoraval A., Senfaute G., "Long-term safety issues in geological storage of CO<sub>2</sub>", *Deep Saline Aquifers for Geological Storage of CO<sub>2</sub> and Energy*, 27-29 May 2009, Rueil-Malmaison (France).

[15] Wilday J., Farret R., Hebrard J., Breedveld L., Paltrieli N., *Methodology and models for assessing the emerging risk related to the CO<sub>2</sub> capture and storage technology*, Summary report, SP1, P 1.2, INTeg-Risk project, 2011.

**Figure 4**  
Les trois principaux types de substances annexes, incluant les impuretés co-injectées (1). Quelques substances sont mentionnées à titre indicatif : lorsqu'une même substance intervient dans différents types (1), (2) ou (3), elle est soulignée.



→ d'avoir des impacts en cas d'émanation au sein d'un local non ventilé (de type cave).

Nous avons alors réalisé une première estimation des impacts sanitaires de ces scénarios, en comparant les valeurs de concentrations ainsi obtenues avec les valeurs limites de gestion dans l'eau potable ou dans l'air (aussi appelées concentrations critiques). Pour les impacts dans les aquifères, on en déduit que les substances les plus préoccupantes sont le plomb, le nickel et le mercure, et que, selon les hypothèses prises, c'est en cas de fuite le long d'un puits externe (mal colmaté) que l'impact des impuretés sera le plus préoccupant – et, dans une moindre mesure, en cas de fuite le long d'une faille initialement non détectée: il s'agit de deux scénarios d'évolution altérée.

Pour l'impact sanitaire par inhalation, une simple approche comparative entre les diffé-

rentes substances a été menée, permettant de montrer, par exemple, qu'en cas d'émanation importante en surface, les composés chlorés (tri- et tetra-chloroéthylène) ainsi que le naphthalène et le benzène sont potentiellement plus préoccupants que le CO<sub>2</sub> lui-même.

Il faut signaler que, pour simplifier, certaines hypothèses ont été adoptées: d'une part, il existe très peu d'informations sur les teneurs en substances polluantes dans le CO<sub>2</sub> en sortie de procédé de captage, et nous avons pris comme base les concentrations dans les fumées de combustion, après avoir mené une recherche spécifique sur les émissions atmosphériques industrielles; d'autre part, une éventuelle filtration ou absorption de ces substances lors de la traversée des couches géologiques n'a pas été prise en compte. Ces premiers résultats sont à compléter, en affinant les hypothèses de modélisation des scénarios

retenus, en étudiant d'autres scénarios, et en intégrant l'impact environnemental, pour lequel le calcul quantitatif n'a pas encore été mené à bien. Ces travaux se poursuivent dans le cadre du programme de recherche EVARISTE, mais également au travers d'autres projets menés en partenariat avec industriels et organismes de recherche.

L'INERIS constate que dans une optique de maîtrise des risques, deux éléments semblent des prérequis indispensables avant toute décision sur un stockage éventuel. Le premier élément consiste à préciser les critères de choix d'un site de stockage: la structure géologique et les propriétés mécaniques du réservoir, la forme et l'épaisseur de la roche-couverture ainsi que sa perméabilité, l'absence d'hétérogénéité, seront autant de facteurs essentiels pour la sécurité de l'homme et la protection de l'environnement. Le deuxième élément consiste à cumuler, dès le stade de la conception, les mesures de maîtrise du risque (ou barrières de sécurité) pour limiter les fuites et les perturbations, à court comme à long terme. En outre, un souci émergent, et transverse à l'ensemble de la filière, est celui de la gestion des impuretés: il nous faut absolument mieux connaître les impuretés collectées avec le CO<sub>2</sub> au niveau des installations de captage, limiter leur concentration et enfin les intégrer dans les mesures de surveillance à long terme.

## ABSTRACT

INERIS is carrying out a research programme –named EVARISTE– devoted to the long-term effects of CO<sub>2</sub> geological storage.

The first issue that was highlighted in 2010 activities is the complete definition of risk scenarios. They include the different migration pathways within the underground system, but also mechanical or hydraulic effects and massive leakages at surface level, since the objective of INERIS is to harmonise risk assessment methods between surface and underground equipment (alike in the iNTeg-Risk project, devoted to new technologies). A specific care was given to the distinction between scenarios of "normal evolution" and scenarios of "altered evolution".

The second main issue was the study of 4 specific migration pathways and their possible impacts, both on overlying aquifers and at surface level (health effects in case of emanation and accumulation). A specific care was given in the study of impurities that are likely to be present in the injected CO<sub>2</sub>, such as trace metals or organic compounds. Given the specific assumptions that were made for this generic study, these impurities may have an impact superior to the impact of CO<sub>2</sub> itself.


**Contributeurs**

**Régis  
Farret**

**Jérôme  
Hébrard**

**Alain  
Thoraval**
**FOCUS**

# LE VOLET CO<sub>2</sub> iNTeg-Risk

Dans le cadre du projet européen iNTeg-Risk (voir article pages 12-14), le *Carbon Capture and Storage* (CCS) a été étudié comme de nombreuses autres nouvelles technologies, en partenariat avec le *Health and Safety Laboratory*, UK (HSL).

Sur le plan de l'analyse du risque, l'INERIS a ainsi défini les huit « *top events* » (ou « phénomènes impactants ») pour l'ensemble de la filière, qui regroupent notamment: les fuites massives de CO<sub>2</sub> sur les installations de surface ou en provenance des puits, les émanations plus diffuses en surface à plus long terme, la pollution d'une nappe soit par le CO<sub>2</sub>, soit par des substances annexes (substances co-injectées ou éventuellement remobilisées par acidification du milieu souterrain), et enfin les phénomènes hydromécaniques en milieu souterrain (transmission d'une surpression, événements sismiques induits ou remontée des terrains). Pour l'ensemble de ces phénomènes, des arbres des causes ont été définis avec l'outil OSQAR (*Operational Safety barriers, Quantification and Assessment of Risks*) selon une méthode inspirée d'ARAMIS, en partenariat entre HSL et INERIS.

S'agissant d'un exercice générique relatif à l'ensemble de la chaîne CCS, les trois principales technologies de captage ont été considérées: postcombustion, oxycombustion et précombustion.

L'INERIS a également quantifié des scénarios types pour les fuites massives sur des canalisations et pour les migrations en milieu souterrain; les lacunes et besoins de développement scientifiques ont également été identifiés.

Sur le plan de la gestion du risque, HSL et INERIS ont mis tout d'abord l'accent sur les spécificités de cette nouvelle filière et, en premier lieu, sur la nécessité de concilier les échéances de court terme (installations de surface) et de long terme (stockage souterrain), mettant en jeu des incertitudes de natures différentes et des modalités de gouvernance différentes. Conformément aux objectifs du projet iNTeg-Risk, des indicateurs de performance (KPI, *Key Performance Indicators*) ont été identifiés, concernant autant l'analyse technique du risque que la réglementation et la reconnaissance sociétale de la filière – par exemple, pour ce qui concerne les incertitudes des phénomènes à long terme, on pourra rechercher le consensus entre experts, mais aussi organiser la collecte systématique du retour d'expérience, incluant la détection de fuites et la possible modification des usages des sols au niveau local.



## Contributeurs



Samantha  
Lim



Laurent  
Dupont

# Captage du CO<sub>2</sub>

## Le projet OXYCOMB

La Commission européenne a adopté en mars 2011 une feuille de route fixant l'objectif de réduire d'ici à 2050 de 80 à 95 % ses émissions de gaz à effet de serre, par rapport à leur niveau de 1990.

Des technologies de captage de CO<sub>2</sub> à la source, avant son émission vers l'atmosphère, se développent.

Il convient de s'assurer que les risques pouvant se présenter au cours des différentes étapes de mise en œuvre de ces technologies (captage, compression, transport, stockage sur de très longues périodes...) sont bien identifiés, évalués et maîtrisés.

En ce qui concerne le captage, trois principales techniques sont aujourd'hui envisagées, dérivées pour la plupart de celles mises en place dans l'industrie pétrolière et gazière. Il s'agit de :

- la postcombustion, qui est le procédé le plus avancé au niveau technologique. Il implique l'extraction du CO<sub>2</sub> des fumées de combustion à l'aide de solvants ;
- la précombustion, technique qui induit une transformation du combustible en gaz de synthèse dont est, dès le départ, soustrait le CO<sub>2</sub> ;
- l'oxycombustion, qui résulte d'une combustion en présence d'une atmosphère enrichie en oxygène, ce qui permet d'obtenir des volumes de fumées réduits et concentrés en CO<sub>2</sub>.

La mise en œuvre de ces procédés de captage s'avère cependant délicate et nécessite encore des travaux de recherche visant à optimiser les rendements pour réduire les coûts de mise en œuvre et à assurer les performances en matière de sécurité et d'impact sur l'environnement.

### Le projet OXYCOMB

L'INERIS et le laboratoire de Génie des procédés industriels de l'Université technologique de Compiègne (UTC), avec la plateforme d'essais « Procedis », se sont associés pour le projet OXYCOMB. Financé par l'Ademe, ce projet, d'une durée de dix-neuf mois, débuté en 2008, visait à concevoir, valider et optimiser un procédé d'oxycombustion du gaz naturel en intégrant l'aspect sécurité dès la conception du pilote de 300 kW.

Le but de ce projet de recherche était l'amélioration des connaissances dans le domaine de la technologie d'oxycombustion et la conception d'un procédé intrinsèquement sûr, au travers de trois objectifs :

- mise en œuvre d'une installation préindustrielle d'oxycombustion avec recyclage des fumées et séparation du CO<sub>2</sub> produit par condensation, et optimisation des paramètres d'exploitation, notamment en termes de récupération d'énergie calorifique et de qualité du CO<sub>2</sub> produit ;
- analyse de la composition des fumées de combustion avec identification et quantification des impuretés ;
- définition des critères de sécurité et des règles de bonnes pratiques nécessaires au dimensionnement d'installations d'oxycombustion, afin que les risques soient pris en compte dès la conception des installations et maîtrisés lors de l'exploitation.

### Principe de l'oxycombustion

L'oxycombustion consiste à réaliser une combustion à l'oxygène pur et non pas à l'air pour obtenir des fumées concentrées en CO<sub>2</sub> à 90 %. Avec le recyclage d'une partie du CO<sub>2</sub> en substitution de l'azote de l'air, l'oxycombustion est un procédé adaptable à une installation existante.

Une fois que les fumées riches en CO<sub>2</sub> ont été obtenues, le CO<sub>2</sub> doit alors être purifié et comprimé. Étant donné la richesse des fumées en CO<sub>2</sub>, un procédé frigorifique fonctionnant autour de 223 K (-50 °C) est préconisé pour séparer le CO<sub>2</sub> des gaz non condensables, tels que l'argon, l'oxygène ou l'azote.

### Résultats

Une étude expérimentale des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité du mélange CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> a permis de compléter les données issues de la littérature (diagramme d'explosivité, caractéristiques de la violence de l'explosion et d'auto-inflammation du mélange). Ainsi, lorsque la concentration en CO<sub>2</sub> augmente, le domaine d'explosivité diminue. L'influence significative de l'oxygène sur la violence de l'explosion ainsi que le pouvoir inertant du CO<sub>2</sub> ont été mis en évidence.

Sur la base de ces données expérimentales et du retour d'expérience sur des installations de combustion conventionnelles, une analyse des risques a été menée sur l'installation pilote sur les différentes phases de fonctionnement de l'installation (démarrage, exploitation, arrêt, maintenance).

Elle a mis en évidence les scénarios d'accident qui pouvaient affecter les personnes et l'environnement. Les principaux risques sont similaires à ceux rencontrés sur des installations de combustion conventionnelles mais avec des termes sources différents, à savoir l'inflammation spontanée ou retardée de gaz naturel, l'éclatement de capacité par surpression ou encore la dispersion de gaz toxiques, tel le CO ou le CO<sub>2</sub>.

L'analyse des risques a ainsi permis de préconiser des mesures techniques et organisationnelles

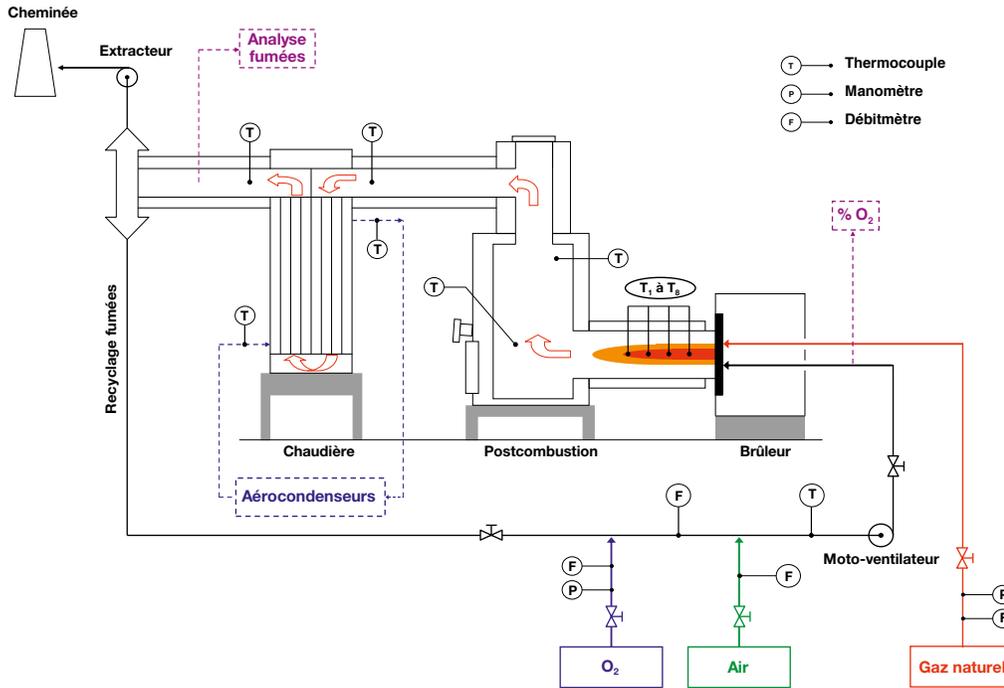


Figure 1  
Schéma de l'installation modifiée.

Figure 2  
Domaine d'explosivité des mélanges méthane/oxygène/dioxyde de carbone.

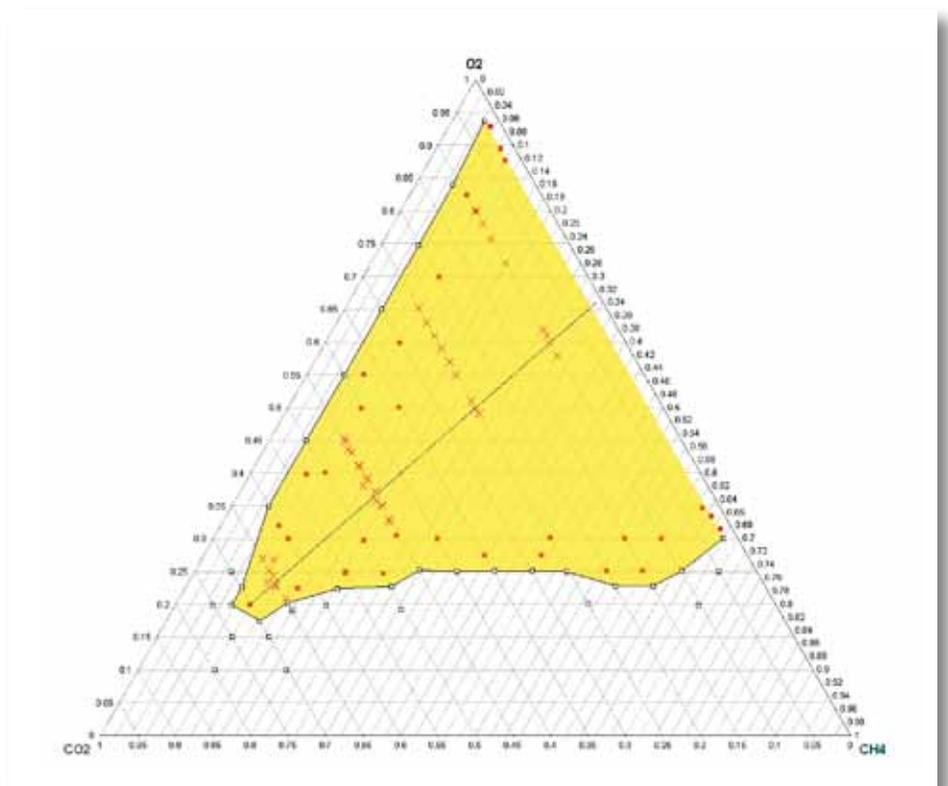
tant en prévention qu'en protection ainsi que des règles de bonnes pratiques nécessaires au dimensionnement d'installations d'oxycombustion (étanchéité, taux de recirculation des fumées, matériaux, etc.).

D'un point de vue expérimental sur le pilote, il s'agissait, d'une part, d'optimiser les paramètres d'exploitation de l'oxycombustion, notamment au niveau de la récupération d'énergie calorifique et de la qualité du CO<sub>2</sub> produit, et d'autre part, d'analyser la composition des fumées de combustion notamment en identifiant et en quantifiant les différentes impuretés.

Il a ainsi été possible de maintenir des conditions opératoires similaires à la combustion à l'air en jouant sur le taux de recyclage pour ajuster la richesse du comburant en O<sub>2</sub>. Sur l'installation utilisée, nous avons pu déterminer qu'une richesse de 24-25 % en O<sub>2</sub> est nécessaire pour retrouver des profils de température semblables à ceux observés en combustion à l'air.

Aussi, l'oxycombustion permet-elle une amélioration notable de la qualité du transfert de chaleur. En effet, les fumées obtenues sont riches en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O et ont donc un coefficient d'absorption supérieur aux fumées de combustion à l'air, ce qui améliore le transfert de chaleur par rayonnement.

En raison de la faible teneur en N<sub>2</sub> dans les fumées, l'oxycombustion offre également l'opportunité de réduire de façon considérable les émissions d'oxydes d'azote (NOx). Toutefois, l'installation ne pouvant pas être parfaitement étanche, les infiltrations d'air ont maintenu une teneur non négligeable de NOx dans les fumées, mais pour un débit de fumées plus faible en oxycombustion qu'en combustion conventionnelle.



**PERSPECTIVES**

En raison de ces coûts d'investissement relativement élevés, la technique d'oxycombustion apparaît comme plus adaptée aux sources importantes et concentrées d'émissions telles que les centrales électriques (au gaz naturel ou au charbon).

Les principaux axes de progrès qui permettraient le déploiement à grande échelle de la technologie

d'oxycombustion se situent au niveau de la séparation de l'oxygène de l'air (coût, consommation d'énergie) et des équipements de séparation du CO<sub>2</sub> (dimension, efficacité).

À titre indicatif, la consommation d'énergie de l'apport en oxygène pur pour une centrale à charbon d'une puissance de 500 MW fonctionnant 8 000 heures par an représenterait 15 % de sa production électrique annuelle. →

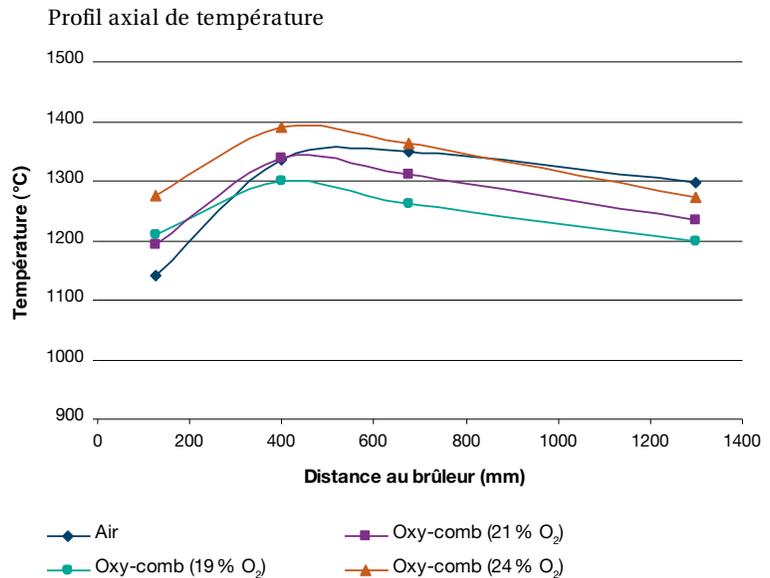
→ Compte tenu des taxes à l'émission de CO<sub>2</sub>, l'application de la technique d'oxycombustion à une centrale électrique actuelle semble être une excellente opportunité pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à court terme.

Cependant, ces techniques doivent impérativement être associées au panel de solutions existantes pour limiter les rejets de CO<sub>2</sub> : le développement des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité thermique des industries et des bâtiments ou encore la sobriété énergétique.

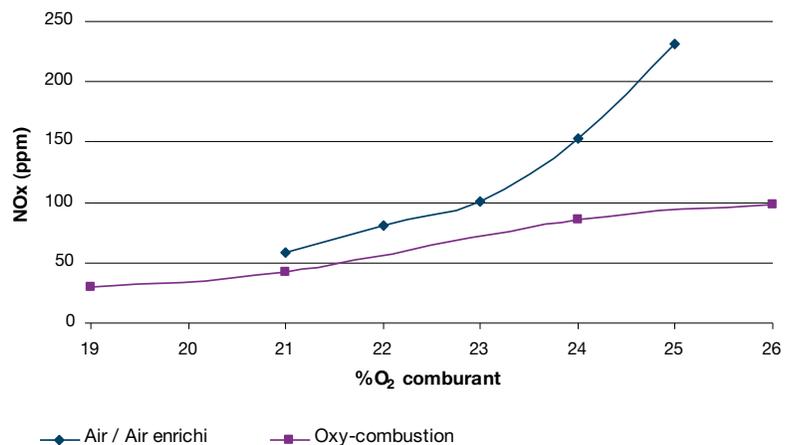
#### Figures 3 et 4

3 Profil de température – Influence de la richesse du comburant : Comparaison : Combustion à l'air / oxycombustion (Excès d'O<sub>2</sub> : 4%).

4 Émissions de NOx : Influence de la richesse du comburant (Excès d'O<sub>2</sub> : 4%).



#### Teneur en NOx: influence de la richesse du comburant



## ABSTRACT

Greenhouse gas emissions have to be drastically reduced to limit global warming effects. Fossil fuels (coal, natural gas and oil) represent 81 % of the global energetic mix in 2008 and coal is the second fuel source after oil but is the first in terms of CO<sub>2</sub> emissions. Thus, in addition to the long-term alternatives to be taken, considering the emergency, it becomes necessary to get viable technologies at disposal to offer several technical solutions to limit these greenhouse gas emissions. The CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) could contribute up to 20-33% of the desired CO<sub>2</sub> emission reduction. The main issue before deploying industrially these capture solutions is to face the technological constraints and to prevent industrial accidents which could delay its development.

INERIS and the Industrial process engineering laboratory of the Université Technologique de Compiègne (UTC) joined for the OXYCOMB project. This project (started in 2008 for 19 months) financed by the ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) aimed at designing, validating and optimising an oxycombustion process with natural gas integrating safety on a pilot unit of 300 kW. Inflammability and explosivity properties of the gas mixing were determined. Risk analysis were performed to identify the main accident scenarios and to propose technical and organisational recommendations at different levels (design, operation, maintenance). Experimentations on the pilot enabled to optimise the operating parameters of oxycombustion (recycling rate, O<sub>2</sub> excess concentration, heat transfer) and to analyse the flue gases impurities.



Jérôme Hébrard



Contributeur

# Transport du CO<sub>2</sub> par canalisation

## Évaluations des risques

Les projets France Nord (Ademe) et CO<sub>2</sub>PipeHaz (Commission européenne) sont focalisés sur la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu lors d'un rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, lors du transport de CO<sub>2</sub>. Les risques liés au transport sont ciblés spécifiquement car les réseaux sont plus vulnérables et plus difficiles à protéger que d'autres éléments de la chaîne. Or, à l'occasion d'une fuite accidentelle, on craint la formation d'un nuage dense de CO<sub>2</sub> qui maintiendrait au niveau du sol les polluants, éventuellement toxiques, véhiculés par le CO<sub>2</sub> (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NOx...).

Dans ce cadre, des connaissances sont recherchées, en particulier, sur les mécanismes de formation des nuages gazeux très denses, multiphasiques et sur les processus de détente brutale des fluides supercritiques, sujet pour lesquels il n'est pas certain que les outils de modélisation disponibles soient pertinents dans le cas de création de neige carbonique lors de la détente. Ces scénarios de fuite sont donc étudiés par l'INERIS pour produire des connaissances et des outils de base qui contribuent à une meilleure maîtrise des risques des installations de transport de CO<sub>2</sub>.

### 1 CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNÉES D'ESSAIS

#### Aspects thermodynamiques

Dans un premier temps, un banc expérimental à petite échelle a été monté pour observer les caractéristiques thermodynamiques de

mélanges de CO<sub>2</sub> et d'impuretés. Le travail est centré sur la construction d'un diagramme de Mollier en étudiant les propriétés pendant un rejet (et non de façon statique), afin de déterminer les chemins thermodynamiques tels que les isenthalpes, les isentropes et les isothermes. Ce dispositif expérimental décrit sur la **figure 1** est composé d'un autoclave, petit réservoir d'un litre pouvant supporter des pressions très élevées (de l'ordre de 1000 bars). Ce réservoir est utilisé comme calorimètre adiabatique (isolé thermiquement) équipé d'une tuyauterie de décharge. Les pressions et températures sont mesurées précisément, ainsi que la masse de produit présente dans l'autoclave. La tuyauterie de rejet est réglée thermiquement, les pertes

de charge et les variations de température le long de celle-ci étant connues.

Initialement, la pression et la température sont fixées. Ensuite, l'orifice au bout de la tuyauterie de décharge est ouvert. Les mesures des variations de température dans l'autoclave permettent de connaître l'évolution de l'énergie en fonction du temps pendant la décharge.

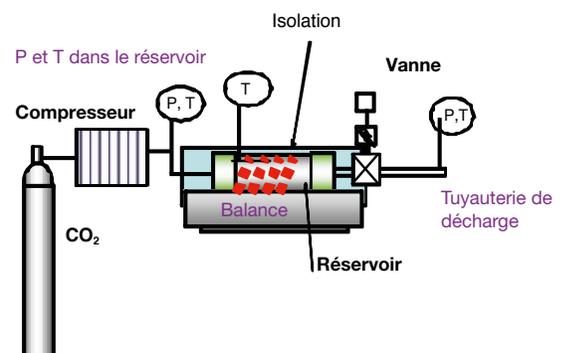
Les tests préliminaires ont montré qu'il est possible de mesurer avec précision la masse de produit en fonction du temps et ont permis de dimensionner la taille de la tuyauterie de décharge. Il est aussi possible de tracer l'évolution de l'enthalpie en fonction de la pression dans l'autoclave au cours du temps. La prochaine étape consistera à tracer le diagramme de Mollier pour des mélanges CO<sub>2</sub> + impuretés et quantifier l'influence de ces impuretés sur les caractéristiques thermodynamiques du CO<sub>2</sub>.

#### Rejets à moyenne échelle et dispersion atmosphérique

Un banc expérimental à moyenne échelle a été réalisé sur le site d'essais de la carrière de Montlaville pour étudier les caractéristiques de l'écoulement dans une canalisation et la dispersion atmosphérique du CO<sub>2</sub> →

Figure 1

À gauche: photo du calorimètre.  
À droite: schéma de principe.



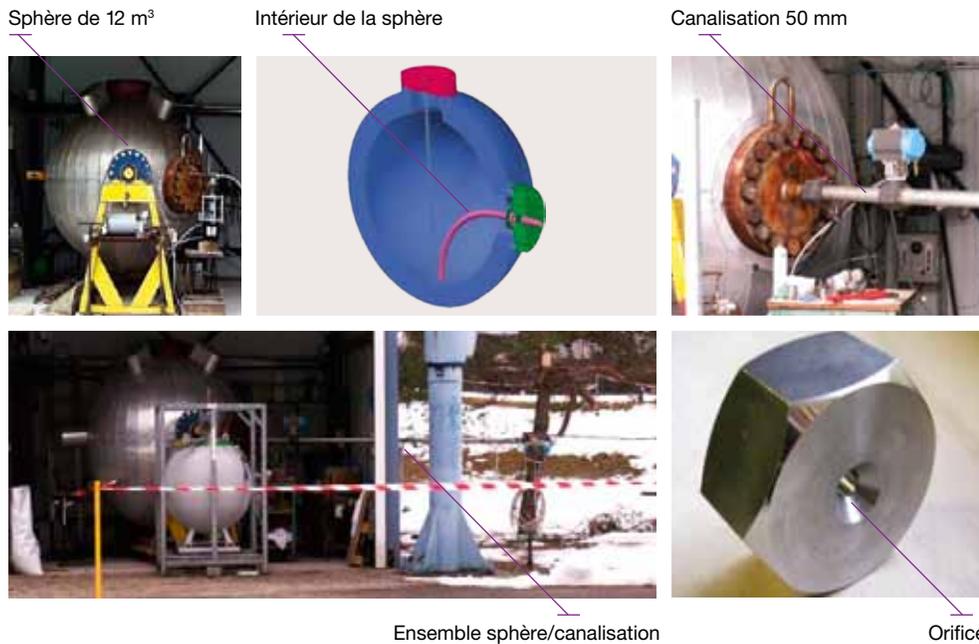


Figure 2

Photographies des différents éléments qui constituent le dispositif expérimental de rejet à moyenne échelle.

→ rejeté. Il est composé (figure 2) d'un réservoir sphérique de 12 m<sup>3</sup> de capacité, isolé thermiquement, équipé d'un système de chauffage et pouvant supporter des pressions pouvant atteindre 150 bars. Cette sphère est posée sur une balance pour mesurer la perte de masse pendant le rejet. Cette information est nécessaire pour recueillir le premier paramètre intéressant qui est le débit massique à l'orifice. La figure 3 montre, à gauche, l'évolution de la masse de CO<sub>2</sub> présente dans la sphère en fonction du temps et, à droite, le débit calculé en fonction du temps. Le cas présenté ici concerne un orifice de diamètre égal à 6 mm, petit devant le volume de la sphère. La perte de masse est linéaire, rendant la courbe de débit quasi-constante.

La sphère est connectée à un premier tronçon de canalisation de 50 mm de diamètre et de 6 m de long. Ce tronçon est soit directement terminé par un orifice, soit connecté à un second tronçon de canalisation d'un diamètre inférieur ou égal à 50 mm et qui peut mesurer jusqu'à 40 m de long. Des capteurs de température et de pression sont placés dans la sphère et dans le premier tronçon de 50 mm de diamètre.

Des capteurs de CO<sub>2</sub>, des oxygénomètres et des thermocouples sont placés de manière à ce que l'on puisse connaître pendant toute la durée du rejet la concentration et la température à tout endroit du nuage formé.

Un système de visualisation directe (caméras normale et rapide) est également utilisé pour observer l'évolution du nuage sous différents

angles (figure 4, gauche). Une caméra thermique permet également de mieux appréhender les mécanismes physiques mis en jeu lors du rejet.

Il est en effet possible de relier les concentrations en CO<sub>2</sub> avec les températures obtenues dans le nuage en considérant la dispersion adiabatique. On peut observer que les courbes de concentrations obtenues grâce aux oxygénomètres sont liées aux courbes de concentrations obtenues grâce aux thermocouples. Grâce à cette technique de mesures, le nuage est plus facilement et plus complètement instrumenté, les thermocouples ayant un temps de réponse plus rapide et étant plus faciles à mettre en œuvre que les capteurs CO<sub>2</sub> ou les oxygénomètres.

## 2 DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'ANALYSE ET D'ÉVALUATION DES RISQUES

Tout d'abord, il s'agit de développer un outil et, en particulier, de modélisation des conséquences d'une fuite de CO<sub>2</sub> en s'appuyant sur les mécanismes physiques mieux appréhendés grâce à la partie expérimentale.

Pour cela, deux étapes sont identifiées :

- faire un état de l'art des outils existants, vérifier l'utilité de ceux-ci afin d'identifier les potentiels de dangers et évaluer leur capacité à prévoir et à modéliser les conséquences ;
- développer des outils dédiés au CO<sub>2</sub> lorsque cela est nécessaire.

Puis une méthodologie d'évaluation des risques pour les canalisations de transport de CO<sub>2</sub> sera développée sur la base de la méthodologie ARAMIS.

### Outil de modélisation des conséquences existant

Lors d'une perte de confinement de CO<sub>2</sub>, les mécanismes physiques mis en jeu sont très complexes. Le comportement thermodynamique du CO<sub>2</sub> et la formation potentielle de neige carbonique compliquent le calcul du terme source. Beaucoup de développeurs de logiciels, communément utilisés dans le domaine du risque accidentel, ont adapté leurs modèles de calculs initialement dédiés aux gaz liquéfiés (ammoniac, chlore, GPL...) aux spécificités du CO<sub>2</sub><sup>1</sup>. Or, certaines propriétés sont très différentes entre les gaz liquéfiés « classiques » et le CO<sub>2</sub>. Par exemple, les modèles courants sont basés sur l'hypothèse que les enthalpies de vaporisation  $\Delta H_v$  sont indépendantes de la température. Or, pour le CO<sub>2</sub>,  $\Delta H_v$  est très dépendant de la température. Il n'est donc pas évident de prime abord qu'un modèle adapté à l'ammoniac le sera au CO<sub>2</sub>.

De plus, le CO<sub>2</sub> est transporté à des pressions supérieures à 100 bars, ce qui implique qu'en cas de rejet, une très forte décompression va faire chuter de façon drastique la température à la brèche entraînant la formation d'un écoulement multiphasique formé de neige carbonique (flocons de CO<sub>2</sub> en phase solide) de

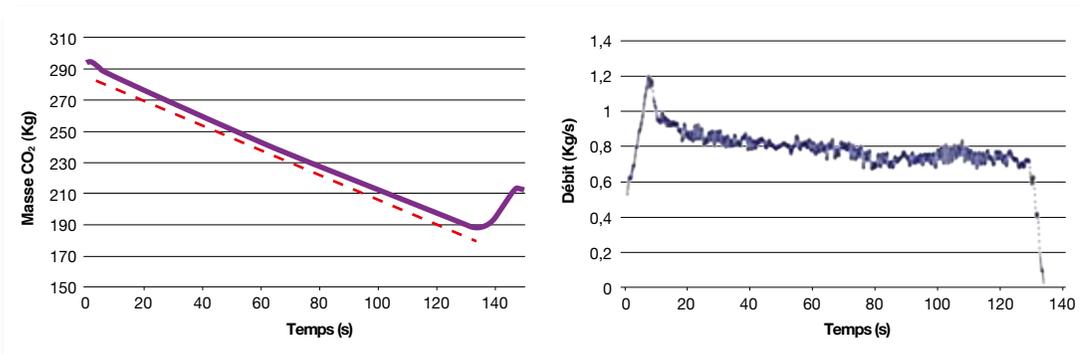


Figure 3

À gauche: masse de CO<sub>2</sub> dans la sphère en fonction du temps.  
À droite: débit calculé en fonction du temps.

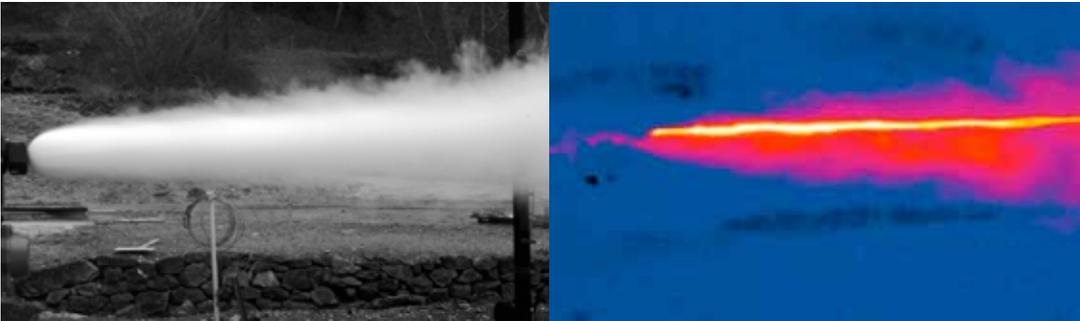


Figure 4

Vidéos de différents essais préliminaires (à gauche : caméra rapide, à droite : caméra thermique).

liquide et de vapeur (due à la fragmentation interne). La dispersion de ce mélange de gaz, de gouttelettes, d'aérosols et éventuellement de particules solides est un enjeu important pour la modélisation.

Les premiers tests de comparaison entre des logiciels commerciaux et les premiers essais confirment que les modèles utilisés ont tendance à surestimer les distances d'effets. Ces premiers résultats très partiels montrent que les modèles de calcul du terme source (débit à la brèche et fraction vaporisée) doivent être améliorés. En revanche, dans les conditions expérimentales considérées, et une fois le terme source adapté, les modèles de dispersion semblent donner des résultats acceptables.

Par ailleurs, les mécanismes de transition de phases dans la canalisation et en champ proche devront être modélisés de façon plus réaliste et prendre en compte les principaux mécanismes physiques.

#### Note

1. Antoine F., Hébrard J., Lacombe J.-M., *Assessment of the models for the estimation of the CO<sub>2</sub> releases toxic effects*, 12<sup>th</sup> International Conference on Multiphase Flow in Industrial Plant, ISCHIA.

## ABSTRACT

Nowadays, the CCS chain (carbon capture and storage) is considered as an interesting solution to fight the global warming by reducing CO<sub>2</sub> concentrations in the atmosphere. However, in case of massive accidental leak of CO<sub>2</sub>, which can be mixed with toxic impurities (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>...), this could lead to toxic effects in humans located in the nearby environment.

Between capture and storage, the pipeline transport is the part of the network the most vulnerable and the most difficult to protect. The development of a safe chain of CO<sub>2</sub> then requires to develop risk assessment methods dedicated to CO<sub>2</sub> transport by pipeline. This involves the production of new knowledge about the mechanisms of dense gas clouds dispersion, multiphase flows, and sudden process of relaxation of supercritical fluids. For this, several experiments are currently carried out at INERIS. Firstly, a thermodynamic set-up was built in order to determine the thermo-physical and thermodynamics data required for the formulation of the phase equilibrium model. Secondly, a mid-scale set-up allows to get the fluid flow pattern maps required for the formulation of the heterogeneous discharge model, the near-field particle size distribution and velocity profiles.

Further tests on a larger scale are planned to check that the current results and models could be extrapolated to massive releases of CO<sub>2</sub>. Some calculations carried out with dispersion softwares seem to provide different results in terms of hazardous distances for instantaneous or continuous releases. A focus on the models used by the softwares appears necessary to get a better understanding of this difference in the risk assessment context.



## Contributeurs



**Bastien  
Affeltranger**



**Guy  
Marlair**



**Olivier  
Salvi**



**Alexis  
Vignes**

## FOCUS

# CARBURANTS ALTERNATIFS AU KÉROSÈNE

## Projet ALFA-BIRD

### Références

[1] Marlair G., Brohez S., Rivière C., *Present and future Fire and explosion safety challenges impinging the biofuel industry*, Proceedings of the 9th International symposium of the International Association for Fire Safety Science, 21-26 September 2008, Karlsruhe, Germany.

[2] Marlair G., Demissy M., Brignon, J.-M., *Un nouveau challenge : offrir une alternative au kérosène.*, La Lettre Techniques de l'Ingénieur – Risques Industriels & Environnement, 2007, n° 6, pp. 10-11.

[3] Rivière C., Marlair G., Vignes A., Bouvart F., *Learning of the root factors of incidents potentially impacting the biofuel supply chains from some 100 significant cases*, 13th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Bruges, Belgique, 2010.

[4] Marlair G., Vignes A., Janès A., *On the fire and explosion risks profile of alternative fuels to kerosene in civil transportation aircrafts*, INTERFLAM, University of Nottingham, UK, Proceedings.

Le trafic aérien devrait doubler d'ici 20 ans, ce qui constitue un défi en termes d'émissions et de changement climatique. L'industrie aéronautique cherche donc à maintenir son taux d'émission de CO<sub>2</sub> à son niveau actuel jusqu'à 2020 et à diminuer de 50 % les émissions d'ici à 2050 (base 2005) [37th Session of the ICAO meeting, octobre 2010]. Cet objectif implique de mettre au point des alternatives au kérosène, carburant historique aux performances techniques (énergétique; sécurité) élevées. Dans ce contexte, le recours à des carburéacteurs biosourcés est aujourd'hui considéré comme une piste prometteuse. Les enjeux techniques, industriels et économiques sont majeurs.

**Projet Alpha-Bird et rôle de l'INERIS.** Cofinancé par le FP7 et par les fonds propres des partenaires, le projet Alfa-Bird est la réponse européenne aux initiatives américaines visant à faire émerger de nouveaux carburants dans le transport aérien civil et militaire. Le projet est un maillon important de la stratégie européenne portée par Airbus Operations (Groupe EADS) consistant à promouvoir le développement durable de carburants alternatifs au kérosène pétrolier. Alfa-Bird rassemble, pour une durée de quatre ans, 24 partenaires internationaux: universitaires, centres de recherche, industriels, établissements publics. Alfa-Bird couvre ainsi un large éventail de compétences en aéronautique, biochimie, combustion, sécurité industrielle, environnement et socio-économie. Le rôle de l'INERIS dans ce projet est double. D'une part, il est le leader des actions visant à étudier les risques associés à l'utilisation des carburants alternatifs tout au long de la chaîne d'approvisionnement jusqu'à l'entrée dans le réservoir. Cette partie de la recherche comporte des approches purement analytiques, et d'autres expérimentales. D'autre part, il contribue, en liaison avec le groupement d'intérêts économiques EU-VRi (Stuttgart), à l'analyse de la durabilité des filières de production/utilisation de carburants alternatifs d'un point de vue environnemental (analyse de cycle de vie) et socio-économique.

**Actualité et perspectives pour 2012.** À l'automne 2010, l'INERIS avait contribué à une étude extensive des familles de carburants bio-sourcés éligibles. La performance spécifique et globale de chacune avait été évaluée. Sur cette base, les partenaires du projet ont plus particulièrement retenu quatre carburants représentatifs de solutions ne remettant pas fondamentalement en cause la conception des avions et les infrastructures logistiques. Il s'agit du kérosène de synthèse ou FSJF (fully synthetic jet fuel), du kérosène paraffinique de synthèse (Fisher-Tropsch) ou FT-SPK, du FT-SPK + coupes naphthéniques et du FT-SPK + hexanol. En effet, le développement de nouveaux carburants se fait dans un cadre contraignant: celui d'une adaptabilité technique des flottes aéronautiques existantes. L'année 2012 doit être celle de la livraison des principaux résultats du projet. L'INERIS sera ainsi amené à se prononcer sur les aspects suivants:

- propriétés dangereuses (inflammabilité) des carburants alternatifs sélectionnés;
- compatibilité carburant/matériaux de la chaîne logistique;
- niveau de sécurité prévu par les normes existantes et la certification;
- problématiques « résistance au feu », « sécurité réservoir » et « lutte incendie »;
- scénarios accidentels à considérer (logistique d'approvisionnement de l'avion);
- bénéfices sociétaux : économie et emploi, environnement et santé, réglementation.

# Référentiel de certification

Les nouvelles filières technologiques, parmi lesquelles les filières industrielles stratégiques de l'économie verte<sup>1</sup>, sont au cœur des enjeux de croissance et de protection de l'environnement des pays développés comme des pays en développement. Pour autant, les sociétés modernes ne peuvent plus se satisfaire de technologies imparfaitement maîtrisées, comme l'illustrent en 2010-2011 les épisodes de nuages de cendres volcaniques en Europe et l'accident de Fukushima au Japon. La fragilité de ces technologies peuvent tenir à des aléas climatiques ou à des scénarios accidentels mal évalués.

L'accompagnement de l'innovation s'inscrit dans le contexte réglementaire et normatif, mais celui-ci est le plus souvent incapable d'évoluer au même rythme que le développement technologique. En pratique, il est nécessaire, pour rendre des innovations et les développements technologiques propres et sûrs, de s'appuyer sur le meilleur de l'état de l'art afin de conforter le déploiement des filières. Un exemple significatif est le véhicule décarboné, dont la diffusion sera facilitée grâce à la prise en compte aussi en amont que possible des contraintes d'acceptabilité sociale liées notamment à la sécurité.

Dans ce processus d'accompagnement de l'innovation, la certification volontaire est une forme structurée et transparente de validation, qui va plus loin que la validation par les pairs en matière de recherche et qui anticipe la validation s'appuyant à terme sur la réglementation.

Action amorcée en 2009 avec l'avenant Grenelle à son précédent contrat d'objectifs 2006-2010, la certification volontaire à l'INERIS a vu en 2010-

2011 son champ s'élargir à trois et bientôt quatre dispositifs positionnés dans les domaines privilégiés de l'Institut en matière de recherche amont et partenariale:

- nanotechnologies;
- technologies de stockage de l'énergie électrochimique: batteries pour véhicules électriques et hybrides rechargeables, pour utilisations stationnaires;
- éco-technologies;
- méthodes *in vitro* et *in silico*, alternatives à l'expérimentation animale, dans le cadre du Pôle national applicatif en toxicologie et en écotoxicologie animé par l'INERIS et du règlement REACH.

• L'INERIS a conçu et développé la certification volontaire Nano-Cert pour renforcer la sécurité des opérateurs au poste de travail en présence de nanoparticules, en l'adossant au plan national Nano-Innov lancé en 2009. La certification Nano-Cert s'est mise en place mi-2010, avec la délivrance des premiers certificats début 2011. Elle comporte deux volets. Le premier volet est la certification des compétences des opérateurs – et également des autres acteurs de la sécurité au poste de travail que sont les personnes chargées de la prévention des risques ou des interventions de secours – au travers d'une formation qualifiante. Le second volet est la certification liée à la mise en œuvre des meilleures techniques disponibles (MTD) pour les équipements de protection collectifs au poste de travail: ce volet nécessite des développements méthodologiques engagés en 2011 pour un déploiement en 2012. Le premier volet fait intervenir les organismes de formation de l'INERIS et des principaux centres de recherche publique et privé nationaux: CEA,

CNRS, industrie. Le second volet s'appuie sur des partenaires multiples: fabricants d'équipements, intégrateurs, ingénieries, industriels de la chimie, des cosmétiques, de la pharmacie... Cette certification Nano-Cert est l'une des illustrations majeures de la capacité de l'INERIS à articuler recherche scientifique et accompagnement de l'innovation.

• Avec les objectifs européens fixés en matière de réduction des gaz à effet de serre et de recours renforcé aux énergies renouvelables, le développement de l'électromobilité est au cœur du plan national « Véhicule décarboné », mis en œuvre en 2010. L'INERIS, s'inscrivant dans cet axe et en lien avec la plateforme STEEVE<sup>2</sup>, a élaboré de manière collective le référentiel ELLICERT pour la certification volontaire des cellules et packs formant les batteries pour véhicules électriques et hybrides rechargeables. Ces batteries, le plus souvent constituées d'éléments lithium-ion, sont évaluées dans des tests de sécurité électriques, thermiques et mécaniques prenant en compte la sécurité fonctionnelle du système de régulation appelé *Battery Management System* (BMS).

Ainsi, les fabricants de batteries, les constructeurs automobiles et gestionnaires de flottes, les experts nationaux du domaine (CEA, EDF R&D, UTAC) ont apporté leur contribution à la préparation du référentiel ELLICERT.

Il est prévu de délivrer les premiers certificats fin 2011. Une déclinaison de la certification volontaire à des usages spécifiques des batteries tels les véhicules de flottes à périmètre local, les usages stationnaires, va être également engagée prochainement.

• La vérification des performances des éco-technologies fait l'objet du plan européen ETAP<sup>3</sup> de 2004 et a été également abordée dans le plan européen « Développement durable »<sup>4</sup> en 2008. À l'instar des expériences en la matière aux États-Unis et au Canada, cette vérification à destination des PME-PMI principalement, doit faire intervenir des organismes vérificateurs et des centres de test dans les divers pays de l'Union européenne. La structuration de la contribution française au schéma dit →



Contributeur



Christian Michot

→ *Environmental Technology Verification* (ETV) est pratiquement achevée, au sein d'un groupe *ad hoc* issu du Comité stratégique des éco-Industries (COSEI).

L'INERIS est partie prenante dans ce schéma, notamment pour les nouvelles technologies de production d'énergie. La mise en place du schéma doit intervenir à l'occasion du lancement du préprogramme européen ETV, attendu pour septembre 2011.

- Le règlement REACH autorise l'utilisation d'alternatives aux essais sur animaux<sup>5</sup>, méthodes *in vitro* et *in silico*. Parmi ces dernières, les méthodes fondées sur les approches dites QSAR (*Quantitative Structure Activity Relationship*), voire QSPR (*Quantitative Structure Property Relationship*).

L'INERIS, au sein du Pôle applicatif en toxicologie et en écotoxicologie, développe, en tant que Centre de référence national sur les méthodes alternatives, de tels essais et outils dont la validation par les pairs et ultérieurement la validation réglementaire ouvrent la voie à une phase intermédiaire de type certification volontaire. Quitte à la faire reconnaître formellement au sens du règlement REACH. L'INERIS a ainsi mis au point sur la période 2007-2009 des méthodes QSPR<sup>2</sup> appliquées aux dangers physicochimiques (explosibilité et inflammabilité) des produits chimiques. Se fondant sur cette expérience, il va engager en 2011 une première étape d'identification des méthodes alternatives susceptibles de déboucher rapidement sur des protocoles de certifi-

cation volontaire, pour une mise en œuvre à partir de 2012-2013.

Il va de soi que les dispositifs de certification volontaire mentionnés n'ont de valeur que si leur diffusion hors du territoire national, au moins au niveau européen, est organisée et qu'ils bénéficient, en conséquence, d'une large reconnaissance. L'INERIS a ainsi pu promouvoir au niveau mondial des dispositifs nationaux de cette nature et faire à l'occasion un transfert de compétences valorisant ses travaux de recherche ainsi que ceux de ses partenaires nationaux.

En outre, l'INERIS est pleinement conscient des enjeux, en matière de responsabilité civile comme d'auditabilité des conditions de préparation des référentiels de certification. Sa gouvernance implique que participent à cette préparation, aux côtés des industriels et du monde académique, des associations de défense de l'environnement et de consommateurs, des élus, des représentants des syndicats, etc. de manière à légitimer la démarche et à élargir sa base à l'ensemble des parties prenantes.

## ABSTRACT

Certification schemes on a voluntary base are more and more developed as a tool for enhancing confidence in new technologies, providing with peer validation and filling the gap in between no safety guidelines and achieved standards.

INERIS is mainly engaged in four such schemes with future steps at the international level.

- Nanotechnologies: Nano-Cert is the scheme installed from 2010 within the national action plan Nano-Innov with two goals, first for qualifying and certifying the competence of people such as operators, safety managers, rescue team in the vicinity of workplace in presence of nanoparticles, second just in the course of building for certifying Best Available Techniques (BAT) at workplace for Collective Protective Equipment.
- Batteries for electric vehicles and stationary uses: ELLICERT certification scheme has been developed with all main partners like cells/packs/BMS manufacturers, cars manufacturers and fleet managers, national experts etc. In the frame of ELLICERT scheme, the batteries which are on Li-ion technology mainly based, are tested in abuse conditions for demonstrating their safety.
- ETV is devoted to Environmental Technology Verification. For answering the EU ETV pre-programme which will be launched in September 2011, INERIS has joined the *ad hoc* French consortium and will focus its action on new energy technologies.
- The REACH regulation allows the alternates to testing on animals as well as for screening and for new *in vitro* or *in silico* protocols. For the *in silico* ones QSAR and QSPR tools are recognized approaches. INERIS developed in 2007-2009 such QSPR tools for explosivity and flammability hazards, and will identify in 2011 alternate protocols able to enter in certification like schemes.

## Notes

1. Rapports « Technologies clés en matière d'environnement et d'énergie 2015 » (2011, MEIE/DGCIS) et « Filières industrielles stratégiques de l'économie verte » (2010, MEEDDM/CGDD).
2. Voir rapport scientifique INERIS 2009-2010.
3. Plan d'action en faveur des écotechnologies (2004).
4. Plan d'action pour une consommation et une production durable et pour une politique industrielle durable (2008).
5. Rapport « L'utilisation d'alternatives aux essais sur animaux pour la réglementation REACH » (2011, ECHA).



## Contributeurs



Sébastien  
Evanno



Isabelle  
Zdanevitch

## FOCUS

# LA MÉTHANISATION

La méthanisation est un processus biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène qui génère du biogaz, un gaz combustible principalement constitué de méthane et de dioxyde de carbone. Ce processus est indésirable lorsqu'il n'est pas maîtrisé et que son produit final ne peut pas être valorisé.

L'INERIS a mis en place un pilote de méthanisation de façon à suivre en continu les gaz générés par la digestion anaérobie: volume, analyse qualitative et quantitative des gaz produits (débitmétrie, analyse du méthane ( $\text{CH}_4$ ), du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), de l'oxygène ( $\text{O}_2$ ), de l'hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et de l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Il s'agit d'une cuve en verre d'un volume de 5 l dont le contenu peut être mélangé au moyen d'un agitateur vertical dont la vitesse de rotation est de 50 à 300 t/min. Le contenu peut être chauffé au moyen d'une ceinture chauffante. La composition du ciel est analysée qualitativement et quantitativement de façon discontinue, afin d'identifier la présence éventuelle de certains gaz ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  et  $\text{H}_2\text{S}$ ) et aussi de contrôler la teneur en oxygène.

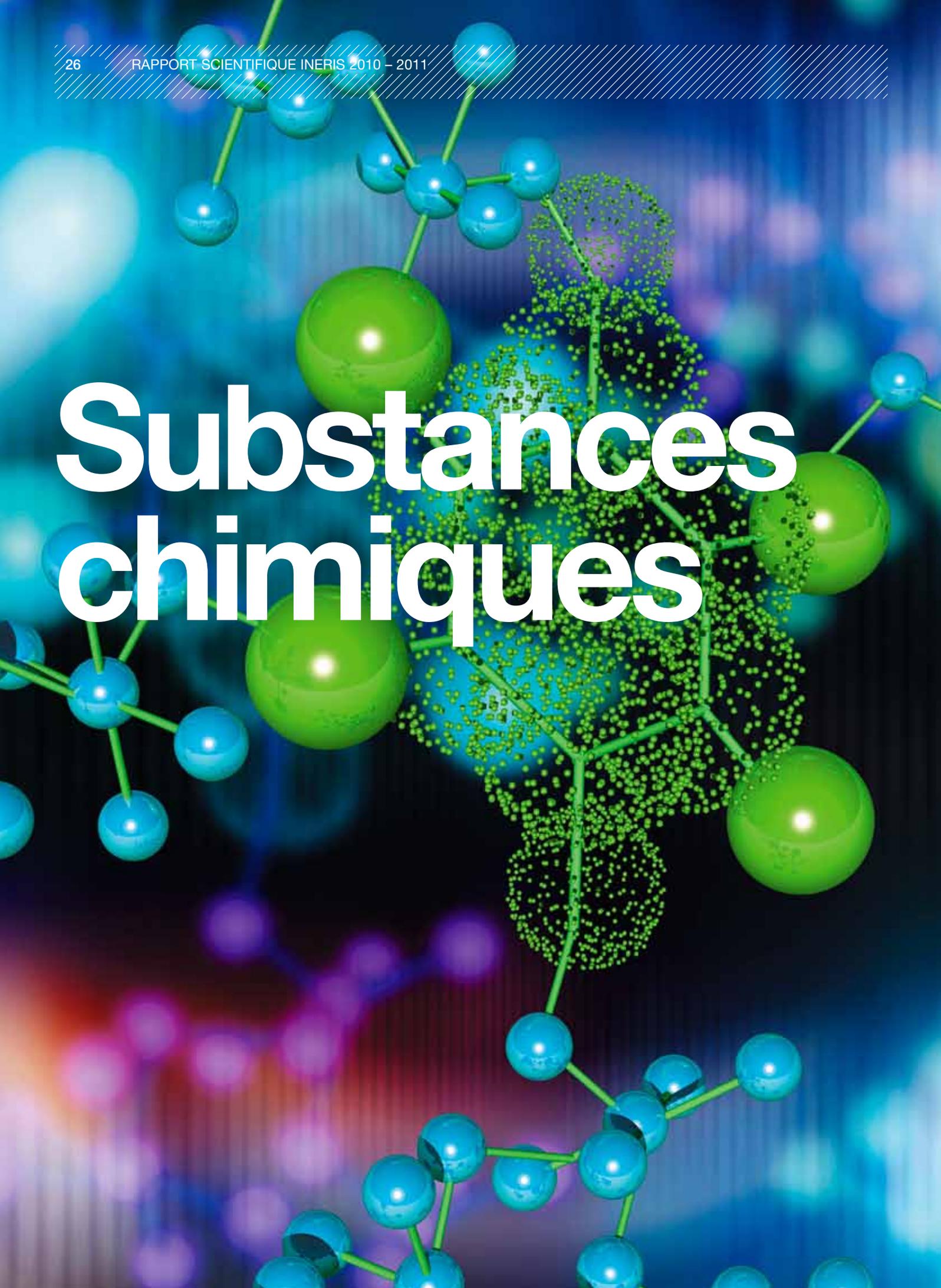
Le pilote de méthanisation a été utilisé notamment:

- pour méthaniser, en mode mésophile et thermophile, des substrats, par exemple avec du fumier équin sur support de paille et copeaux de bois dans le cadre du projet EQUIVALOR, en collaboration avec le LBE INRA de Narbonne et la CUMA Pays Sud Oise de Chantilly. Les études menées sur le pilote avec deux types de substrats ont permis de suivre les phases transitoires de la dégradation anaérobie et la génération du biogaz. L'INERIS a étudié les risques de formation d'atmosphères explosives ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) au cours des différentes phases de méthanisation en complément des risques sanitaires;
- dans le cadre d'expertise après accident pour des industriels, lors de l'étude de scénarios d'explosion afin d'évaluer les conditions de formation d'une atmosphère explosive résultant d'une fermentation. Une étude expérimentale, au moyen de ce pilote, permet de caractériser tout dégagement de gaz inflammable susceptible de se produire à partir d'un substrat, contenu dans la cuve de ce pilote, dans des conditions voisines de celles qui régnaient dans l'installation lors de l'explosion;
- pour étudier la cinétique de formation à température ambiante de l'hydrogène sulfuré ( $\text{H}_2\text{S}$ ) lors de la dégradation, en milieu confiné, d'algues vertes, comme cela a été réalisé avec les algues récupérées à Binic (Côtes-d'Armor).



Figure 1

Décomposition des algues vertes dans le réacteur de 5 l de l'INERIS.



# Substances chimiques



## Interview



**Robert Barouki**  
Directeur unité  
INSERM U 747  
UFR BIOMÉDICAL

# La recherche translationnelle en marche

## La prédiction des effets toxiques des substances chimiques est-elle seulement un défi scientifique ou aussi un enjeu social et politique ?

— **R. B. :** Plutôt que de passer en revue les problèmes que cela pose et les réalisations précises de l'INERIS qui sont décrites dans ce dossier, j'aimerais profiter de cette tribune pour discuter de la place des « sciences réglementaires » – ou *regulatory sciences* – dans notre pays. Si pour certains il s'agit de l'apport principal de la toxicologie, pour d'autres, le terme « réglementaire » peut provoquer des réactions allergiques violentes. Cela illustre le manque de coopération, voire de compréhension, entre chercheurs du monde académique et acteurs de l'aide à la décision. Il n'empêche que la réflexion sur le cadre réglementaire le plus adapté soulève des questions de fond qui concernent tous les acteurs impliqués dans l'étude de la toxicité ou l'écotoxicité des substances chimiques. Les notions de doses, de seuils, de mélanges, d'effets chroniques intéressent les chercheurs les plus fondamentaux et sont essentielles pour la mise au point de nouveaux règlements. Ces questions appellent des concepts nouveaux que seule une recherche d'amont peut apporter. Elles nécessitent aussi des approches novatrices. Les approches technologiques ont beaucoup évolué et certaines, comme les « omiques » ou l'imagerie, ont fait leur entrée dans les dossiers réglementaires. Grâce au règlement REACH, il est indéniable que le fossé entre recherche académique et démarche réglementaire a commencé à se réduire. D'une part, des chercheurs invoquent REACH comme les croyants prient leurs saints et, d'autre part, REACH tolérera sans doute l'entrée de nouveaux tests dans le club restreint des tests réglementaires traditionnels. Une vision originale est en train de naître, qui va dans le sens du rapprochement entre règlement et sciences fondamentales.

## Le pôle national en toxicologie écotoxicologie est-il un pont nécessaire entre recherche académique et recherche appliquée ?

— **R. B. :** Malgré ces progrès, il semble toujours nécessaire de rapprocher le milieu de la recherche académique du vaste champ des applications. C'est sans doute dans ce contexte que le pôle applicatif de toxicologie et d'écotoxicologie trouve toute sa justification. Les laboratoires universitaires et les organismes de recherche font constamment de très belles découvertes au niveau fondamental. De par sa mission, l'INERIS a toujours été à l'écoute des préoccupations des pouvoirs publics. À la suite du Grenelle de l'Environnement, le réseau Antiope et le pôle applicatif ont associé des laboratoires de vocations diverses et complémentaires. Ainsi, chaque projet financé par le post-Grenelle comprend une recherche mécanistique associée à la mise au point de nouveaux tests ou de nouvelles procédures. Tout le monde s'accorde pour insister sur l'importance des approches prédictives en toxicologie. Ainsi en est-il de la mise au point de tests permettant la caractérisation de perturbateurs endocriniens. Mais pour mettre au point ces tests, il est crucial de connaître les différents mécanismes de la perturbation endocrinienne. Il n'y a pas de mécanisme universel : ces molécules peuvent agir au niveau des récepteurs hormonaux, des enzymes de synthèse ou de dégradation, du transport des hormones, etc. Il serait naïf de penser qu'un seul test suffit et, comme pour les études de génotoxicité, une batterie de tests semble nécessaire. De même, les approches de modélisation qui sont un des points forts de l'INERIS, notamment les outils QSAR<sup>1</sup> et les approches PKPD<sup>2</sup>, sont essentielles dans ce contexte de toxicologie prédictive. Or, il n'y a pas de bons modèles sans bonnes données.

## Quelle place a l'INERIS dans ce paysage ?

— **R. B. :** Les méthodes alternatives à l'expérimentation animale ont été particulièrement soutenues par différentes initiatives et la mise en route de la plateforme française va dans ce sens. Ce n'est sans doute pas assez. La pression réglementaire dans ce domaine semble plus forte que le soutien public à ces approches. Il est prévu que, dans le domaine des cosmétiques, l'utilisation d'animaux soit bientôt très largement restreinte. Pour y aboutir, il est nécessaire de faire des efforts considérables en termes de recherche et, malgré les progrès réalisés, nous en sommes encore loin. Pourtant la modélisation de la peau dans une boîte de Pétri est l'un des beaux succès de la recherche dermatologique, mais pour arriver à prédire correctement les effets toxiques, il est nécessaire de mieux comprendre le rôle des différents tissus, leurs interactions, leurs réponses aux cellules du système immunitaire, etc. Le champ d'investigation est encore large. Quel chemin pour l'INERIS dans ce contexte ? Interagir avec le milieu académique d'une part, avec les industriels, les agences et les pouvoirs publics d'autre part ; transformer cette mine d'informations et de découvertes en véritables tests et processus prédictifs, améliorer encore ces modèles qu'ils soient virtuels ou réels, voilà de belles perspectives ! On parle beaucoup depuis quelques années, en français approximatif il est vrai, de recherche « translationnelle ». L'INERIS pourrait, dans le domaine de la toxicologie et de l'écotoxicologie, développer cette dimension et être cet Institut à vocation translationnelle si utile à la recherche française.

### Notes

1. QSAR *Quantitative Structure Activity Relationship*.
2. PKPD *Pharmacokinetic-Pharmacodynamic studies*.



Enrico Mombelli



Contributeur

# Les outils QSAR dans un contexte réglementaire

## L'importance d'une validation scientifique externe

### Références

[1] UE, Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC, The European Parliament and the Council of the European Union, 2006 disponible à l'adresse [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/2006/l\\_396/l\\_39620061230en00010849.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/2006/l_396/l_39620061230en00010849.pdf)

[2] OCDE, Bacterial Reverse Mutation Test, Ref. OECD TG 471, 1997, disponible l'adresse <http://www.oecd.org/dataoecd/18/31/1948418.pdf>

[3] ECVAM, an overview – European Centre for the Validation of Alternative Methods (2005), disponible à l'adresse [http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc\\_press\\_animal\\_ecvam\\_overview.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/jrc/downloads/jrc_press_animal_ecvam_overview.pdf)

[4] Benigni R., Bossa C., Jeliaskova N., Netzeva T., Worth, A. *The Benigni/Bossa rulebase for mutagenicity and carcinogenicity – a module of Toxtree*, disponible (2008) [http://ecb.jrc.ec.europa.eu/DOCUMENTS/QSAR/EUR23241\\_EN.pdf](http://ecb.jrc.ec.europa.eu/DOCUMENTS/QSAR/EUR23241_EN.pdf)

La mutagenèse et la carcinogénèse sont deux effets toxicologiques qui font partie des informations toxicologiques à fournir dans le cadre de plusieurs règlements sur les substances chimiques et notamment du règlement REACH [1].

Les effets mutagènes sont habituellement caractérisés de façon relativement économique et rapide par le biais du test d'Ames [2] qui quantifie le potentiel mutagène d'une substance grâce à une quantification du taux de révertants de souches de *S. typhimurium* auxotrophes pour l'histidine.

En revanche, la détermination expérimentale du potentiel cancérigène des produits chimiques est particulièrement onéreuse. Le coût d'une étude de cancérogénèse chez le rongeur peut aller jusqu'à un million de dollars par substance [3]. Ce coût élevé, ajouté à la préoccupation croissante pour le bien-être des animaux, encourage, en particulier, la mise au point de modèles QSAR pour la prédiction du potentiel cancérigène des produits chimiques.

Dans ce contexte, le système « Benigni/Bossa » pour l'analyse des propriétés carcinogènes et mutagènes [4] joue un rôle important en raison de son exhaustivité et de son intégration dans deux outils disponibles gratuitement: la boîte à outils QSAR de l'OCDE (OCDE, 2010) (figure 1) et Toxtree [5] (figure 2).

Le travail effectué en collaboration entre l'INERIS et le CTIS (Centre de traitement de l'information scientifique) se proposait d'analyser la validité du système « Benigni/Bossa » en

tant que tel et de son implémentation dans ces deux outils (boîte à outils QSAR de l'OCDE versions 1.1.01 et 1.1.02 et Toxtree version 1.6).

Le système « Benigni/Bossa », pour l'analyse du potentiel mutagène et cancérogène d'une substance chimique, ne nécessite comme donnée d'entrée que la structure moléculaire (bidimensionnelle) de cette substance. Dans ce système, quatre cas de figures peuvent se présenter: (a) aucune alerte structurelle pour la carcinogénèse n'est reconnue; (b) une ou plusieurs alertes structurelles pour la carcinogénèse sont reconnues; (c) le recours à deux modèles QSAR pour la carcinogénèse et la mutagenèse est déclenché si la substance appartient à la classe des amines aromatiques homocycliques; (d) le recours à un modèle QSAR pour la prédiction du potentiel mutagène est déclenché si le système détecte la présence d'un aldéhyde  $\alpha$ ,  $\beta$  insaturé à l'intérieur de la structure moléculaire. Les prédictions des trois modèles du système « Benigni/Bossa » (voir encadré p.30) sont dichotomiques (cancérigène/non-cancérigène et mutagène/non mutagène).

Trente-cinq alertes structurelles (ex. azotures, coumarines, groupements nitroso...) composent le système « Benigni/Bossa » pour la reconnaissance de motifs structuraux qui peuvent induire des effets carcinogènes chez le rongeur, cinq d'entre elles décrivant des mécanismes non-génotoxiques [4]. Les auteurs du système ont basé leur sélection d'alertes sur une analyse approfondie



Figure 1

Interface graphique de la boîte à outils QSAR de l'OCDE (v1.1.01 et v1.1.02) après l'analyse de l'aniline par le système « Benigni/Bossa ».

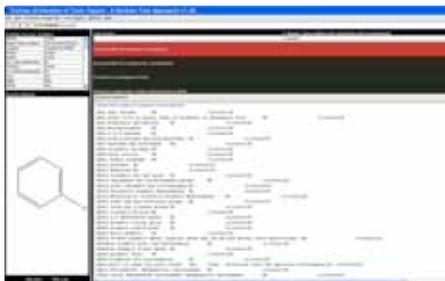


Figure 2

Interface graphique de Toxtree v 1.6 après l'analyse de l'aniline par le système « Benigni/Bossa ».

## LE COLLOQUE MODÉLISATION

Le 1<sup>er</sup> avril 2011, s'est tenu, à Paris, un colloque intitulé « Modélisation en (éco)toxicologie : vers l'âge de raison ? ». Organisé par l'INERIS, il a regroupé 80 personnes, principalement des chercheurs, des gestionnaires publics et des industriels. L'expansion des méthodes rend nécessaire un retour d'expérience et une réflexion prospective : comment répondre aux enjeux scientifiques tout en soutenant la prise de décision ? Faut-il envisager un référentiel commun pour accompagner le développement et l'utilisation des modèles ? Si oui, comment doit-on le structurer ?

Deux grandes conclusions se détachent :

- l'utilité des modèles en évaluation du risque est désormais largement reconnue, en termes d'extrapolation des résultats depuis l'expérimentation de laboratoire jusqu'aux cibles d'intérêt pour l'évaluation du risque (l'homme et les écosystèmes) et en termes de guide dans des situations complexes (regroupements ou hiérarchisation de substances, par exemple);
- il s'agit maintenant d'acquiescer la confiance des utilisateurs. Or, tous les intervenants s'accordent à demander à la fois une plus grande transparence des outils, des critères de validité pour chaque modèle et la mise en place systématique d'une validation externe. Côté utilisateurs, il s'agit pour les agences et les industriels de renforcer à la fois la formation en modélisation mathématique et le recrutement de modélisateurs.

## Références

[5] OCDE, *QSAR Application Toolbox*, 2010, disponible à l'adresse [http://www.oecd.org/document/54/0,3343,en\\_2649\\_34379\\_42923638\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/54/0,3343,en_2649_34379_42923638_1_1_1_1,00.html)

[6] Ex-ECB, *Toxtree*, 2010, disponible à l'adresse <http://ecb.jrc.it/qsar/qsar-tools/index.php?c=TOXTREE>

[7] Devillers J., Mombelli E., *Evaluation of the OECD QSAR Application Toolbox and Toxtree for estimating the mutagenicity of chemicals*, Part 1, *Aromatic amines SAR and QSAR in Environmental Research*, 21 (2010a), pp. 753-769.

[8] Devillers J., Mombelli E., *Evaluation of the OECD QSAR Application Toolbox and Toxtree for estimating the mutagenicity of chemicals*, Part 2. *a-b unsaturated aliphatic aldehydes SAR and QSAR in Environmental Research*, 21 (2010b), pp. 771-783.

[9] Mombelli E., Devillers J., *Evaluation of the OECD QSAR Application Toolbox and Toxtree for predicting and profiling the carcinogenic potential of chemicals SAR and QSAR in Environmental Research*, 21 (2010), pp. 731-752.

[10] Kaiser K. L. E., Dearden J. C., Klein W., Schultz T. W., *A note of caution to users of ECOSAR*, *Water Qual. Res. J. Can.*, 34 (1999), pp. 179-182.

[11] Reuschenbach P., Silvani M., Dammann M., Warnecke D., Knacker T., *ECOSAR model performance with a large test set of industrial chemicals*, *CHEMOSPHERE*, 71 (2008), pp. 1986-1995.

d'études scientifiques qui couvrent près de trois décennies de recherche en la matière.

Ainsi, le système « Benigni-Bossa » contient trois modèles QSAR [4] (*voir encadré p. 30*).

Les principaux résultats de notre étude de validation du système « Benigni/Bossa », qui a généré trois publications scientifiques [7, 8, 9] sont reportés dans les paragraphes qui suivent.

### S'agissant du système « Benigni/Bossa » en lui-même :

– le système de reconnaissance d'alertes structurales pour la carcinogenèse a une bonne fiabilité globale mais peut présenter des limites lors de l'analyse de classes chimiques spécifiques (ex. hydrocarbures aromatiques polycycliques);

– les performances (sensibilité, spécificité et concordance) du modèle QSAR 6 pour la prédiction du potentiel mutagène des amines aromatiques sont en réalité inférieures à celles déclarées par le mode d'emploi des deux outils;

– la sensibilité réelle du modèle QSAR 8 pour la prédiction du potentiel carcinogène des amines aromatiques est inférieure à celle qui est déclarée par le mode d'emploi des deux outils;

– les paramètres du modèle QSAR 13 pour la prédiction du potentiel mutagène des aldéhydes  $\alpha, \beta$  insaturés ont été estimés sur la base de vingt substances uniquement dont trois

seulement sont non-mutagènes. Pour cette raison, la performance du modèle est très modeste (incapacité du modèle à prédire la toxicité de molécules qui ne font pas partie du jeu d'apprentissage) et son utilité pratique est, par conséquent, fortement limitée;

– de façon surprenante, les prédictions pour les molécules qui composent les jeux d'apprentissage des trois modèles ne sont pas toujours identiques à celles rapportées par les publications originales.

### S'agissant de l'implémentation du système « Benigni/Bossa » dans les logiciels :

– la reconnaissance des alertes structurales est souvent perturbée par des problèmes relatifs à l'interface graphique de la boîte à outils QSAR de l'OCDE qui n'arrive pas toujours à bien représenter l'aromaticité des molécules et/ou à bien gérer la structure des groupements nitro lors de l'application des modèles QSAR. Par rapport à ces dysfonctionnements, l'outil de l'OCDE manque de transparence et seul un utilisateur averti peut se rendre compte de tous les problèmes;

– l'outil Toxtree présente une transparence supérieure à l'outil OCDE;

– les équations qui sont censées corriger les valeurs des descripteurs calculées par les outils afin de reproduire les valeurs numériques →

→ rapportées par les publications originales ne remplissent pas leur fonction.

Plusieurs idées pour une amélioration des outils évalués ont été proposées dans nos articles (nouvelles alertes putatives, jeux d'évaluation élargis, corrections d'erreurs d'implémentation conceptuelle et informatique).

Les résultats de l'étude de validation montrent donc que l'intégration informatique d'un système QSAR peut provoquer plusieurs dysfonctionnements imprévisibles et qu'une évaluation de la performance opérationnelle d'une telle implémentation doit être considérée comme une priorité avant d'entreprendre toute sorte d'évaluation toxicologique *in silico*. À titre de comparaison avec les outils que nous avons étudiés, les outils QSAR les plus fiables (ex. ECOSAR de l'EPA américaine) ont été évalués à plusieurs reprises par des experts qui ne faisaient pas partie du groupe de concepteurs du modèle [10, 11]. Cette validation externe est incontournable pour améliorer les outils existants et pour leur utilisation fiable de la part de toutes les parties prenantes d'un règlement sur la toxicité des substances chimiques.

## ABSTRACT

Toxicological effects and chemical structure can be related quantitatively or qualitatively through QSAR modeling (Quantitative structure-activity relationship). During the past decade, the development of QSAR tools has continued to progress especially because of the requirements of new European legislations (REACH and 7<sup>th</sup> amendment to the EU Cosmetics Directive) that encourage and support the implementation of alternative methods to animal testing including QSAR models.

In order to facilitate the regulatory use of QSAR tools, the management of the environment directorate of the OECD and the former ECB (European Chemicals Bureau) have made available two free software tools (the "QSAR Toolbox" and "Toxtree"). Both tools allow the user to use several QSAR models and in particular the "Benigni/Bossa" rule-based system for predicting the mutagenic and carcinogenic potential of chemicals on the sole basis of chemical structure.

Given the regulatory role of the OECD QSAR Toolbox and Toxtree, the INERIS and the CTIS jointly carried out a scientific validation of the QSAR models that form the "Benigni-Bossa" rule-based system.

The main results of this study show that several conceptual and software related problems can, in some specific cases, give rise to wrong predictions.

## MODÈLES QSAR

**1\_ Le modèle « QSAR 6 »** qui discrimine amines aromatiques mutagènes et non mutagènes grâce à une fonction discriminante monodimensionnelle :

$$w = -3,14 \text{ HOMO} + 1,76 \text{ LUMO} + 0,62 \text{ MR}_2 + 0,75 \text{ MR}_3 + 1,88 \text{ MR}_6 + 3,75 \text{ Idist}$$

$$w(\text{moyenne, Class1}) = 28,42 \\ w(\text{moyenne, Class2}) = 26,44 \\ \text{Seuil} = 27,43$$

Ce modèle a été dérivé pour un jeu d'apprentissage composé de 111 amines aromatiques (64 positives au test d'Ames pour la mutagenèse et 47 négatives)

**2\_ Le modèle « QSAR 8 »** qui discrimine amines carcinogènes et non carcinogènes grâce à une fonction discriminante monodimensionnelle :

$$w = -3,79 \text{ L(R)} + 3,52 \text{ B}_5(\text{R}) - 4,12 \text{ HOMO} + 4,41 \text{ LUMO} + 3,09 \text{ MR}_3 + 2,60 \text{ MR}_2 + 4,63 \text{ MR}_6 - 3,49 \text{ I(An)} + 1,80 \text{ I(NO}_2) - 1,78 \text{ I(BiBr)}$$

$$w(\text{moyenne, Class1}) = 27,82 \\ w(\text{moyenne, Class2}) = 30,34 \\ \text{Seuil} = 29,08$$

Ce modèle a été dérivé pour un jeu d'apprentissage composé de 64 amines aromatiques (52 carcinogènes et 12 non carcinogènes).

**3\_ Le modèle « QSAR 13 »** qui discrimine aldéhydes  $\alpha, \beta$  insaturés mutagènes et non mutagènes.

$$w = 0,387 \text{ MR} - 3,12 \log P + 3,23 \text{ LUMO}$$

$$w(\text{moyenne, class1}) = 9,69 \\ w(\text{moyenne, class2}) = 6,37 \\ \text{Seuil} = 8,03$$

Ces modèles se basent sur les descripteurs suivants : les énergies orbitales HOMO et LUMO, les réfractivités moléculaires MR (l'index indique la position du substituant), une variable indicatrice Idist qui indique la présence/absence de substituants (l'index indique la position du substituant), les paramètres stériques L(R) (longueur) et B5(R) (largeur maximale) pour les substituants des amines aromatiques, les variables indicatrices I(An), I(NO<sub>2</sub>) et I(BiBr) qui indiquent la présence ou absence d'anilines, groupements nitro et « ponts » entre deux phényles, le coefficient de partage log P entre l'n-octanol et l'eau.



Contributeur



Patricia Rotureau

## FOCUS

# LE PROJET PREDIMOL

### Notes

1. [www.ineris.fr/predimol](http://www.ineris.fr/predimol)
2. L'exception de l'état de la substance à 20 °C et 101,3 kPa, de la granulométrie et de la stabilité dans les solvants organiques et identité des produits de dégradation (propriétés 1, 14 et 15 en [figure 1](#)).

- 1) État de la substance à 20 °C et 101,3 kPa
- 2) Point de fusion / congélation
- 3) Point d'ébullition
- 4) Densité relative
- 5) Pression de vapeur
- 6) Tension superficielle
- 7) Hydrosolubilité
- 8) Coefficient de partage n-octanol/eau
- 9) Point d'éclair
- 10) Inflammabilité
- 11) Propriétés explosives
- 12) Température d'auto-inflammation
- 13) Propriétés comburantes
- 14) Granulométrie
- 15) Stabilité dans les solvants organiques et identité des produits de dégradation
- 16) Constante de dissociation
- 17) Viscosité

### Figure 1

Propriétés physicochimiques standards exigées dans les annexes VII (propriétés 1 à 14) et IX (propriétés 15 à 17) de REACH.

Le projet PREDIMOL (PREDiction des propriétés physicochimiques des produits par modélisation MOLéculaire)<sup>1</sup>, financé par l'Agence nationale de la recherche (dans le cadre de l'appel à projets 2010 « Chimie Durable – Industries – Innovation ») et labellisé par le pôle de compétitivité Axelera, a démarré le 15 novembre 2010 pour une durée de trois ans. Ce projet, piloté par l'INERIS, associé à ses côtés plusieurs partenaires publics et privés (IFP Énergies nouvelles, Chimie ParisTech, le Laboratoire de chimie physique de Paris XI, Materials Design et Arkema).

D'ici à 2018, dans le cadre de l'application du règlement européen REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), les propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques de plus de 143000 substances préenregistrées devront être évaluées pour permettre leur utilisation. Compte tenu du nombre de substances concernées, la caractérisation expérimentale de l'ensemble des propriétés est contraignante pour des raisons de temps, de coûts, d'éthique (essais sur animaux) et de faisabilité au niveau R&D. Ainsi, le développement de méthodes prédictives, alternatives à l'expérimentation, est recommandé dans REACH.

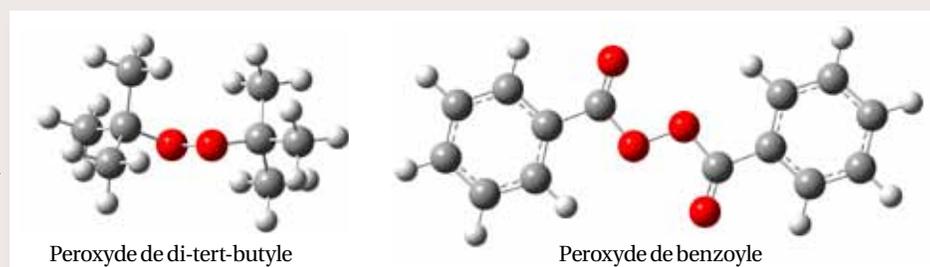
L'objectif du projet PREDIMOL est de montrer que la modélisation moléculaire peut être une alternative crédible à l'expérimentation pour obtenir des données physicochimiques manquantes pour les besoins de REACH. Plus précisément, le projet vise à développer des méthodes et modèles permettant d'estimer de manière précise, quantitative et rapide, les propriétés physicochimiques nécessaires à l'enregistrement des substances dans REACH (*annexes VII et IX*<sup>2</sup>, en [figure 2](#)), à partir de Relations quantitatives structure-propriétés (QSPR) et des méthodes de simulation moléculaire (Dynamique moléculaire et Monte-Carlo). Ce projet vise également le développement d'outils automatisés et de calculs à haut débit pour l'acquisition de données en grande quantité.

Un autre objectif tout aussi important du projet est de valider et faire reconnaître ces outils officiellement par les autorités en charge de l'évaluation des substances chimiques. Aussi, ils seront largement diffusés au sein des industriels et des instances d'expertise en charge de l'évaluation des dossiers REACH.

Plus particulièrement, l'INERIS développe, dans ce projet, des modèles QSPR pour prédire les propriétés dangereuses (telle que l'explosibilité) des substances chimiques, en tenant compte des mécanismes réactionnels impliqués. Nous nous focalisons actuellement sur la mise en place de tels modèles pour l'évaluation des propriétés dangereuses des peroxydes organiques.

### Figure 2

Représentation de molécules de peroxydes organiques.





Contributeur



Éric  
Thybaud

# Les défis du règlement européen REACH

L'un des défis du règlement européen REACH est le renforcement de la connaissance sur les propriétés toxicologiques et écotoxicologiques des substances chimiques tout en diminuant le recours à l'expérimentation animale.

En accompagnement au déploiement du règlement, une forte mobilisation de la communauté scientifique – concernant des travaux de recherche et permettant de répondre à ce défi – a eu lieu.

Les travaux ont concerné toute à la fois le développement et la validation de méthodes *in silico*, en particulier les approches QSAR (relation quantitative structure-activité) que les approches *in vitro*.

Dans le premier domaine, l'INERIS a focalisé son activité sur la validation de méthodes intégrées dans les outils réglementaires mis à disposition par l'OCDE (Tool Box) ou l'union européenne (Toxtree) en particulier dans le domaine de la prévision des propriétés mutagène ou cancérogène (voir article E. Mombelli, p. 28).

Dans les domaines de la toxicologie ou de l'écotoxicologie *in vitro*, les travaux se sont concentrés autour de deux axes majeurs : le développement de barrière et celui de modèles cellulaires permettant de préciser les modes d'actions des substances.

Ainsi, l'INERIS a développé un modèle de barrière hémato-testiculaire (BHT) et un modèle de barrière alvéolo-capillaire *in vitro* complémentaires et alternatifs à l'expérimentation animale. Le modèle de BHT, basé sur une culture tridimensionnelle de cellules testiculaires, reproduit *in vitro* la composition, l'organisation et les fonc-

tions de barrière anatomophysologique et de spermatogénèse assurée par la BHT *in vivo* chez le rat, tandis que le modèle alvéolocapillaire permet d'étudier *in vitro* les passages de substances chimiques de l'air inspiré vers le sang.

Dans le domaine de l'écotoxicologie, les travaux se sont focalisés sur la mise en évidence du caractère perturbateur endocrinien des substances chimiques. Ainsi, ont été développées des lignées cellulaires de poisson exprimant de manière stable les différentes isoformes du récepteur aux œstrogènes ichthyens (ER $\alpha$ , ER $\beta$ 1 et ER $\beta$ 2).

Parallèlement aux modèles *in vitro* de criblages des activités oestrogéniques des substances chimiques, un test *in vivo* sur embryon de poisson-zèbre transgénique a été développé. Dans ce modèle biologique, un rapporteur fluorescent (la *Green Fluorescent Protein*, GFP) sous le contrôle du promoteur d'un gène régulé par les oestrogènes, le gène *cyp19a1b*, est exprimé. Le criblage d'une quarantaine de substances permet de conclure que ce bioessai *in vivo* permet une quantification rapide, fiable, sensible et non invasive du potentiel oestrogénique des substances chimiques chez l'embryon de poisson.

En ce sens, les tests *in vitro* et *in vivo* développés répondent aux besoins de méthodes alternatives spécifiques pour la détection du potentiel oestrogénique des composés chimiques et s'inscrivent dans une démarche de raffinement de la stratégie d'évaluation des dangers des substances chez une espèce cible, le poisson-zèbre.

Mais, même si de gros efforts de recherche ont été menés, force est de constater un décalage entre ceux-ci et le rendu dans les dossiers d'enre-

gistement déposés auprès de l'Agence européenne de substances chimiques.

Ainsi, l'analyse de l'origine des données présentées dans les 25 000 dossiers correspondant à la première phase d'enregistrement (substances produites ou importées à plus de 1 000 t/an, ou CMR 1 et 2 ou aux substances classées R50/53 et produites ou importées à plus de 100 t/an), qui s'est terminée au premier décembre 2010, met en évidence un faible recours aux approches alternatives, en particulier QSAR (de 0,1 à 0,5 % des essais en fonction du critère d'effet en toxicologie et de 0 à 4 % des essais en écotoxicologie) et méthodes *in vitro*.

En effet, la grande majorité des données sont issues de tests *in vivo* classiques, sauf dans les domaines ou des tests *in vitro* alternatifs existent depuis plusieurs années, irritation cutanée ou oculaire en particulier.

Si le développement de la toxicologie et l'écotoxicologie prédictive est une priorité stratégique de l'INERIS, l'Institut joue aussi un rôle dans la reconnaissance de ces méthodes et tout d'abord avec la validation du concept par les chercheurs. Mais, il va plus loin face au besoin croissant de méthodes alternatives ; compte tenu du temps nécessaire à la validation « réglementaire » et de la nécessité d'utiliser en confiance ces méthodes dans d'autres contextes (développement de produits). L'INERIS propose une approche s'inspirant de la normalisation ou de la certification volontaire, « reconnue » au sens du règlement du REACH, qui répond aux besoins exprimés par les industriels et la société.

# Le groupement d'intérêt scientifique FRANCOPIA

Lancé conjointement par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, l'AFSSAPS et l'INERIS en novembre 2007, le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) « Plateforme française pour le développement des méthodes alternatives en expérimentation animale » regroupe, depuis son origine, 12 membres (AFSSAPS, MESR, INERIS, FEBEA, OPAL, CNRS, INSERM, UIC, ANSES, SPTC, LFDA, LEEM) auxquels se sont ajoutés plus récemment l'INRA et le CEA.

Lieu d'échange, de concertation et de dialogue autour du développement des méthodes alternatives en expérimentation animale au niveau national, le GIS est intégré au réseau ECOPA, réseau européen de 16 plateformes nationales. Francopia s'appuie, pour fonctionner, sur un réseau d'experts représentant la recherche académique, les agences réglementaires, l'industrie et les associations de protection animale. Ses travaux portent principalement sur la promotion des méthodes alternatives respectant la règle des 3R: Remplacer, Réduire, Raffiner. Il permet, en particulier, d'accompagner les travaux de déploiement de la directive 2010/63/UE du Parlement européen et du conseil, relative à la protection des animaux utilisés à des fins scientifiques.

Suite à la demande de Madame la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche d'août 2008, le GIS a réalisé un état des lieux des méthodes alternatives dans le domaine de l'expérimentation animale en France et préconisé un certain nombre de recommandations.

Parmi celles-ci, la création d'un Infocentre ayant pour vocation de faire connaître les actions et de partager les résultats entre les différents secteurs est apparue comme prioritaire.

Ce site Internet dédié verra la mise en place d'un forum d'échanges, la diffusion d'une lettre d'information, la création d'une foire aux questions et de liens avec d'autres sites ou bases de données.

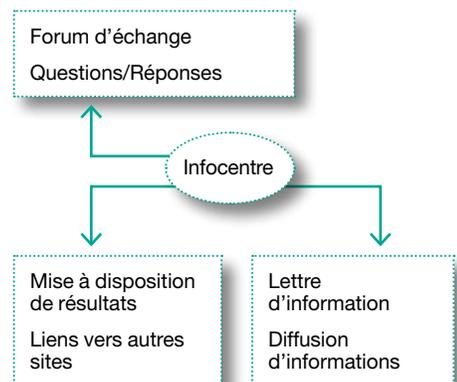
Il doit, en outre, permettre l'identification et la diffusion des méthodes existantes et informer sur les organismes européens impliqués dans le domaine et sur les programmes de recherche dans le domaine.

Par ailleurs, le 1<sup>er</sup> septembre 2011, le GIS a organisé son premier colloque autour du thème de la

dispense à l'expérimentation animale dans un contexte réglementaire. Celui-ci avait pour objet de faire le point sur le contexte réglementaire pour chaque activité ou métier concerné, médicalement (humain et vétérinaire), cosmétique, chimie ou phytosanitaires et de faire un retour d'expérience avec les industriels sur l'application de ces réglementations.

Il a été organisé autour de deux sessions, l'une concernant le point de vue des organismes réglementaires européens et internationaux, tandis que l'autre a laissé une large place au retour d'expérience des industriels.

Enfin, une table ronde a permis d'identifier les points d'action et de réflexion possibles.



## ALTERNATIVES À L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE

Dans le cadre de FRANCOPIA, l'INERIS et l'AFSSAPS ont coorganisé, le 1<sup>er</sup> septembre dernier, à Paris, au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, un séminaire sur le thème « Être dispensé d'essais chez l'animal dans le cadre réglementaire ». La dispense est une disposition présente au sein de nombreuses réglementations. En effet, l'absence de recours à l'expérimentation est souvent encouragée voire déjà en place et programmée pour les cosmétiques. Pour autant, la dispense doit être argumentée et recevable. De là est venue l'idée de rapprocher les différents acteurs, scientifiques ou experts réglementaires, en charge de l'élaboration des outils et moyens pratiques nécessaires aux évaluateurs ou aux responsables du contrôle réglementaire des produits afin d'avancer sur l'utilisation pratique de la dispense. Les outils (modèles mathématiques, modèles cellulaires, mais aussi échanges de données, utilisation de données non standardisées...) ont des fondements similaires dans les différents secteurs (médicaments, produits chimiques, cosmétiques, biocides, phytopharmaceutiques). Le partage et la reconnaissance mutuelle des données sont des dispositions réglementaires efficaces pour limiter les essais chez l'animal. Les exposés ont montré qu'une intensification et une formalisation des échanges sont possibles et nécessaires. En effet, les discussions ont porté sur le besoin d'évoluer vers des stratégies de test intégrées, la nécessité de créer des synergies pour définir les critères, les rôles et les étapes pour la validation des argumentaires de dispense et pour celle des méthodes alternatives. Cette journée d'échanges a su faire émerger des convergences qui relèvent à la fois de la science et de la gouvernance des risques.



## Contributeurs



Wassila  
Benaissa



Stefania  
Di Tommaso



Peggy  
Gruz



Patricia  
Rotureau

# La peroxydation de l'éther éthylique

## Étude théorique et expérimentale

**D**es nombreux produits chimiques organiques peuvent devenir instables lorsqu'ils sont stockés de manière inadéquate ou durant de longues périodes au contact de l'air. Ces produits réagissent avec l'oxygène par un processus radicalaire d'auto-oxydation (peroxydation) pour former des espèces chimiques peroxydées (des hydroperoxydes et/ou des peroxydes). Au bout d'un certain temps, lorsque certains de ces composés peroxydés se sont accumulés au-delà d'un seuil limite, ils peuvent devenir sensibles au choc, se décomposer de manière très exothermique, voire s'auto-polymériser formant alors des polyperoxydes particulièrement instables [1, 2].

Ces phénomènes, à l'origine de nombreux accidents dans l'industrie, notamment dans les laboratoires, restent encore mal connus car la présence d'espèces radicalaires, de plusieurs (dizaines) chemins réactionnels, rend la caractérisation expérimentale du mécanisme réactionnel de peroxydation très difficile.

Aujourd'hui, pour lutter contre les risques liés à ce type de vieillissement, les industriels limitent le temps de stockage et/ou introduisent des inhibiteurs chimiques (hydroquinone, BHT...) pour augmenter la durée de stockage. Cependant, ces inhibiteurs sont consommés pour empêcher le processus d'oxydation et lorsqu'ils le sont entièrement, on peut alors observer une accumulation rapide de peroxydes potentiellement très instables.

Les composés oxygénés tels que les éthers comptent parmi les groupements chimiques les

plus susceptibles d'être à l'origine de la formation de peroxydes. Néanmoins, très peu d'études théoriques (et expérimentales) détaillées ont été réalisées sur la compréhension du processus d'oxydation des éthers dans la littérature. Mis à part l'éther diméthylque (DME) [3, 4, 5], peu de travaux expérimentaux existent concernant l'oxydation des autres éthers souvent utilisés comme additifs dans les carburants et biocarburants: l'éther éthylique (DEE) [6, 7, 8, 9], l'éther di-isopropylique (DIPE) [8] ou le méthyl tert-butyl éther (MTBE) [10].

Aussi, dans le cadre du programme de recherche RIPER (Étude des risques liés à la peroxydation des produits chimiques, 2008-2011), l'INERIS a mené une étude théorique approfondie basée sur des calculs de chimie quantique visant à identifier les produits et chemins réactionnels impliqués dans le processus de peroxydation de l'éther éthylique (à température ambiante pour refléter les conditions de stockage).

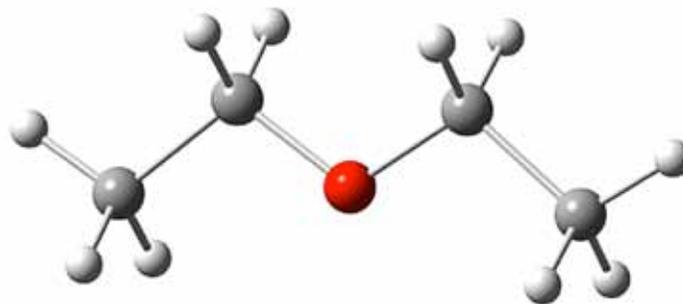
Couplées à des développements de méthodes expérimentales de vieillissement thermique accéléré associés à la caractérisation des produits formés lors de l'oxydation du DEE (acétaldéhyde, formaldéhyde, acide acétique, acide peracétique, éthanol...) dans différentes conditions (température, lumière, oxygène), ces données énergétiques permettront de développer un modèle cinétique détaillé du mécanisme d'oxydation de l'éther éthylique.

## Collaborations

ENSCP Chimie ParisTech – Équipe de modélisation des systèmes complexes

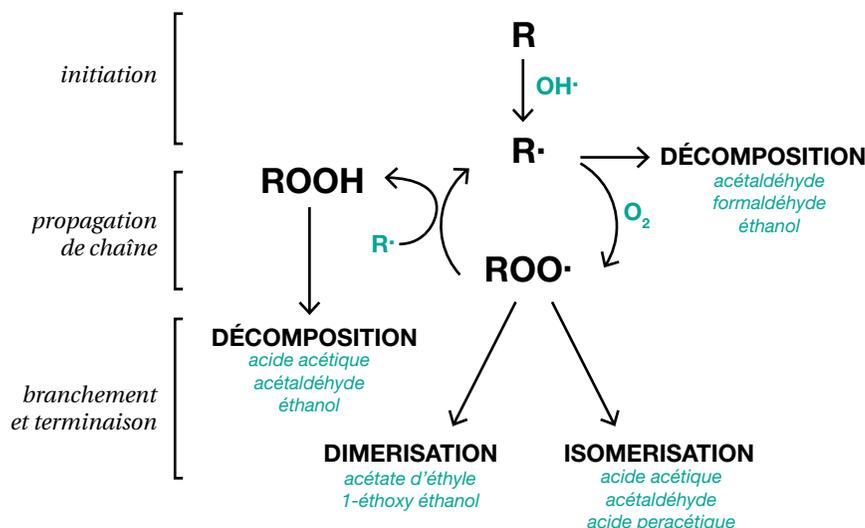
ENSIC – Équipe KinCom (Cinétique de combustion) du LRGF (Laboratoire réactions et génie des procédés)

**Figure 1**  
Représentation de la molécule d'éther diéthylique (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O).



**Figure 2**

Schéma global du processus d'oxydation du DEE (avec identification des produits issus de chaque chemin de branchement).



## Références

- [1] Kelly R. J., *Chem. Health Saf.*, 1997, 3, p. 28.
- [2] Lemarquand J., Triolet J., *Cahier de notes documentaires-Hygiène et sécurité du travail*, 2002,186, p. 17.
- [3] Curran H. J., Fischer S. L., Dryer F. L., *Int. J. Chem. Kinet.*, 2000, 32, 741.
- [4] Sehested J., Møgelberg T., Wallington T. J., et al., *J. Phys. Chem.*, 1996, 100, p. 17218.
- [5] Andersen A., Carter E. A., *J. Phys. Chem. A*, 2003, 107, p. 946.
- [6] Lemay A., Ouellet C., *Can. J. Chem.* 1957, 35, p. 124.
- [7] Waddington D. J., *Proc. R. Soc. London Ser. A*, 1959, 252, p. 260.
- [8] Naito M., Radcliffe C., Wada Y., Liu X., Arai M., Tamura M., Loss J., *Prevention Proc. Ind.*, 2005, 18, p. 469.
- [9] Orlando J. J., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2007, 9, p. 4189.
- [10] Zhang T., Wang J., Yuan T., Hong X., Zhang L., Qi F., *J. Phys. Chem. A*, 2008, 112, p. 10487.
- [11] Gaussian 03, Revision B.03, Gaussian Inc., Pittsburg, PA, USA, 2003.
- [12] Di Tommaso S., Rotureau P., Crescenzi O., Adamo C., *Oxidation mechanism of diethyl ether : a complex process for a simple molecule*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 13, pp. 14636-14645, 2011.
- [13] Benaïssa W., Rotureau P., A. Vignes, Rapport d'étude DRA-10-95742-10967A *Étude bibliographique sur la peroxydation des éthers - Aide à la mise en place d'une plateforme expérimentale de caractérisation du phénomène de peroxydation*, 2010.

### Mécanismes réactionnels de l'oxydation du DEE par modélisation moléculaire

La thèse de S. Di Tommaso (2008-2011), en collaboration avec Chimie ParisTech, a été centrée sur l'identification des mécanismes réactionnels de l'oxydation de l'éther diéthylique par modélisation moléculaire. La structure optimisée du DEE est présentée sur la [figure 1](#).

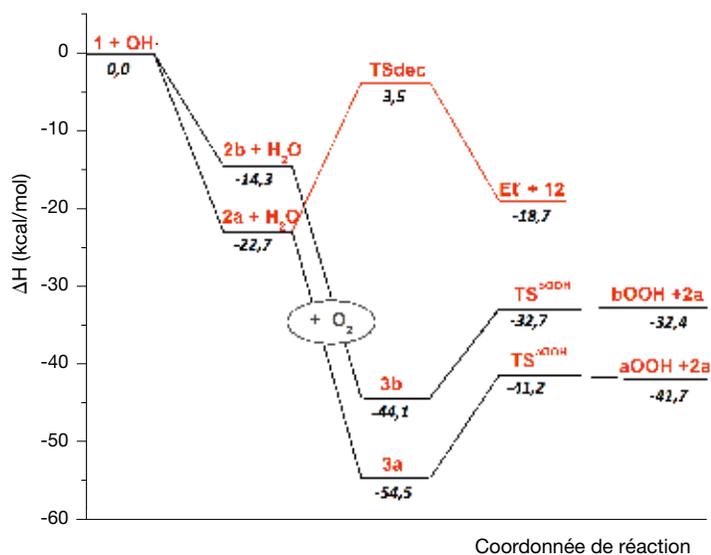
Tous les mécanismes chimiques réactionnels liés à l'autoxydation du DEE (identifiés dans la littérature ou supposés à partir de mécanismes connus de l'oxydation de l'éther diméthylé) ont été caractérisés à l'aide de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT, pour *Density Functional Theory*). Ces calculs, réalisés à la température de 298,15 K et à la pression de 1 atm, mènent à la détermination des données thermodynamiques (énergie électronique avec correction d'énergie au point zéro, enthalpie, énergie

libre de Gibbs) de chaque espèce chimique impliquée dans les réactions (réactifs, états de transition, minima locaux, produits) *via* le logiciel Gaussain 03 [11].

L'ensemble de ces travaux théoriques [12] a mené à la représentation du mécanisme d'oxydation du DEE de la [figure 2](#) (où R représente le DEE: CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OCH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>). Elle indique qu'une molécule de DEE réagit avec un initiateur (une espèce très réactive, tel que le radical OH·) pour former un radical R·.

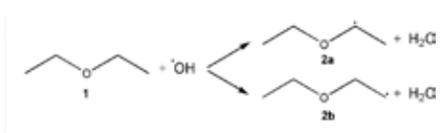
Ce radical peut alors se décomposer ou bien réagir avec l'oxygène moléculaire pour produire un radical peroxyde ROO· qui peut se décomposer, à son tour, par dimérisation ou isomérisation, ou réagir avec une autre molécule de solvant (le même DEE) dans un cycle autocatalytique qui mène à la formation d'une molécule d'hydroperoxyde (ROOH) et d'un autre radical R·. →

**Figure 3**  
Diagramme énergétique de l'étape d'initiation et de la production d'hydroperoxydes (aOOH et bOOH) lors du processus d'oxydation du DEE (Gaussian 03, B3LYP/6-31+G\*\*).



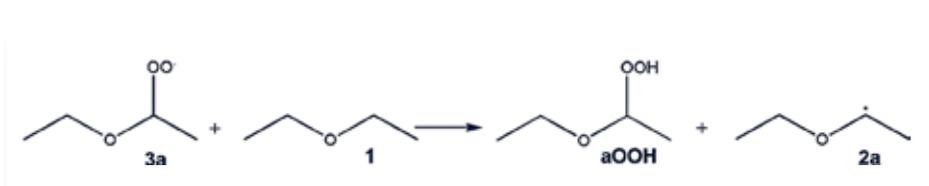
→ Les chemins réactionnels modélisés peuvent être représentés sous forme de diagramme énergétique permettant de visualiser les mécanismes réactionnels thermodynamiquement favorisés. À titre d'exemple, la **figure 3** représente les profils énergétiques des étapes d'initiation et d'une étape de propagation du processus.

L'étape d'initiation (avec un initiateur OH<sup>·</sup>) mène à la formation de deux radicaux R<sup>·</sup> (2a et 2b selon le site d'attaque initial du radical OH<sup>·</sup>):



L'étape d'addition de l'oxygène moléculaire sur les radicaux R<sup>·</sup> mène aux deux radicaux ROO<sup>·</sup> (représentés par 3a et 3b sur la **figure 3**).

Enfin, la production d'hydroperoxyde menant jusqu'à la production d'hydroperoxyde aOOH et bOOH (selon le site d'attaque du radical OH<sup>·</sup>) est réalisée selon la réaction suivante (en considérant seulement la réaction à partir de 3a):



Concernant l'initiation, les calculs effectués indiquent que 2a et 2b sont formés sans barrière d'activation. De plus, le radical sur le carbone terminal (2b) a une énergie supérieure à celle du radical obtenu sur le carbone secondaire -CH<sub>2</sub>-voisin de l'oxygène (2a): la réaction produisant 2a est donc thermodynamiquement favorisée (de 8,4 kcal/mol).

La compétition entre chemins réactionnels commence dès la formation des radicaux R<sup>·</sup> (2a) selon la présence ou non d'oxygène dans le solvant. Lorsqu'une compétition entre chemins réactionnels est identifiée, le calcul des constantes cinétiques de réaction est réalisé avec l'équation d'Eyring découlant de la théorie de l'état de transition et de la thermodynamique statistique:

$$k = \frac{K_B T}{h} e^{-\Delta G^\ddagger / RT}$$

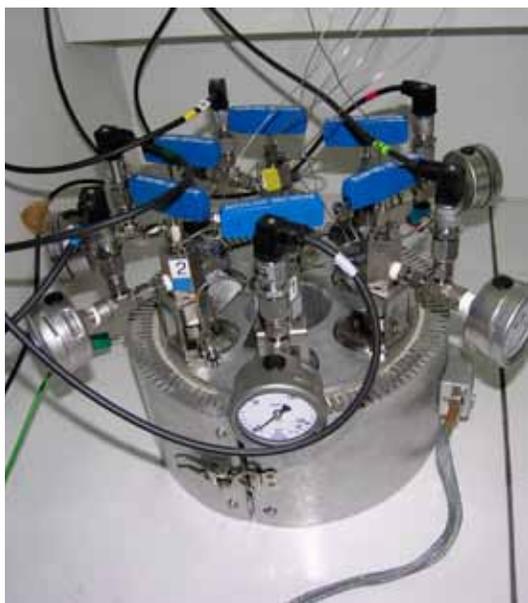
avec  $K_B$  = constante de Boltzmann,  $h$  = constante de Planck et  $\Delta G^\ddagger$  = énergie libre de Gibbs d'activation.

Ainsi, en absence ou presque d'oxygène dissous dans le DEE, la décomposition du radical R<sup>·</sup> (2a) menant à la production d'un radical éthyle (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>·, Et· sur la **figure 3** où seule la voie a est représentée) et à l'acétaldéhyde (noté 12 sur la

**figure 3**), présente une énergie d'activation raisonnable, d'environ 20 kcal/mol, mais elle est endothermique de 4 kcal/mol. Caractérisée par une constante cinétique très élevée ( $k = 1,29 \text{ s}^{-1}$ ), elle est la voie de réaction principale.

En présence d'oxygène, la production des radicaux peroxydes (ROO<sup>·</sup>, 3a) devient prépondérante à cause de son exothermicité (-31,8 kcal/mol) et de l'absence de barrière d'activation à franchir pour que cette réaction ait lieu. La formation de 3a est également favorisée par rapport à celle de 3b (d'environ 10 kcal/mol). Les radicaux peroxydes ainsi formés peuvent évoluer selon trois voies réactionnelles différentes en compétition: la dimérisation, la production d'hydroperoxydes et l'isomérisation (**figure 2**).

Les conclusions de ces travaux théoriques [12] indiquent que les réactions de dimérisation sont clairement improbables, celles de production d'hydroperoxydes sont défavorisées par rapport à l'isomérisation. Les réactions les plus favorisées en solution sont donc la décomposition des radicaux R<sup>·</sup>, dans des conditions de concentration d'oxygène dissous très basse (voire nulle) dans le solvant, et l'isomérisation des radicaux ROO<sup>·</sup> quand l'oxygène est présent dans le milieu réactionnel. Les énergies d'activation de ces deux voies réactionnelles sont en effet comparables ainsi que les valeurs de constantes de vitesse calculées.



Évolution de la quantité de peroxydes au cours du temps

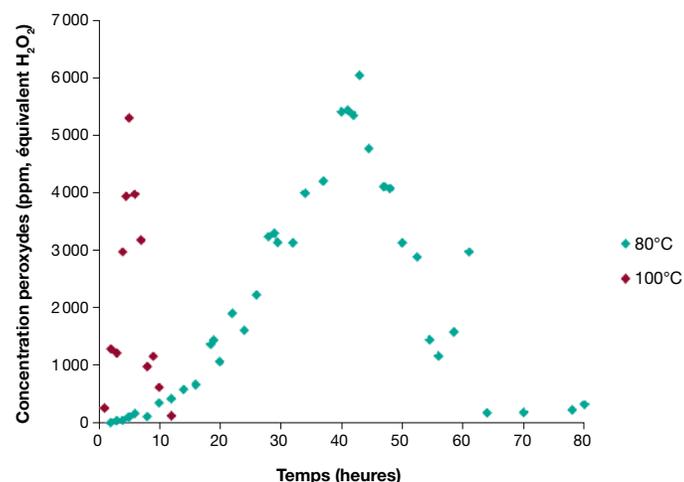


Figure 4

Vieillesse thermique accéléré en autoclaves (inox) : mesure de la concentration de peroxydes formés au cours du temps.

Concernant les dangers liés à l'oxydation du DEE, différents hydroperoxydes ont été identifiés par modélisation moléculaire, notamment le 1-ethoxyéthylhydroperoxyde (aOOH), l'hydroperoxyde d'éthyle (EtOOH), l'hydroperoxyéthyle acétate et l'acide peracétique. Une fois formés, les hydroperoxydes principaux aOOH peuvent se décomposer selon cinq chemins réactionnels différents [12] ayant des barrières d'activation très élevées (de 43 à 74 kcal/mol). Aussi, une accumulation de cette espèce pendant le processus d'oxydation est possible, même si sa vitesse de production n'est pas très importante (constante de vitesse de  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Une telle accumulation de l'hydroperoxyde pourrait représenter la raison majeure du risque accidentel pendant le stockage du DEE.

### Développements expérimentaux

Le stockage des produits chimiques est souvent réalisé à température ambiante. La cinétique réactionnelle est alors très lente et les essais en temps réels peuvent durer plusieurs dizaines de jours. Il est alors fondamental de diminuer le temps d'essai en augmentant la température, ce qui a pour effet d'augmenter la vitesse de formation des peroxydes. Aussi, la partie expérimentale du projet RIPER [13] a consisté à développer des protocoles de vieillissement thermique accéléré, associés à la mesure des produits d'oxydation du DEE formés pendant ce processus au cours du temps (acétaldéhyde, acide acétique, acétate d'éthyle, éthanol, peroxyde d'hydrogène H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, acide peracétique, peroxydes organiques).

Concernant la mise au point de protocole de vieillissement thermique accéléré, six autoclaves de 50 ml en acier inoxydable (figure 4) reliés à un banc chauffant et associés à un logiciel d'acquisition de température et de pression au sein des autoclaves, ont été utilisés afin de pouvoir tester plusieurs échantillons en même temps, à des températures élevées pendant des durées de quelques jours, tout en récupérant suffisamment de produit pour réaliser les dosages des différents produits d'oxydation. Un essai type consiste à introduire 14 ml de DEE dans les autoclaves, d'y appliquer une pression de 10 bars d'air et de chauffer à une température voisine de 100 °C.

Le suivi des produits formés est réalisé par différentes méthodes analytiques :

- le dosage des peroxydes (équivalent en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) est réalisé par titrimétrie : le dosage potentiométrique, utilisant le permanganate de potassium comme réactif titrant permet de doser globalement les fonctions peroxydes. Ce dosage est mis en œuvre à l'aide d'un titrateur automatique muni d'une électrode de platine et d'un agitateur mécanique à hélice, favorisant le mélange des deux phases liquides (phase aqueuse/phase organique) ;

- le dosage des autres produits d'oxydation du DEE (acétaldéhyde, formaldéhyde, acide acétique, éthanol notamment) est réalisé par des méthodes chromatographiques (HPLC et chromatographie en phase gazeuse).

La figure 4 présente l'évolution des concentrations en peroxydes à deux températures différentes, 80 et 100 °C. Ces premiers résultats indiquent la production de peroxydes allant jusqu'à 6000 ppm pour des essais à 80 °C, pour des durées de 45 heures. Le temps d'induction (phase d'initiation au cours de laquelle les peroxydes ne sont pas détectables) diminue avec la température. D'autre part, l'enregistrement de la pression au sein des autoclaves ainsi que les différents dosages mettent en évidence une première étape de production de peroxydes (diminution de pression due à la consommation d'oxygène) et une deuxième étape de décomposition de ces peroxydes entraînant la formation de produits secondaires (augmentation de pression liée à la formation de composés volatils). À terme, les résultats obtenus en conditions accélérées devraient permettre de modéliser une cinétique d'oxydation du DEE dans des conditions réelles de stockage (et de déterminer le temps d'induction d'apparition d'un risque d'instabilité à température ambiante). →

## CONCLUSION

Un mécanisme détaillé de l'oxydation de l'éther diéthylique a été obtenu à l'aide de la modélisation moléculaire et de calculs DFT. Couplées aux données cinétiques obtenues à l'INERIS (suivi des espèces produites au cours du temps en fonction de différents paramètres expérimentaux: température, pression, ajout d'antioxydants...), ces données thermodynamiques et les constantes de vitesse des voies réactionnelles calculées seront utilisées comme données d'entrée pour développer et/ou valider un modèle cinétique détaillé du processus d'oxydation du DEE. Ce dernier permettra de suivre la concentration des produits d'oxydation au cours du temps et de déterminer, par exemple, le temps et

la concentration critique en hydroperoxydes à partir desquels un risque d'instabilité et de décomposition explosive existe à une température donnée.

Cette étude théorique sera également complétée par celle de l'inhibition de l'oxydation de l'éther diéthylique. En effet, pour diminuer le phénomène de peroxydation et augmenter la durée de stockage, des inhibiteurs (tels que l'hydroquinone) sont ajoutés mais leurs mécanismes d'action sont encore mal connus. Enfin, nous étudierons ce même processus de peroxydation pour d'autres molécules de type éther (*e.g.* DIPE, éther diisopropylique) par analogie avec l'étude théorique menée sur le DEE.

## ABSTRACT

Numerous organic compounds spontaneously decompose, by reaction of a free-radical of the carbon chain with molecular oxygen, in a self-propagating process of auto-oxidation, which may generate a large variety of peroxide molecules. Many laboratory accidents can be ascribed to the presence of such peroxides in chemicals storage, often under poor conditions, for over-long periods. Ethers are typical solvents showing such a behavior. However, few works are focused on the mechanistic study of their reaction of oxidation. This work, carried out within the INERIS research project named RIPER (for "study of Risk linked to the PERoxidation of chemical products"), presents the results of an in-depth theoretical study based on DFT calculations, aiming to identify all the reaction paths (and products) involved in the diethyl ether oxidation process (at ambient temperature and under conditions that reflect normal storage conditions). DFT calculations indicate that this mechanism follows a classical scheme of chain initiation, chain propagation, and chain branching and termination. Different competitions have been identified between several chain branching pathways (such as hydroperoxides decomposition and isomerization pathways). They also indicate that industrial hazards could be related to hydroperoxide accumulation due to the relatively high activation barrier to further decomposition. Coupled with experimental work aiming to measure the amount of experimental products (such as acetaldehyde, acetic acid and organic peroxides) during accelerated oxidation of DEE at various temperatures, all energetic parameters calculated in this theoretical work will be used to develop a detailed chemical kinetic model of the oxidation process of DEE.



Contributeur



Adeline Floch-Barneaud

## FOCUS

# LES POLYBROMODIPHÉNYL ÉTHERS (PBDE)

Les PBDE, principaux retardateurs de flamme bromés entrant dans la composition de nombreux produits manufacturés d'usage quotidien (ordinateurs, chaises en polyuréthane, automobiles, etc.), sont suspectés d'être des perturbateurs endocriniens. Il s'agit d'une famille de substances comprenant 209 congénères dont l'utilisation de certains est progressivement interdite en Europe.

Les PBDE sont ubiquitaires et persistants dans l'environnement mais leur devenir dans les médias environnementaux est mal connu, et l'exposition de la population générale reste à ce jour mal estimée. Si l'alimentation est une voie d'exposition aux PBDE reconnue, de plus en plus d'études mettent en évidence le rôle probablement important de l'exposition aux poussières de l'air intérieur, en particulier dans des immeubles de bureaux professionnels.

Dans ce contexte, l'INERIS vient de terminer, dans le cadre d'un appel à projet de l'ANSES, une étude de faisabilité visant à mieux connaître, pour les PBDE, le continuum source-exposition-dose interne chez l'homme, en couplant, pour la première fois en France, des mesures des PBDE dans les poussières et l'air des bureaux et de leur présence dans le sang de leurs occupants.

Coordinateur et promoteur du projet d'étude, l'INERIS a réalisé ces travaux en partenariat avec un médecin investigateur et une entreprise privée qui a mis à disposition des bureaux dans un immeuble situé en Ile-de-France.

Après une analyse bibliographique, la première phase du projet a consisté en la mise au point des méthodes de prélèvement et d'analyse des PBDE pour plusieurs matrices (sérum, air, poussières fraîches). Onze congénères ont été recherchés. L'originalité de cette étude repose notamment sur la prise en compte des congénères les plus faiblement bromés.

Une méthode de prélèvement de poussières, déposées par essuyage de plaques artificielles, a été spécifiquement développée et utilisée pour cette étude. Des prélèvements aériens actifs et passifs ont été menés.

Ayant obtenu l'avis favorable du Comité de protection des personnes (CPP) et de l'Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé (AFSSAPS), la campagne de mesures *in situ* a été réalisée parmi 31 volontaires (17 femmes et 14 hommes) employés dans les bureaux mis à disposition.

Les résultats indiquent que la somme des PBDE mesurés dans le sang des volontaires est comprise entre 0,2 et 12,5 ng/g de sérum (moyenne = 2 ng/g de sérum). Pour la plupart des congénères recherchés, les valeurs sont du même ordre de grandeur que dans les autres études européennes et, en particulier, dans la seule autre étude française ayant recherché ces substances dans le sérum à la date de l'étude. Les échantillons sanguins contiennent majoritairement du BDE-209, congénère le plus utilisé actuellement.

Les masses de PBDE dans les poussières déposées sont comprises entre 1,2 et 19,3 ng/100cm<sup>2</sup> (pour le mois de dépôt). Dans l'air des bureaux, les concentrations en PBDE sont comprises entre 2,8 et 26,9 ng/m<sup>3</sup> pour les prélèvements actifs. Les tests statistiques ne mettent pas en évidence de lien significatif (test de non-nullité du coefficient de corrélation) entre les concentrations dans l'air, les poussières et les concentrations dans le sang des individus.



# Nano- technologies



## Interview



**Rémy Maximilien**  
Médecin toxicologue,  
CEA

# Approfondir les connaissances en toxicité et écotoxicité

### Quelles sont les principales avancées des travaux développés à l'INERIS et de ceux en partenariat avec le CEA ?

— **R. M. :** L'essor des nanotechnologies s'accompagne d'une montée des inquiétudes du public qui redoute des effets délétères inattendus, d'autant que l'on remet actuellement en question les approches de la toxicologie conventionnelle pour les appréhender. Devant la diversité des activités susceptibles d'utiliser des nanoparticules de synthèse, l'INERIS développe, en partenariat avec le CEA, des méthodes et des procédés innovants pour établir des systèmes de référence et les bases d'une toxicologie prédictive. L'objectif est d'évaluer l'impact des nanotechnologies sur la santé et l'environnement et de consolider la sécurité d'emploi des nanoparticules. Deux axes ont été privilégiés pour, d'une part, résoudre les interrogations sur la capacité singulière des nanoparticules métalliques à franchir les diverses barrières biologiques de l'organisme en standardisant les conditions d'analyse du passage et des effets des nanoparticules de SiO<sub>2</sub> et de TiO<sub>2</sub> entièrement caractérisées et marquées par un traceur optique et, d'autre part, pour mettre en place les outils d'exploration des effets pulmonaires puisque les expositions humaines potentielles devraient essentiellement relever de l'inhalation de nanoparticules. À cet égard, les nanotubes de carbone font l'objet d'une attention particulière en vue de répondre aux interrogations d'éventuelles similarités avec les fibres d'amiante.

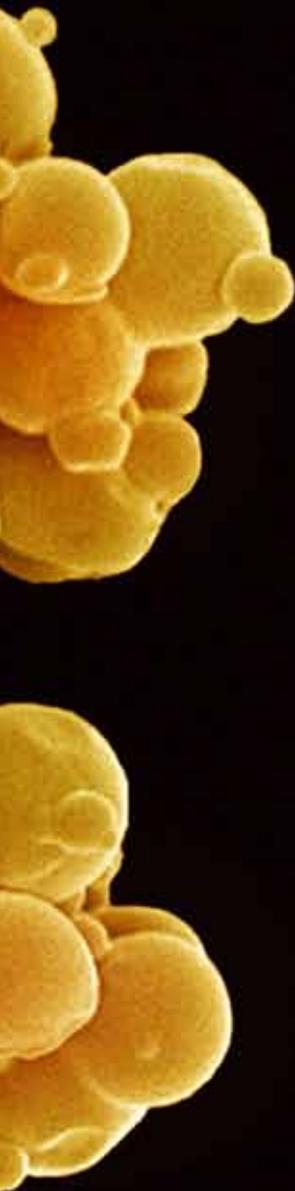
### Quels sont les axes à développer ?

— **R. M. :** L'ambition est de développer une approche intégrée et systématique de toxicologie des nanoparticules explorant les réponses cellulaires et physiologiques.

Dans cette perspective, les outils de génomique apparaissent essentiels pour classer les nanoparticules en fonction des réponses biologiques qu'elles induisent, la toxicologie conventionnelle ne permettant pas d'appréhender toutes leurs singularités physicochimiques. La complémentarité des équipes en matière de modélisation, synthèse, caractérisation et marquage des nanoparticules est un atout majeur pour mettre en œuvre ces techniques sur un large spectre de modèles toxicologiques et écotoxicologiques, et, à terme, pour proposer des systèmes multidimensionnels alternatifs à l'expérimentation animale.

### La sécurité des nanotechnologies est essentielle pour leur acceptation par le public. Quelles sont les approches de travail développées dans ce domaine ?

— **R. M. :** Le développement d'approches ciblées sur quelques nanoparticules demeure indispensable pour simuler l'exposition humaine, notamment l'inhalation, et valider les modèles alternatifs. L'enjeu est de lever les verrous techniques de génération contrôlée d'aérosols de nanoparticules et leur quantification dans les organes/tissus pour assurer des expérimentations de biocinétique et d'analyse des effets à court et long termes. La complémentarité des plateformes d'inhalation en froid de l'INERIS et en chaud du CEA confère au partenariat un positionnement unique. L'ensemble de ces investigations toxicologiques – menées conjointement aux analyses de procédés de fabrication et de manipulation des nanoparticules permettant de qualifier les expositions humaines – visent à garantir la sécurité d'emploi des nanoparticules et, à terme, à contribuer à l'élaboration de normes.





Jacques  
Bouillard



Contributeur

# INERIS: acteur européen

## dans la sécurité des nanotechnologies

### Références

[1] Amodeo T., Dutouquet C., Le Bihan O., Attoui M., Frejafon E., 2009, *On-line determination of nanometric and sub-micrometric particle physicochemical characteristics using spectral imaging-aided Laser-Induced Breakdown Spectroscopy coupled with a Scanning Mobility Particle Sizer*, *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy* 64, pp. 1141-1152.

[2] Amodeo T., Dutouquet C., Tenegal F., Guizard B., Maskrot H., Le Bihan O., Frejafon E., 2008, *On-line monitoring of composite nanoparticles synthesized in a pre-industrial laser pyrolysis reactor using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 63, pp. 1183-1190.

[3] Devilliers M., 2009-2012, Thesis in *Modélisation des nanoparticules*, école des Ponts et Chaussées, University Paris-Est Marne-la-Vallée, France.

[4] Henry F., 2010-2013, Thesis on *Thermodynamique des systèmes nano-dispersés: application au cas de l'agglomération de nanoparticules*, LSGC, Institut Polytechnique de Lorraine, France, Nancy.

[5] Vignes A., Fleury D., 2011, *Guide méthodologique: évaluation des risques accidentels aux postes de travail (Nano-Innov/Nano-Cert/DRA 95 IIIA)*.

[6] Bouillard J.-X., Vignes A., 2011, *A Risk evaluation method for nanoparticles via a control banding approach* – to be submitted.

Le plan national Nano-Innov, lancé en 2009, a consisté à structurer la recherche dans les nanotechnologies tout en s'efforçant d'assurer la sécurité des installations, des opérateurs ainsi que celle des produits manufacturés. Dans son sillage, le développement d'une métrologie spécifique des nano-objets est apparu comme préalable à toute étude de sécurité, d'analyse de risques et des recommandations qui en émanaient. Par le terme métrologie, on entend non seulement les moyens de mesure de la taille, de la concentration en particules à une taille donnée, de la signature chimique en volume et en surface, mais aussi des moyens de mesure des caractéristiques chimiques, réactionnelles, thermiques, électrostatiques qui sont susceptibles de générer un danger. Une fois ces particules caractérisées, des études plus spécifiques des effets toxicologiques et écotoxicologiques ou accidentels peuvent alors être menées. Ainsi, l'INERIS s'est engagé très tôt, *via* des projets nationaux et européens, dans les domaines de la détection et caractérisation, de l'expologie, des effets toxiques et écotoxicologiques, de l'incendie et de l'explosion, de la sécurité des procédés et de celle du travailleur et, récemment, dans le domaine des études socio-économiques. Par la suite, ces contributions seront détaillées en précisant le ou les projets européens auxquels ils se rapportent.

### Métrologie: détection et caractérisation

En matière de métrologie, la détection et la mesure de concentration de nanoparticules dans l'atmosphère et dans les liquides (eau,

milieu biologique) présentent des difficultés nouvelles du fait de la taille des particules que l'on souhaite observer, qui font que les mesures traditionnelles ne sont plus applicables. Plusieurs nouvelles techniques sont étudiées dans les projets européens. L'un des premiers types de mesures par LIBS (*Laser induced breakdown spectroscopy*) a été proposé par l'INERIS dans NANOSAFE2 comme méthode d'analyse dans l'air de la signature chimique des nanoparticules pour le cas de surveillance des ambiances au travail ainsi que pour le cas de contrôle, régulation et sécurisation de procédés de production [1, 2].

L'un des facteurs spécifiques aux nanoparticules, influençant les dangers chroniques ou accidentels, résulte de leur capacité à s'agglomérer, et à se comporter rapidement comme une micropoudre. Deux thèses de doctorat en cours, une sur la thermodynamique des systèmes nanodispersés, l'autre sur la modélisation des nanoparticules dans l'air, viendront consolider les projets européens et permettront de mieux comprendre les phénomènes d'agglomération et de condensation liés aux nano-objets [3, 4].

### Risques liés à l'intensification des procédés par les nanotechnologies

L'intensification des procédés par l'utilisation des nanotechnologies vise à produire les composés chimiques de façon plus sûre, plus propre et plus efficiente par des systèmes de production beaucoup plus intégrés et réduits. Dans le cadre du projet DEMCAMER ([www.cordis.europa.eu](http://www.cordis.europa.eu)), les procédés de production d'hydrogène sont réduits de sept à deux étapes en utilisant une technologie de réacteurs membranaires nanostructurés, pour laquelle l'INERIS évaluera la sécurité du procédé intensifié et ses impacts socio-économiques.

### Analyse des risques au poste de travail

Dans les projets NANOSAFE2 ([www.nanosafe.org](http://www.nanosafe.org)) et SAPHIR ([www.saphir.fr](http://www.saphir.fr)), l'INERIS a développé une méthodologie d'analyse de risques au poste de travail basé sur le *control banding* (figure 1), une façon de positionner le risque en considérant que le danger toxique ou d'explosion

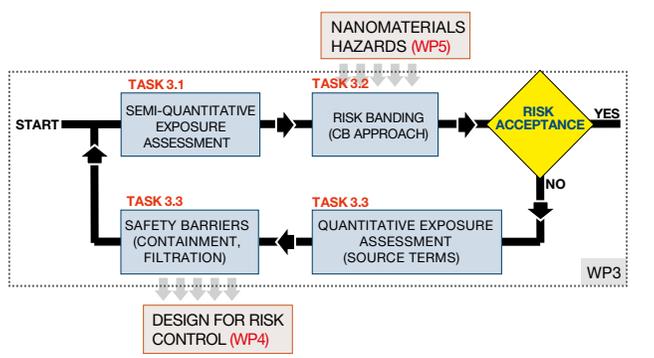


Figure 1

Principe de l'évaluation des risques au poste de travail d'un procédé industriel par la méthodologie du Control Banding.

du produit considéré tient dans une bande d'incertitude du danger et non plus par une quantification exacte d'un danger [5, 6]. Cette approche, qui permet de préconiser rapidement le type de barrières de sécurité à mettre en œuvre (filtration, réduction des atmosphères explosives...), a été testée sur plusieurs ateliers de fabrication.

### Toxicologie et écotoxicologie

Le projet NANOSAFE2 a visé à développer et à valider des tests de toxicité pulmonaire *in vitro*. Il s'agissait de déterminer la cytotoxicité (capacité à provoquer des altérations cellulaires et mort des cellules) de différents types de nanomatériaux (nanoparticules de silice, d'argent, de titane ainsi que les noirs et nanotubes de carbone) [7, 8]. Il a été montré que certaines nanoparticules (par exemple, l'argent, le cuivre ou le zinc) avaient un pouvoir biocide et donc une cytotoxicité importante. Pour mieux comprendre les phénomènes de transport transmembranaire (air-sang), des modèles de barrière alvéolo-capillaire pulmonaire en coculture de cellules épithéliales humaines sont construits et testés dans le cadre du nouveau projet QNANO ([www.qnano.ri-eu](http://www.qnano.ri-eu)) [9]. L'évaluation des performances de ce type de barrière est l'un des éléments importants de l'arsenal des méthodes alternatives *in vitro* mises en place au niveau européen pour répondre à l'identification des conditions de translocation ou biodistribution de nanoparticules vers d'autres organes.

### Analyse des impacts socio-économiques des nanotechnologies via l'analyse du cycle de vie

L'objectif de ce type d'analyse est d'évaluer les coûts et bénéfices sociétaux liés à l'exploitation d'une technologie ou d'un nouveau produit, ce qui est exigé dans le cas de l'enregistrement réglementaire de nouvelles substances (REACH 1907/2006). Les gains et bénéfices socio-économiques d'un produit ou d'une technologie sont évalués en termes financiers et de bien-être sociétal (impacts sociétaux: nombre et type d'emplois créés ou maintenus, qualité des emplois, développement économique, qualité de

vie...) tout en considérant les impacts sanitaires et environnementaux. En se basant sur les résultats de l'analyse du cycle de vie (ACV), du retour d'expérience issu de la littérature et de la prise en compte des critères de développement durable, les impacts socio-économiques d'un produit ou d'une technologie peuvent ainsi être analysés en supposant plusieurs scénarios d'utilisation de la technologie considérée [10].

### CONCLUSION

En ayant construit sa recherche et ses réponses aux projets européens sur le schéma d'activités décrites précédemment, l'INERIS a ainsi bâti au fil du temps, dans le domaine de la nanosécurité, une gamme de compétences techniques en recherche, expertise, certification et formation. Pour consolider cet atout, de nouveaux investissements sont prévus, à savoir une construction d'une halle nanosécurisée qui permettra de développer et tester de nouveaux essais en sécurité industrielle, essais qui viendront compléter ceux réalisés dans la plateforme expérimentale pour la validation et le développement de méthodes alternatives en expérimentation animale pour les tests de toxicité par d'inhalation. Ces investissements permettront à l'INERIS de consolider ses atouts et de rester un acteur européen clé dans ce domaine.

### Références

- [7] Elgrabli D., Abella-Gallart S., Robidel F., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G., 2008, *Induction of apoptosis and absence of inflammation in rat lung after intratracheal instillation of multiwalled carbon nanotubes*, Toxicology 253, pp. 131-136.
- [8] Rogerieux F., Maillot-Maréchal E., Moisan F., Robidel F., Elgrabli D., Delalain P., Lacroix G., 2007, *Time course of TiO<sub>2</sub> and carbon black nanoparticles induced pulmonary inflammation in rats*, Toxicology Letters 172, S122.
- [9] Dekali S., Gamez C., Rogerieux F., Rat P., Lacroix G., *Characterization of a new coculture model of alveolo-capillary barrier developed to study the translocation and the toxicity of nanoparticles*, Toxicology Letters 205, 2011, S156.
- [10] Affeltranger B., Brignon J.-M., 2011, *Socio-Economic Analysis (SEA), Safety Issues and Risks of nanotechnologies for Society*, Barcelona.

### ABSTRACT

Nanoparticles are synonymous of properties and functionalities that are very different from those of bulk materials. These nano-objects are coming today to a status of industrial commercialization, by which they can REACH all industrial sectors (cosmetics, plastics, concretes, alloys...), because new composites based on these nanoobjects can display exceptional electrical, mechanical, chemical or optical properties. Since 2005, the EU has encouraged member states to develop their competences and skills in these new materials, so as to be able to produce and commercialize them in a safe way. INERIS has successfully taken this opportunity, by responding to these calls and by collaborating with EU partners in various EU projects by offering its unique competences and skills in management of environmental and industrial risks, considered as key factors in the development of these technologies.



## Contributeurs



Alexis  
Vignes



Dominique  
Fleury



Agnès  
Janes



Badr  
R'Mili

# Mise en évidence de l'émission de nanotubes de carbone lors de la combustion de polymères nanocomposites

Les nanotechnologies se développent rapidement et génèrent de nombreux matériaux innovants aux applications les plus diverses. Cette évolution technologique concerne notamment l'industrie des matières plastiques ou des additifs couramment utilisés dans la fabrication des matériaux polymères pour obtenir des matériaux plastiques et des polymères composites renforcés. Si l'incorporation de nanomatériaux manufacturés peut présenter une percée majeure dans ce secteur, elle peut aussi entraîner de nouveaux risques au cours du cycle de vie du produit, en cas de libération des charges contenues dans la matrice polymérique [1, 2]. Notre étude apporte un élément de réponse à cette problématique en identifiant

et en caractérisant les émissions de nanotubes de carbone lors de la combustion de polymères nanocomposites.

## 1. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL MIS EN PLACE

### Prototype de four INERIS

Notre expérience s'appuie sur un prototype de four conçu et installé à l'INERIS spécifiquement pour étudier l'émission de nano-objets lors de la combustion de produits polymériques. Composé de trois blocs fonctionnels (figure 1), sa conception (dimensionnement, aéralique) a été réfléchi dans le but de couvrir des régimes de combustion sub-stœchiométriques. Les masses mises en jeu et les transferts thermiques ont également été optimisés de manière à faciliter la détection et la caractérisation des nano-objets émis lors de la combustion de matériaux<sup>2</sup>.

### Stratégie de mesure

Des mesures d'analyse thermique différentielle ont été entreprises afin d'évaluer la cinétique de combustion des matériaux testés. En parallèle, la distribution granulométrique a été caractérisée via un ELPI (*Electrical Low Pressure Impactor*) et des prélèvements sur filtre ont été effectués par échantillonnage dans les fumées de combustion, grâce à un nouveau dispositif basé sur l'utilisation de grilles MET (Microscopie électronique à transmission). La taille des particules pour lesquelles l'efficacité du prélèvement est optimale

Figure 1

Blocs fonctionnels constituant le four INERIS.

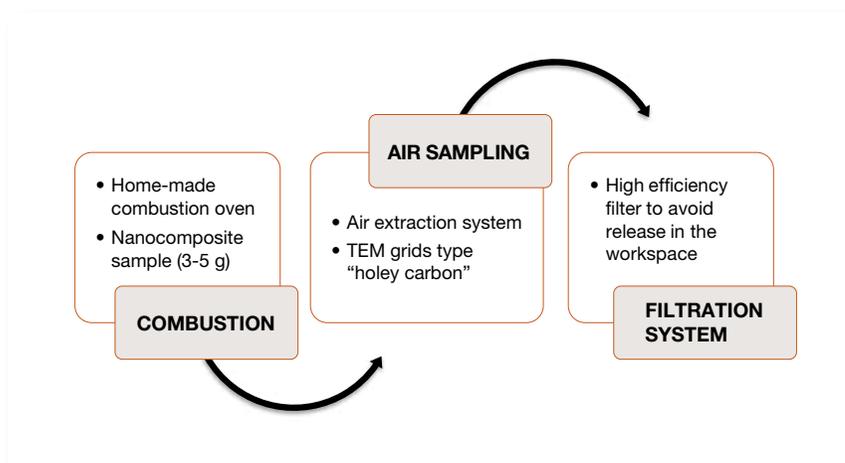
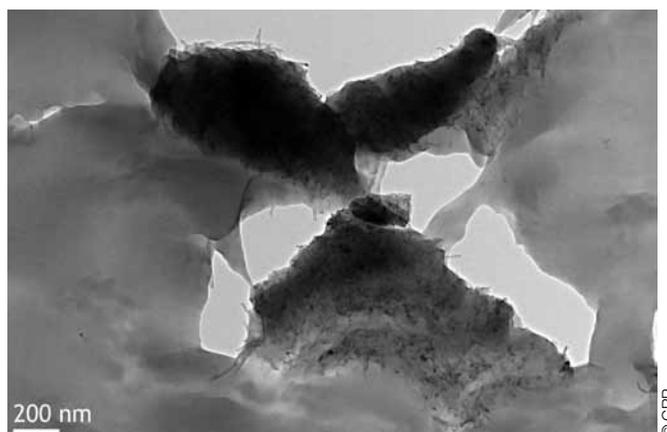


Figure 2

Image réalisée au microscope électronique à balayage présentant la structure interne du polymère nanocomposite testé.



peut être ajustée en modifiant les débits d'aspiration. Cette technique a été récemment décrite par l'INERIS [3]. Les grilles, d'un diamètre de 3,05 mm, sont composées d'un film de carbone poreux (*holeycarbon film*) reposant sur une grille en nickel. La surface du support comporte de nombreux trous de tailles irrégulières qui permettent de bénéficier d'une souplesse supplémentaire dans l'optimisation des conditions de prélèvement. Ceci est particulièrement avantageux dans notre cas, lorsque la nature de l'aérosol à mesurer et/ou l'efficacité de capture sur la grille sont mal connues et que les conditions de prélèvement (durée, débits) ne peuvent pas être ajustées avec précision. Après l'échantillonnage, les grilles sont analysées grâce à un MET équipé d'une sonde à rayons X. Cet équipement permet d'obtenir des informations à la fois sur la morphologie et sur la nature chimique des particules.

### Matériaux testés

Des matériaux nanocomposites, composés d'une matrice polymérique enrichie avec des nanotubes de carbone (NTC) ont été utilisés pour nos tests. Les échantillons ont été préparés sur une extrudeuse à bi-vis corotative Haake PTW24/40, à une température proche de 240 °C. La matrice polymérique est du type ABS (acrylonitrile-butadiène-styrène, réf. BASF Terluran® HH112) qui présente une bonne stabilité à haute température. Les nanotubes (de type multiparois, réf. Arkema Graphistrength™ C100 [4]) sont produits par un procédé de dépôt CCVD (*Carbo-*

*neous Chemical Vapour Deposition*). Ils ont un diamètre interne compris entre 10 nm et 15 nm, une longueur allant de 0,1 µm à 10 µm et un nombre de parois compris entre 5 et 15. Le procédé de production met également en œuvre des catalyseurs métalliques (composés de fer et d'aluminium) qui conduisent généralement à la présence de nanoparticules métalliques à la surface des NTC produits [2]. Le produit final se présente sous la forme d'une poudre fine dont la pureté est d'environ 90 % (pourcentage massique de carbone graphitique sur la masse totale). Cette poudre est constituée d'agglomérats (pelotes de nanotubes) d'une centaine de micromètres de diamètre.

Le dosage et l'injection dans l'extrudeuse sont effectués à l'aide d'un chargeur calibré, de manière à produire un matériau final contenant 3 % massique de NTC. Les analyses par MEB (microscopie électronique à balayage) indiquent que le produit final (granulés obtenus après extrusion) est composé de deux phases polymériques: une phase homogène pauvre en NTC et une phase riche en NTC (figure 2).

## 2 \_ RÉSULTATS

### Cinétique de combustion et mesures directes

La cinétique de combustion de l'échantillon nanostructuré est similaire en tout point avec celle de l'essai témoin (mené sur la même matrice polymérique sans ajout de nano-objets). →

## Références

- [1] Lam C.-W., James J. T., McCluskey R., Arepalli S., Hunter R. L., *A Review of Carbon Nanotube Toxicity and Assessment of Potential Occupational and Environmental Health Risks*, Critical Reviews in Toxicology, vol. 36, Jan. 2006, pp. 189-217.
- [2] Kohler A., Som C., Helland A., Gottschalk F., *Studying the potential release of carbon nanotubes throughout the application life cycle*, Journal of Cleaner Production, vol. 16, 2008, pp. 927-937.
- [3] R'Mili B., Sirven J.-B., Aguerre-Chariol O., Frejafon E., *Analysis of particle release using LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) and TEM (Transmission electron Microscopy) samplers when handling CNT (Carbon Nanotubes) powders*, Journal of Nanoparticle Research, 2010.
- [4] Bordere S., Corpart J., Bounia N. E., Gaillard P., Passade-Boupat N., Piccione P., Plée D., *Industrial Production and Applications of Carbon Nanotubes*, <http://www.graphistrength.com>, 2007, pp. 1-7.
- [5] Nyden M. R., Marsh N.D., *Characterizing Nanoparticle Emissions from Burning Polymer Nanocomposites*, in Proc. Nanotech Conf. & Expo, Anaheim (CA), USA, 2010, pp. 717-719.
- [6] Chivas-Joly C., Guillaume E., Ducourtieux S., Saragoza L., Lesenechal D., Lopez-Cuesta J.-M., Longuet C., Sonnier R., Duplantier S., Bertrand J.-P., Calogine D., *Influence of carbon nanotubes on fire behavior and on decomposition products of thermoplastic polymers*, in Proc. of the 12<sup>th</sup> International, Fire Science & Engineering Conference (interflam), Nottingham, UK, 2010, pp. 1375-1386.
- [7] Saphir project: *Safe Nanomanufacturing*, online <http://www.saphir-project.eu/>

### Notes

1. Selon la définition donnée dans la spécification technique ISO TS 27687 - 2008(F).
2. Le détail de l'équipement est la propriété intellectuelle de l'INERIS (brevet en cours de dépôt) et ne peut pas être explicité dans cet article.

Figure 4

NTC isolés, prélevés dans les fumées de combustion. (Analyse MET, échelle: 100 nm.)

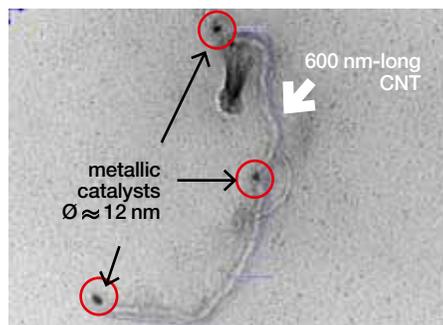
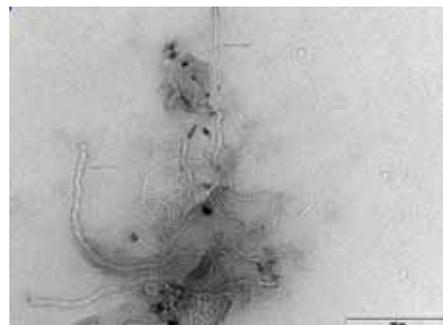


Figure 5

Agglomérat de NTC prélevé dans les fumées de combustion. (Analyse MET, échelle: 200 nm.)

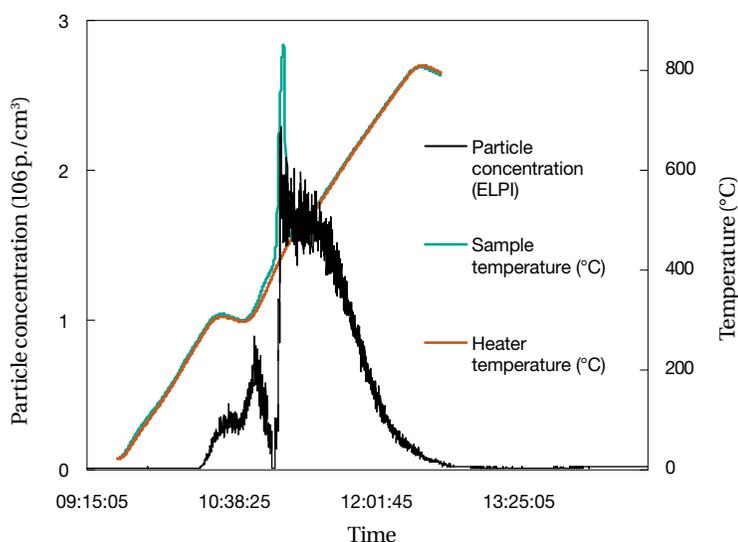


## Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du projet SAPHIR [7], supporté par la Commission européenne à travers le sixième programme-cadre de recherche et développement. Nous remercions le Dr João A.S. Bomfim (CRP, Centro Ricerche Plast-Optica) pour sa participation à l'étude.

Figure 3

Cinétique de combustion (mesure différentielle de la température) et concentration particulaire enregistrées au cours de l'essai.



→ La mesure de la concentration de particules dans les effluents révèle deux pics d'émission (à 300 °C et 400 °C) qui, dans le second cas, est corrélée avec l'augmentation de température de l'échantillon (figure 3) et confirme une libération massive de nanoparticules dans les fumées. À ce stade, les mesures directes ne permettent pas d'identifier la présence de NTC dans les fumées, principalement constituées de composés carbonés et qui présentent naturellement une concentration élevée en nano-objets. Par ailleurs, aucune différence significative n'est décelable entre les mesures effectuées sur l'échantillon nanocomposite et sur le témoin.

## Caractérisation des effluents de combustion

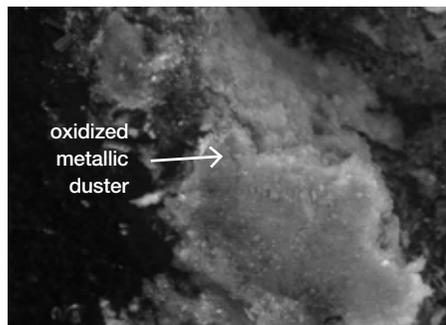
Pour aller plus loin dans l'étude des mécanismes d'émission, l'analyse des grilles de prélèvement a été réalisée afin d'identifier précisément le type de nanoparticules libérées dans les effluents de la combustion. Conformément à nos attentes, l'analyse des prélèvements effectués sur le test témoin (matrice polymérique non chargée) n'a pas révélé de NTC. En revanche, les résultats correspondant à la combustion de l'échantillon nanocomposite ont révélé la présence de plusieurs NTC isolés et agglomérés dans les fumées. Les fibres présentent une structure sensiblement altérée et des catalyseurs métalliques sont toujours attachés à leurs extrémités (figures 4 et 5). Ce résultat surprenant témoigne d'une libération des NTC (initialement emprisonnés dans la matrice) par le processus de combustion.

## Caractérisation des cendres

Dans les deux cas (essai témoin et échantillon nanocomposite), la quasi-totalité du produit est éliminée et libérée dans les fumées au cours de la combustion. L'analyse au MEB des cendres résiduelles a été menée sur les deux matériaux et présente des compositions similaires. Néanmoins, les cendres de l'échantillon nanocomposite contiennent des particules rouges (quelques centaines de micromètres) qui ne sont pas présentes dans le cas témoin (figure 6). L'analyse révèle que ces particules sont principalement composées d'oxydes métalliques (aluminium et fer) (figure 7), une signature qui correspond à la composition des catalyseurs utilisés pour produire les NTC. Ce résultat témoigne qu'une fraction de NTC (probablement la partie la moins

Figure 6

Particules rouges retrouvées dans les cendres de combustion de l'échantillon nanocomposite (analyse MEB, échelle: 50  $\mu\text{m}$ .)



volatile comme les gros agglomérats) n'est pas libérée dans les fumées et est détruite au cours de la combustion.

### Discussions

Chivas-Joly et al. [6] ont publié une étude qui semble montrer que des fragments de NTC sont émis dans les effluents lors de la combustion de plastiques nanocomposites (matrice en polyméthacrylate de méthyle dans leur cas). Ces résultats corroborent nos observations même si la configuration de test était très différente de la nôtre (calorimètre à cône relié à un appareil ELPI et matrice polymérique différente, pas de prélèvement sur filtre MET). En particulier, le montage utilisé ne permet pas l'observation de fibres potentiellement émises dans les fumées de combustion. De même, nos résultats ne semblent pas contraires aux résultats de Nyden et Marsh [5] du fait de l'utilisation d'une chambre de combustion (type *smoke chamber*) qui semble moins représentative des phénomènes de combustion accidentels (incendie) que le prototype de four INERIS.

Notons également qu'à ce stade, notre montage expérimental ne permet pas d'évaluer quantitativement le nombre ou la concentration de NTC émis lors de la combustion. Par conséquent, il n'est pas encore possible de remonter au facteur d'émission correspondant. Des études sont actuellement en cours à l'INERIS pour permettre de remédier à cette lacune.

### CONCLUSION

Nos résultats démontrent que l'incinération incontrôlée de certains produits contenant des NTC peut conduire à la libération de fibres iso-

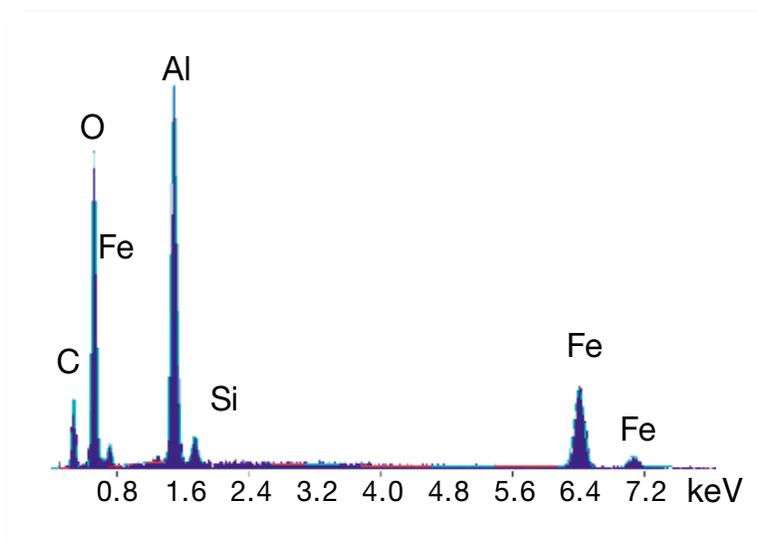
## ABSTRACT

This study focuses on the potential release of airborne carbon nanotubes (CNTs) from burning injection-moulded nanocomposite polymers. This material is composed of an ABS polymer matrix filled with CNTs (3w%, multi-wall CNTs, length/diameter: 0.1-10  $\mu\text{m}$ /10-15 nm). CNTs have been produced through a catalytic carbon vapour deposition process which uses metallic catalysts. The powder is constituted by entangle bundles of several hundred micrometers resulting with purity of about 90% (the rest is mainly composed of metallic catalysts: Al and Fe). Electronic microscopy analyses indicate that the final product (after mould-injection) is composed by a matrix with CNT bundles dispersed here and there. Our experiment relies on new home-made demonstrator system that was setup at INERIS specifically for testing the release of nanoparticles during combustion of polymeric products. Differential thermal analysis measurement helped to monitor the combustion kinetics. In parallel the particle size distribution was recorded via an electrical low pressure impactor (ELPI). Finally the sampling was performed thanks to a new device that enables retrieving the morphological and the chemical composition of airborne particles by the analysis of TEM grids. Our results demonstrate that, during the combustion of the tested polymer nanocomposite, a fraction of CNTs is released in the fumes while the other fraction is destroyed by the oxidation process, thus releasing their catalysts in the ashes. This addresses a new kind of safety issues in regard to the combustion of these products.

lées dans les effluents, soulevant ainsi une nouvelle problématique de sécurité à l'égard de la combustion des nanocomposites. La question des voies d'élimination et du retraitement de ce type de matériaux est un problème crucial qui doit être résolu pour assurer un développement durable de ces matériaux de rupture. Comme nous l'avons souligné, les résultats récents de la littérature [5, 6] corroborent nos observations, les écarts provenant principalement des variances dans les protocoles de test mis en place.

Figure 7

Analyse de la composition chimique des particules rouge retrouvées dans les cendres de l'échantillon (unités arbitraires). Le spectre de diffraction X révèle la présence d'oxydes de fer et d'aluminium.





Ghislaine Lacroix

 **Contributeur**
**FOCUS**

# LA BIODISTRIBUTION DES NANOMATÉRIAUX

## Références

- [1] Al Faraj A., Bessaad A., Cieslar K., Lacroix G., Canet-Soulas E., Cremillieux Y., *Long-term follow-up of lung biodistribution and effect of instilled SWCNTs using multiscale imaging techniques*, *Nanotechnology* 21, 2010, 175103. Epub 172010 Apr 175106.
- [2] Al Faraj A., Cieslar K., Lacroix G., Gaillard S., Canet-Soulas E., Cremillieux Y., *In Vivo Imaging of Carbon Nanotube Biodistribution Using Magnetic Resonance Imaging*, 2009, *Nano Letters* 9, pp. 1023-1027.
- [3] Elgrabli D., Floriani M., Abella-Gallart S., Meunier L., Gamez C., Delalain P., Rogerieux F., Boczkowski J., and Lacroix G. *Biodistribution and clearance of instilled carbon nanotubes in rat lung*. (2008). *Part Fibre Toxicol* 5, 20.
- [4] Péry A., Brochet C., Hoet PHM, Nemmar A., Bois F. Y., *Development of a physiologically based kinetic model for 99m-Technetium-labelled carbon nanoparticles inhaled by humans*, *Inhalation Toxicology* 21, 2009, pp. 1099-1107.

De nombreuses substances, dont les particules ultrafines de la pollution atmosphérique, qui s'apparentent en termes de taille aux nanoparticules (NP), ont montré une activité toxique à distance de leur lieu de pénétration dans l'organisme. Les mécanismes sont encore peu connus mais ces effets peuvent être liés soit à un passage dans le sang des particules, soit à l'initiation d'une cascade d'événements biochimiques et moléculaires au sein de l'organe cible, se répercutant à distance dans l'organisme.

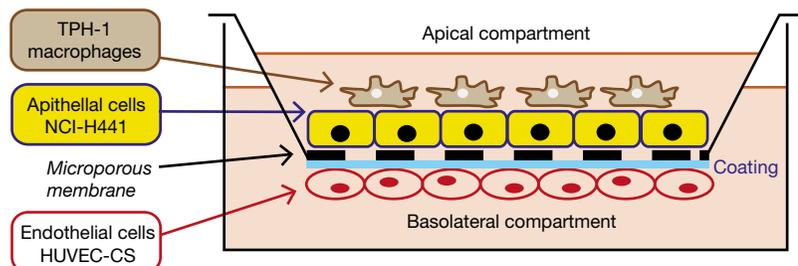
L'INERIS, en partenariat avec l'université de Lyon I, s'est attaché à développer de nouvelles techniques non invasives pour suivre la biodistribution de nanoparticules (magnétite  $Fe_3O_4$ ) ou de nanotubes de carbone. Les techniques de détection utilisées (dosage du fer ou RMN pour les NP de  $Fe_3O_4$ , dosage des impuretés métalliques pour les nanotubes de carbone) ne permettent pas de mettre en évidence le passage significatif de la barrière pulmonaire [1, 2, 3]. Néanmoins, la modélisation de données disponibles dans la littérature a permis de prédire un passage d'environ 10 % de NP carbonées inhalées chez des volontaires [4].

On ne peut donc exclure un éventuel passage dans le sang de certaines NP après pénétration pulmonaire.

Compte tenu de l'extrême diversité des nanoparticules (en termes de taille, forme et composition chimique), l'INERIS cherche à mettre au point des méthodes d'investigation rapides, fiables et peu coûteuses, permettant d'évaluer la capacité des nanoparticules à traverser les barrières physiologiques de l'organisme. Les travaux portent sur le développement d'un modèle *in vitro* de barrière alvéolo-capillaire, mimant l'interface air-sang pulmonaire (figure 1). Les modèles *in vitro* permettent, en outre, de répondre aux exigences de la réglementation REACH en termes de réduction du recours à l'expérimentation animale. Ce travail, qui fait l'objet d'une thèse de doctorat, s'inscrit dans un programme plus vaste couvrant d'autres types de barrières physiologiques (intestinale, rénale, testiculaire...) et est réalisé en partenariat avec le CEA et plusieurs universités françaises (projet Nanotrans). La barrière alvéolo-capillaire est composée de plusieurs éléments dont une membrane basale, des vaisseaux sanguins, du surfactant, des macrophages alvéolaires et des cellules épithéliales (*i. e.* pneumocytes de types I et II). Le modèle développé à l'INERIS est une coculture sur insert de trois

types cellulaires: macrophages, cellules épithéliales et endothéliales (figure 1). Toutes ces cellules sont d'origine humaine et disponibles commercialement.

Les travaux en cours à l'INERIS portent actuellement sur l'optimisation du modèle de barrière et les premières NP seront testées fin 2011.


**Figure 1**

Modèle de barrière alvéolo-capillaire.



## Contributeurs



Nicolas  
Manier



Pascal  
Pandard

# Nanoparticules

Influence des conditions d'essais  
et des paramètres physico-chimiques  
sur l'écotoxicité pour le milieu aquatique

## Références

[1] OECD, *Preliminary guidance notes on sample preparation and dosimetry for the safety testing of manufactured nanomaterials*, 2010.

[2] Manier N., Garaud M., Delalain P., Aguerre-chariol O. et Pandard P., *Ecotoxicity of ceria nanoparticles towards aquatic micro-invertebrates and algae*, Nanosafe 2010, pp. 16-18, November 2010, Minatec, Grenoble, France.

[3] Manier N., Garaud M., Delalain P., Aguerre-Chariol O., Pandard P., 2011, *Behaviour of ceria nanoparticles in standardized test media – influence on the results of ecotoxicological tests*, Journal of Physics: Conference Series, 304:012058.

[4] Van Hoecke K., Quick J. T. K., Mankiewicz-Boczek J., De Schampelaere A., Van der Meeren P., Barnes C., McKerr G., Vyvyan Howard C., Van De Meent D., Ryzdzynski K., Dawson K. A., Salvati A., Lesniak A., Lynch I., Silversmit G., De Samber B., Vincze L., Janssen C. R., 2009, *Fate and effects of CeO<sub>2</sub> nanoparticles in aquatic ecotoxicity tests*, Environ. Sci. Technol. 43:537-46.s

La singularité des propriétés physico-chimiques des nanoparticules (NP) et le fait qu'un grand nombre de produits dits « nanostructurés » sont d'ores et déjà mis sur le marché en font un des sujets majeurs d'étude de ces dernières années. La dissémination de ces NP ou des résidus nanoparticulaires dans les différents compartiments de l'environnement est ainsi devenue une préoccupation grandissante, à l'instar de l'impact potentiel qu'ils peuvent avoir sur les organismes vivants. De nombreuses questions se posent, en effet, quant à l'applicabilité des outils actuels pour évaluer l'écotoxicité de ces produits émergents, notamment dans un cadre réglementaire [1]. Les méthodes de préparation et les propriétés physico-chimiques des milieux d'essai (pH, force ionique) ont notamment été identifiées comme des éléments clés dans l'évaluation de l'écotoxicité des NP. Ils vont en effet conditionner certains paramètres physiques de la suspension tels que l'état d'agglomération des NP et leur stabilité, lesquels peuvent influencer leur écotoxicité. Cependant, peu de travaux concernant l'écotoxicité des NP intègrent de façon systématique l'influence des conditions d'essai, de même que l'importance des propriétés physico-chimiques des NP.

Ainsi, les objectifs de nos travaux sont multiples et visent à étudier l'influence de différentes méthodes de préparation des suspensions d'essai sur l'état d'agrégation de NP, et à identifier les paramètres physicochimiques (état d'agglomération, chimie de surface, taille initiale de la particule) potentiellement responsable de

l'écotoxicité pour les organismes aquatiques. Nous avons pour cela entrepris l'étude de différentes NP d'oxydes de cérium en tant que particules modèles. Ces NP sont utilisées comme catalyseur dans certains moteurs diesels ou comme agent protecteur (anti-rayure, anti-UV) dans les peintures extérieures. Ils peuvent de ce fait se retrouver facilement dans l'environnement. Les effets pour le compartiment aquatique de ces NP ont été appréhendés à travers l'étude de leur écotoxicité vis-à-vis des micro-algues d'eau douce (*P. subcapitata*). Ces organismes, à la base des chaînes trophiques aquatiques, sont classiquement utilisés en tant qu'organismes modèles pour la détermination de l'écotoxicité des substances et préparations chimiques (OCDE).

### Prise en compte de la méthode de mise en suspension et influence de l'état d'agrégation des NP sur leur écotoxicité

Afin d'étudier l'importance de la méthode de préparation des suspensions d'essai sur le comportement en solution des NP de cérium, une poudre nanoparticulaire (taille initiale 25 nm) a été mise en suspension selon quatre modes de préparation: une dispersion par agitation magnétique (24 heures), stabilisée ou non par l'ajout d'acides humiques (AH) et une dispersion par ultrasons (1 min/70 watts) stabilisée ou non par l'ajout d'AH. Ces suspensions d'essai ont été caractérisées en fonction de différents paramètres. La taille moyenne des agglomérats a été suivie par diffusion quasi élastique de la lumière (Zétasizer, Malvern) et l'état →

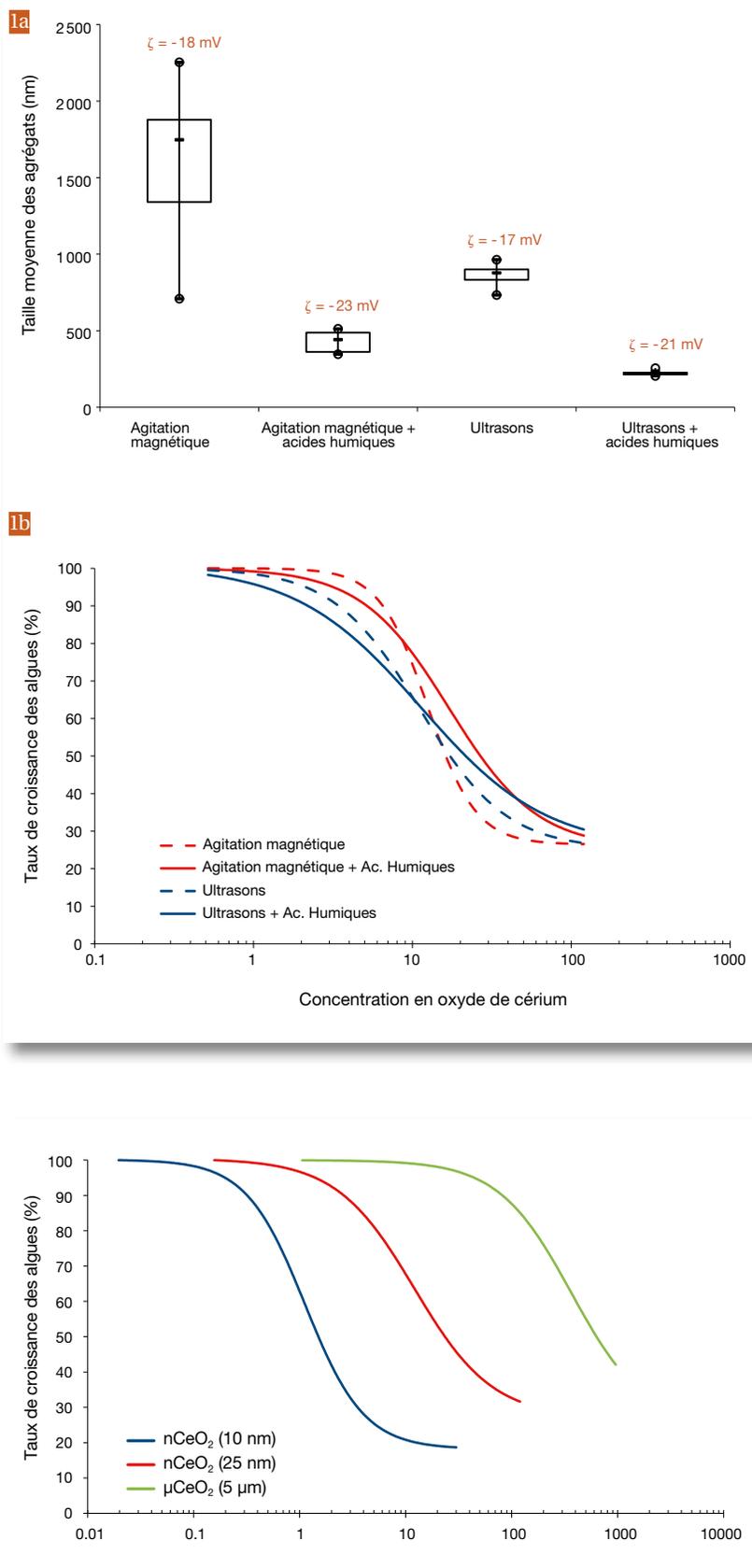


Figure 2

Inhibition de la croissance des algues en fonction de la taille initiale des particules d'oxyde de cérium.

Figures 1a et 1b

Taille moyenne des agrégats de NP de cérium (a) et inhibition de la croissance des algues (b) en fonction du mode de préparation des suspensions d'essai.

→ d'agglomération a été appréhendé par microscopie électronique à transmission (MET). Enfin, le potentiel de surface des particules (potentiel zêta  $[\zeta]$ ) a été mesuré pour chaque préparation.

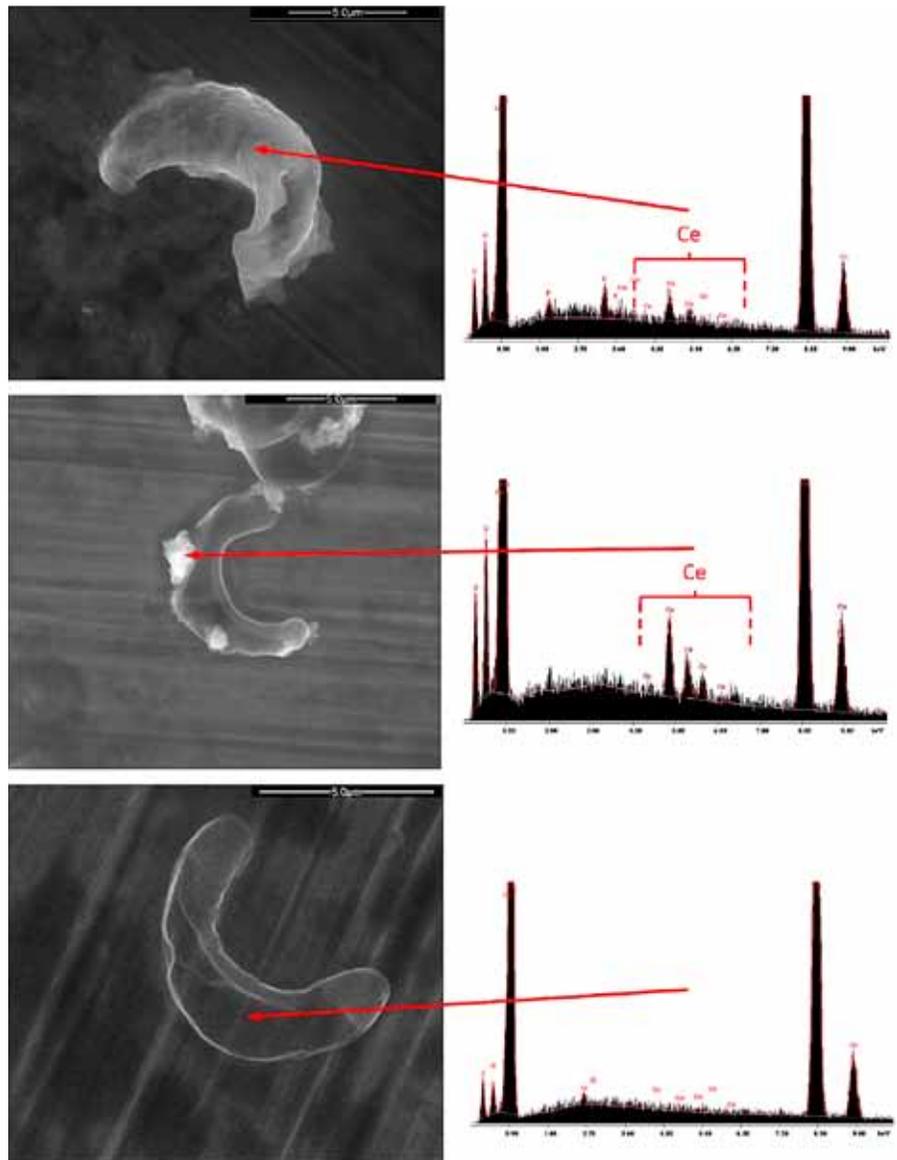
Les résultats obtenus (figure 1a) ont permis de mettre en évidence que la méthode de préparation utilisée influençait l'état d'agglomération des NP dans le milieu d'essai. Il en ressort également que l'état d'agglomération pouvait être accentué par la force ionique du milieu et limité par l'ajout d'AH (2 mg COT/l) [2, 3]. Ainsi, pour une même poudre nanoparticulaire mise en suspension selon les différentes méthodes testées, la taille moyenne des agglomérats varie de quelques centaines de nanomètres pour la méthode la plus dispersante (utilisation d'ultrasons + AH) à plusieurs micromètres pour la méthode la moins dispersante (agitation magnétique seule). D'autre part, la dispersion par ultrasons, couplée à l'ajout d'AH, s'est révélée être la méthode la plus reproductible par rapport, notamment, aux méthodes utilisant l'agitation magnétique. L'écotoxicité des différentes préparations ainsi générées a ensuite été étudiée en suivant la croissance d'une population d'algues exposées pendant 72 heures à différentes concentrations de NP de cérium. Les résultats obtenus (figure 1b) mettent en évidence une inhibition dépendante des concentrations en NP. Par ailleurs, quels que soient le mode de préparation utilisé et, par conséquent, l'état d'agglomération des NP, l'inhibition de la croissance des algues reste similaire et conduit à 50 % d'effet sur la population pour des concentrations en NP de cérium (25 nm) autour de  $14 \pm 2,6$  mg/l.

### Importance de la taille initiale des particules

Les essais initiés avec les NP de 25 nm ont été complétés par une série d'expositions utilisant des NP de cérium de 10 nm afin d'appréhender l'importance de la taille initiale des NP sur l'écotoxicité vis-à-vis des algues. Nous avons pu mettre en évidence que l'inhi-

**Figure 3**

Photo d'algues exposées aux différentes NP de cérium. (a) NP de 10 nm, (b) NP de 25 nm, (c) témoin. Les observations réalisées par la microanalyse confirment que les particules adsorbées à la surface des algues exposées correspondent au cérium.



bition de la croissance des algues varie significativement en fonction du type de NP de cérium testé (figure 2). Les concentrations induisant 50 % d'inhibition de la croissance des algues sont, respectivement, de 1,4 mg/l et 14 mg/l pour les produits de 10 nm et 25 nm. Cette différence de toxicité est à mettre directement en relation avec les différences de taille initiale des particules testées. Des suspensions d'oxyde de cérium micrométrique (taille de particule initiale de 5 µm) ont également été testées. Seule une très faible inhibition de la croissance des algues a été observée et la concentration induisant 50 % d'effet se situe au-delà de 500 mg de CeO<sub>2</sub>/l. Ces résultats mettent en évidence la plus forte toxicité vis-à-vis des algues de la forme nanoparticulaire par rapport à la forme microparticulaire d'une part et, d'autre part, l'influence de la taille initiale des nanoparticules sur la toxicité de l'oxyde de cérium vis-à-vis de ces organismes.

### Caractérisation de l'interaction algues/nanoparticules de cérium

Des analyses en cytométrie de flux, associées à des observations en Microscopie électronique à balayage en mode environnemental (MEB) couplée à de la microanalyse, ont été effectuées afin d'évaluer de quelle façon les interactions entre les NP de cérium et les algues pouvaient expliquer les phénomènes observés. Le MEB a permis d'effectuer les observations sans préparation préalable de l'échantillon.

Les résultats obtenus en cytométrie de flux suggèrent une modification des cellules algales exposées aux NP, par rapport aux algues non exposées (cf. *La cytométrie de flux, un outil innovant adaptable à l'écotoxicologie et à la biosurveillance des milieux*, Anne Bados-Nilles). Cette modification peut s'expliquer soit par une internalisation des NP de cérium, soit par une adsorption en surface des algues. Par ailleurs, les observations réalisées à l'aide du MEB, couplées à la microanalyse, complètent les résultats obtenus en cytométrie de flux et nous ont permis de conclure que les NP de

cérium étaient en grande partie adsorbées à la surface des algues (figure 3). Enfin, il apparaît que l'interaction particules-algues est différente en fonction du type de NP de cérium étudié, avec un recouvrement plus important de la paroi des algues exposées aux NP de cérium de 10 nm par rapport au NP de cérium de 25 nm. Ceci pourrait suggérer une interaction plus forte des NP de 10 nm par rapport aux NP de 25 nm. Cette adsorption en surface des cellules algales pourrait être en partie responsable de l'inhibition de la croissance observée plus haut, soit par un effet local direct et/ou par un effet indirect dû à une limitation de l'accès à la lumière et aux micronutriments [4]. →

## CONCLUSION

L'ensemble de ces résultats a permis de caractériser l'écotoxicité des NP de cérium vis-à-vis des micro-algues d'eau douce en prenant en compte l'influence de certains paramètres tels que l'état d'agglomération dans les milieux liquides et l'importance de la taille initiale des particules. Les résultats ont montré que les NP de cérium entraînaient une inhibition de la croissance des algues avec un effet dépendant des concentrations en NP. Il a aussi été montré que l'écotoxicité de ces NP n'était pas directement influencée par leur état d'agrégation, mais que la taille initiale de la particule et, par conséquent, sa surface spécifique jouaient un rôle important au même titre que la concentration massique. Ces résultats sont intéressants à deux niveaux, puisqu'ils suggèrent le

fait que l'état d'agglomération et, *a fortiori*, le protocole de préparation des suspensions d'essai n'influencent pas de façon significative l'écotoxicité des NP vis-à-vis des algues. Il est cependant important de noter que ce constat n'est valable que lors d'exposition pour un milieu sous agitation constante. Les essais réalisés en milieu statique (essais sur microcrustacés) ont montré des résultats variables en fonction de l'état d'agglomération des NP. Les phénomènes de sédimentation dans les milieux d'essai, dus à l'agglomération des NP, sont l'une des explications de ces observations [2]. L'ensemble de ces données fait donc ressortir la difficulté de systématiser les recommandations de préparation des suspensions d'essai pour évaluer les propriétés écotoxicologiques de ces nanomatériaux.

## ABSTRACT

Nanoparticles (NP) have been extensively applied in commercial products. It is consequently unavoidable that a large amount of NP will be discharged into environment, underlining the need to evaluate the ecotoxicological effect of NP towards aquatic organisms. However, relevant experts identified that "a large number of standardized test guidelines [...] are unlikely to be applicable in their present state to engineered nanomaterials" (OECD). Indeed, the potential hazard of NP may be related to unusual physicochemical properties such as their particles size, agglomerate state in suspension and/or surface chemistry. Moreover, the method performed to disperse NP and achieve the testing suspensions can be seen as a drawback since it introduces an additional variable into the test design. Our work aims at characterizing the ecotoxicity of ceria NP toward aquatic micro-algae taking into account the influence of the dispersive methods and the physico-chemical properties of NP. The results obtained clearly show that ceria NP are ecotoxic toward micro algae compare to bulk materials. The toxic effect was principally attributing to the initial particles size and, to a lesser extent, to the agglomeration state. This suggest that exposure to NP could be expressed in surface area complementary to a mass basis. In addition, we have demonstrated that ceria NP were able to entrap and wrap the algae cells, which may contribute to the nanotoxicity.



Contributeur

Marion  
Devilliers

## FOCUS

# MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE

## de la dynamique des nanoparticules appliquée aux atmosphères libres et confinées

L'utilisation accrue des nanoparticules dans l'industrie et leur importance croissante dans les mesures de la qualité de l'air posent de nouvelles questions sur les risques pour la sécurité, la santé et l'environnement, dans un contexte de connaissances scientifiques encore lacunaire. Différentes mesures réalisées en air intérieur et en air extérieur ont mis en évidence un nombre important de sources d'émissions de nanoparticules. Ces nanoparticules se présentent en très grand nombre, comparativement aux particules plus grossières, et ont un effet sur la santé humaine. Conscient des enjeux liés à la compréhension de la formation et du transport des nanoparticules, l'INERIS a engagé en 2009 un programme de recherche en collaboration avec le laboratoire CEREAL (laboratoire commun École des Ponts ParisTech - EDF R&D) afin de développer un modèle de simulation des transformations des nanoparticules dans les ambiances confinées comme en air extérieur. Des modèles de particules existent déjà pour le suivi de la pollution particulaire (PM 2.5 et PM 10) dans l'air, cependant lorsque l'on s'intéresse aux nanoparticules, ces modèles nécessitent d'être adaptés pour restituer le nombre de particules, paramètre potentiellement déterminant pour qualifier leurs effets.

Le travail en cours a permis de développer un modèle de particules, capable de simuler avec précision l'évolution du nombre et de la masse des particules ultrafines, avec des temps de calcul raisonnables. La dynamique des particules dépend de différents processus tels que la condensation/évaporation, la coagulation, la nucléation et les phénomènes de dépôt. L'effort a tout d'abord porté sur le processus de condensation/évaporation, qui s'avère être le plus compliqué numériquement, en considérant uniquement des particules de forme sphérique. Ces processus, bien connus pour des particules plus grossières, doivent être réétudiés car certains phénomènes additionnels, spécifiques aux nanoparticules, doivent être pris en considération : l'effet Kelvin, les forces de Van der Waals et les forces électrostatiques pour les particules chargées. Les schémas numériques utilisés reposent sur la discrétisation de l'échelle granulométrique des particules en sections, caractérisées par un diamètre représentatif, et sur un algorithme de répartition des particules sur ces sections, après condensation/évaporation. Le processus de coagulation brownienne, dû à l'agitation thermique du milieu, a été incorporé au modèle à l'aide d'une méthode de *splitting*.

Le modèle construit a vocation à être intégré dans le modèle de chimie, transport CHIMERE, développé par l'INERIS et l'IPSL, utilisé pour simuler et prévoir la qualité de l'air, et dans le code de mécanique des fluides Code Saturne pour des utilisations en milieux confinés.

A close-up photograph of layered rock formations, likely sedimentary or metamorphic, showing distinct horizontal bands of varying colors and textures. The colors range from light tan to dark brown and black. At the bottom of the image, there are several dark, arched openings or niches, suggesting a cave or a similar geological structure. The overall appearance is rugged and textured.

# Sites et territoires





Interview



Philippe  
Hubert

# Risques sanitaire et environnemental

## Vis-à-vis des polluants émergents, quels sont les grands chantiers qui attendent l'INERIS?

— **P. H. :** L'INERIS participe à des actions nationales et internationales, comme le groupe « risques émergents » du PNSE II ou l'association Norman. Il anime cette dernière en assurant le secrétariat scientifique du réseau Norman qui rassemble 23 pays d'Europe, sur la mesure et la surveillance des substances émergentes (<http://www.norman-network.net>). Clarifier la notion de polluant émergent est en soi un défi, car s'y mêlent des substances connues et inconnues (mais dont la dissémination croît), des substances répertoriées dont les dangers ont récemment été identifiés (ou reconnus). Un chantier relève de la toxicologie et de l'écotoxicologie prédictive (CEM, nanos, PE...), un autre, de la mesure de ces substances qui reste parfois inaccessible. C'est l'un des buts du réseau Norman et l'un des objectifs de l'analyse chimique, notamment dans le cadre d'AQUAREF. Un autre chantier porte sur l'imprégnation des milieux. Il implique des travaux de terrain, voire la surveillance des populations humaines et de la faune. L'INERIS participe ainsi aux « plans micropolluants » et « résidus de médicaments ». L'extension du portail substances chimiques permettra de relier ces aspects.

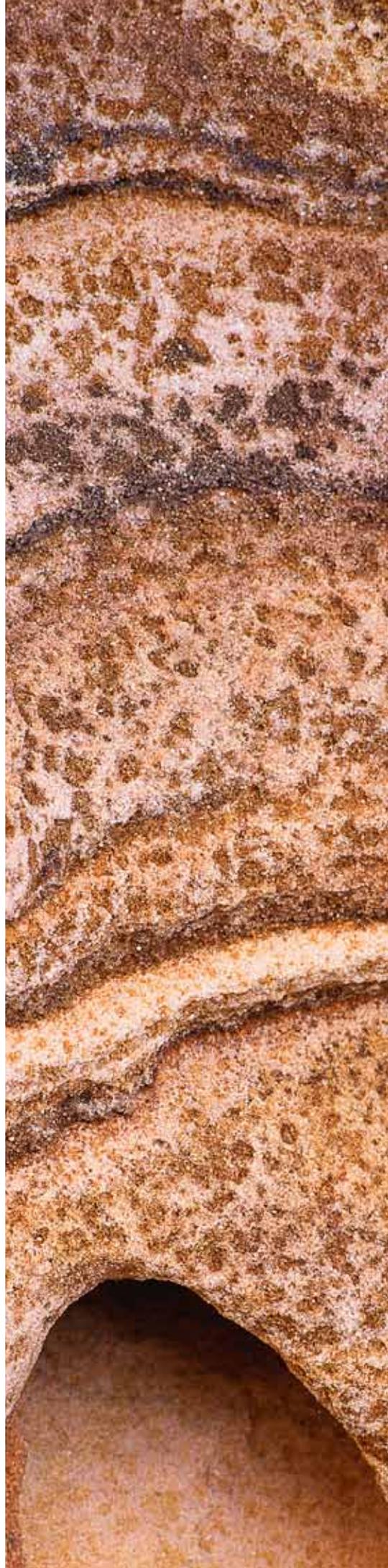
## Comment passer d'une vision statique et compartimentée à une vision territoriale dynamique et interactive?

— **P. H. :** Le schéma paraît simple : cumuler sur un territoire les expositions de sources industrielles, tertiaires ou naturelles locales de sources lointaines, présences ubiquitaires (cf. alimentation, etc.), intégrer les modes de vie (ex. autoconsommation) et les « budgets espace-temps ». Alors, on peut discuter la contribution d'une source, juger d'une autorisation pour un « nouvel entrant », définir les stratégies les plus « efficaces » pour réduire

la pollution (par exemple, une phytotechnologie par rapport à une technologie traditionnelle). Ce déroulé cache des questions de recherche complexes, car les sources d'information sont lacunaires et très hétérogènes. Mesures à l'émission, chez l'homme, dans les milieux, dans les denrées et modélisations coexistent sans qu'aucune n'assure une couverture complète et sans rationalité commune. Ce n'est donc pas l'interopérabilité de fichiers qu'il faut assurer, mais une construction complète de type observatoire intégré, avec une forte base de modélisation, tant géostatistique que physicochimique.

## Quelles sont les perspectives de la surveillance environnementale?

— **P. H. :** Il devient essentiel de savoir mettre les « surveillances environnementales » en relation et d'en organiser l'appropriation par les parties intéressées. Source et milieux sont confrontés (ex. rejet d'une installation vs eau, air et sols). Les surveillances ne se limitent plus aux substances et intègrent espèces et homme. Enfin, les parties intéressées veulent être associées à leur conception. Des actions ont été signalées ci-avant. Le besoin de confrontation des modélisations et des mesures sur les expositions dans les zones en fait partie. On retrouve cette implication et ce souci sur les crises environnementales, avec souvent la confrontation entre une modélisation complexe et des mesures (sites, épisodes volcaniques). La qualité de l'eau est encore un exemple de décloisonnement des surveillances (espèces et chimie). Le rôle des parties prenantes est devenu effectif sur les sols pollués et les ICPE pour définir les plans de surveillance. Il est caractéristique autour de La Hague. On le retrouve en situation post-accidentelle. La logique actuelle de surveillance est souvent réglementaire et segmentée. Le développement simultané des outils intégratifs et de la concertation doit permettre son décloisonnement.





## Contributeurs



**Julien  
Caudeville**



**Céline  
Boudet**

# Inégalités environnementales

**L**es inégalités environnementales se fondent sur le constat de disparités très fortes marquant des territoires et des individus face aux dégradations de l'environnement. Dans ces zones, les populations apparaissent davantage exposées aux effets directs et indirects (*via* la chaîne alimentaire) des pollutions de l'air, du sol ou de l'eau. Les actions pouvant contribuer à l'identification de ces points noirs puis à l'évaluation et à la réduction des expositions afin de protéger la santé des populations concernées constituent un axe prioritaire du second Plan national santé environnement et du Contrat d'objectifs 2011-2015 de l'INERIS.

Dans ce contexte, les Systèmes d'information géographique (SIG) sont communément utilisés pour appréhender l'exposition, en couplant des données de différents types [1].

### Objectif

L'objectif global des travaux scientifiques sur les inégalités environnementales est de relier les trois éléments de l'exposition aux substances chimiques et de les intégrer à différentes échelles de représentation spatiale: (1) les sources émettrices; (2) les milieux et voies d'exposition qui servent de vecteurs; (3) les groupes humains qui peuvent être exposés. L'information peut être récupérée (ou construite) à partir de données très hétérogènes d'émissions à la source, de concentrations dans les milieux. Peuvent s'y ajouter des indicateurs socio-économiques ou d'état de santé.

Point de départ de ces travaux, la thèse SIGFRIED (Développement d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques- Construction d'indi-

cateurs spatialisés en vue d'identifier les inégalités environnementales à l'échelle régionale) visait à valider les développements fonctionnels et la faisabilité d'un interfaçage des évaluations de l'exposition multimilieu et du risque spatialisées. La recherche s'est orientée sur des éléments traces métalliques (Cd, Cr, Ni, Pb) et sur les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie [2, 3, 4, 5, 6]. Ces polluants s'accumulent dans tous les compartiments de l'environnement. L'exposition a donc été caractérisée pour les voies d'inhalation et d'ingestion par une approche multimédia.

La construction des indicateurs spatialisés repose sur le couplage de deux approches que sont l'évaluation des expositions et la spatialisation des données.

Il s'agit, donc, de disposer d'un modèle présentant les caractéristiques suivantes:

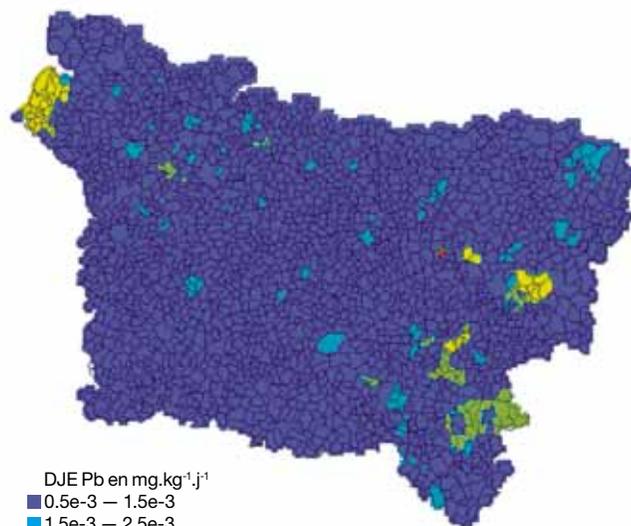
- une approche intégrée qui prenne en compte la variété des situations de transport et de transfert des polluants dans les compartiments environnementaux et les médias d'exposition caractérisés;
  - la possibilité de décrire sur une échelle fine les principales sources polluantes, médias environnementaux (eau, air, sol), voies d'exposition (inhalation, ingestion d'eau et de nourriture) et les populations résidentes des zones évaluées.
- Un prérequis indispensable est la disponibilité et la représentativité de données correspondant aux polluants évalués, sur la couverture géographique investiguée.

### Matériels et méthodes

Un modèle multimédia d'exposition a été construit par l'INERIS pour permettre le calcul des doses d'exposition de populations →

Figure 1

Cartographie des doses journalières d'exposition (DJE plomb en  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ ) pour la voie d'ingestion (toutes sources confondues) pour la classe d'âge des 2 à 7 ans en Picardie.



DJE Pb en  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$

- 0.5e-3 – 1.5e-3
- 1.5e-3 – 2.5e-3
- 2.5e-3 – 3.5e-3
- 3.5e-3 – 4.5e-3
- 4.5e-3 – 5.5e-3

□ Commune

## Références

[1] Nuckols J. R., Ward M. H., Jarup L., *Using geographic information systems for exposure assessment in environmental epidemiology studies*, « Environ Health Perspect », 2004,112: pp. 1007–1015.

[2] Caudeville J., Boudet C., Govaert G., Bonnard R., Denys S., Cicolella A., *Construction d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques de l'environnement*, « Environnement, risques et santé », 2011, 10 (3), pp. 239–242.

### Articles soumis (2010-2011)

[3] Caudeville J., Boudet C., Denys S., Bonnard R., Govaert G., Cicolella A., *Construction d'un modèle d'exposition multimédia pour la caractérisation des inégalités environnementales en Picardie*, soumis à « Environnement, risques et santé », 2011.

[4] Caudeville J., Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicolella A., *Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale*, soumis à « Journal of Total Environment », 2011.

### Communications (2010-2011)

[5] Caudeville J., Govaert G., Bonnard R., Denys S., Boudet C., Cicolella A., *Environmental health tracking in France: development of a GIS-based platform and multimedia exposure model to map and analyze environmental inequalities*, 5-9 février 2011, Salvador de Bahia, Brésil (communication orale).

[6] Caudeville J., Boudet C., Govaert G., Bonnard R., Denys S., Cicolella A., *Construction d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques de l'environnement*, 1<sup>er</sup> Congrès national de santé et environnement « Gènes, environnement et inégalités sociales », 14 décembre 2010, Rennes (communication orale).

[7] Bonnard R., Rapport: *Jeux d'équations pour la modélisation des expositions liées à la contamination d'un sol ou aux émissions d'une installation industrielle (2010)* – <http://www.ineris.fr>

→ cibles liées à l'ingestion de produits alimentaires, d'eau de consommation, de sol et à l'inhalation de contaminants atmosphériques. Ce modèle est alimenté par des bases de données géoréférencées de différents types: environnemental (eau, air, sol, alimentation), comportemental et démographique et interfacé avec un Système d'information géographique (SIG) au sein d'une plateforme. La plateforme permet l'agrégation et le couplage de données nationales et/ou locales de source et de format différents.

Différentes techniques pour améliorer la cartographie de variables d'intérêt ont également été mises en place:

- une méthode itérative de régression pour la cartographie des densités de population sur des échelles fines;

- un indicateur d'exposition à la contamination des poissons d'eau douce, prenant en compte la proximité et la qualité des cours d'eau;

- une technique de krigeage pour intégrer des données de contamination de sol à des niveaux d'information géographique différents;

- la spatialisé de l'Inventaire national spatialisé (INS) et son intégration pour la spatialisé des données d'émissions atmosphériques;

- le géocodage de la base nationale de données sur les eaux de consommation (Sise'EAUX).

Le modèle multimédia utilise les jeux d'équations de transfert de polluant du modèle d'exposition développé par l'INERIS [7]. Le résultat obtenu correspond à l'exposition prospective des populations sur une durée de soixante-dix ans dans le cas d'une non-modification des condi-

tions d'exposition telles que constatées « aujourd'hui » (aux dates de disponibilité des données).

## Résultats et discussion

Un exemple des résultats produits en 2010 est fourni ici sur les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie, pour le cadmium, le nickel et le plomb. Le calcul de l'exposition est réalisé sur la base des données disponibles autour de l'année 2004 sur une maille de 1 km de côté.

À ce stade, les modes de vie des populations sont caractérisés par leur comportement alimentaire selon le degré de ruralité sur lequel elles résident, avec des facteurs d'autoconsommation définis selon la taille de la commune.

En Picardie, des clusters sont détectés dans des communes pour lesquelles les concentrations en plomb dans les eaux de consommations sont fortes (figure 1). Pour le Nord-Pas-de-Calais, les indicateurs permettent de définir trois zones relatives à la contamination du sol en plomb et en cadmium liées à l'historique industriel de la région (figure 2).

Pour l'ensemble des polluants, la classe d'âge la plus vulnérable est systématiquement celle des 2 à 7 ans.

Les voies d'exposition prépondérantes aux expositions totales correspondent à l'ingestion d'eau de consommation et de sol pour le plomb, de légumes pour le cadmium et à l'inhalation pour le nickel. Les données de dépôt et de concentration atmosphérique étant agrégées sur des mailles plus larges (10 x 15 km) que celles de l'indicateur,

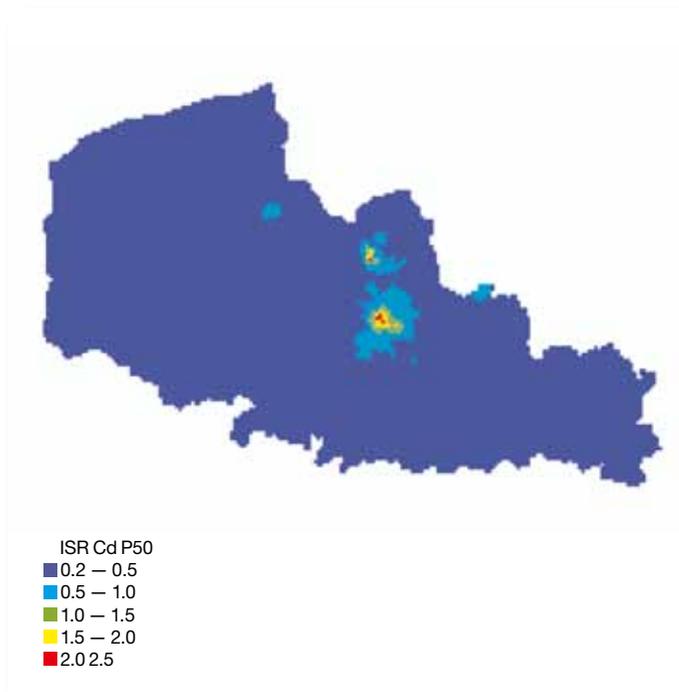


Figure 2

Cartographie de l'indicateur spatialisé du risque (ISR) relatif au cadmium, en Nord-Pas-de-Calais, pour la classe d'âge des 2 à 7 ans (en milieu rural et urbain). L'indicateur prend en compte les voies d'ingestion et d'inhalation.

certaines expositions sont sous-estimées dans les zones de fortes émissions: pour l'inhalation de nickel car la voie d'inhalation est prépondérante; pour l'ingestion de plomb car la contribution des dépôts dans les transferts vers les matrices végétales et animales est conséquente.

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ces travaux ont permis, à ce jour, d'établir la faisabilité de la construction d'une plateforme de modélisation capable d'évaluer, sur la base d'un SIG, les transferts environnementaux et l'exposition multivoie (*via* l'air, le sol, l'eau et l'alimentation) de la population à une échelle spatiale fine: PLAINÉ (Plateforme intégrée pour l'analyse des inégalités d'exposition environnementale). L'agrégation des données d'émission à la source, de mesures environnementales et de populations à des fins d'évaluation des expositions est ainsi possible.

Son application pourra être étendue à d'autres substances et d'autres régions que celles étudiées dans le cadre de la thèse, avec l'opération de recherche structurante RESPIR (Représentation spatiale et intégrée des risques), ainsi qu'au croisement avec d'autres types de données (sanitaires, socio-économiques, etc.). Les résultats obtenus permettent de caractériser les déterminants de l'exposition des populations (zones et populations vulnérables, part locale et ubiquitaire, voie d'exposition et polluant) et fournissent, ainsi, des clés d'aide à l'interprétation pour évaluer et gérer les zones de surexposition.

## ABSTRACT

Analyzing the relationship between environment and health has become a major issue for public health as focused in French national plans for health and environment. To respond to this priority, it appears as a necessity to develop tools able to link and analyze environmental quality data and health indicator. The objective of this work is to develop a GIS (Geographic Information System)-based platform combining environment and population information to map environmental disparities and detect vulnerable populations. To achieve this objective, combining exposure assessment and spatial data is a fundamental prerequisite that first implies to overcome different scientific limitations such as the linkage of the several databases to describe the global source-effect chain at a fine scale. A stochastic multimedia exposure model allows the assessment of the transfer of contaminants from the environment (*via* air, soil, water, food chain) to population. In this article, we performed a risk assessment of metals exposure (lead and chromium), with a resolution of 1 km, in two regions of France. Exposure pathways considered include ingestion of soil, vegetation, meat, egg, milk, fish and drinking water. Exposure scenarios were defined for different reference groups (age groups, dietary properties, fraction of food produced locally). The final aim of this project is an integrated tool where the sources of contaminants, environmental media, risk assessments, and health data will be linked by a GIS platform offering a set of statistical tools to analyze relationships between geography, environment and human health.

La mobilité et la migration des populations n'ont pas été prises en compte à ce stade du développement. Toutefois, le projet DICER (Définition d'indicateurs pour la caractérisation des expositions aux champs radiofréquences), proposé dans le cadre de l'APR ANSES 2011, permettra d'intégrer les budgets espace-temps, la mobilité des populations et d'autres types de nuisance dans la plateforme.



## Contributeurs



Olivier  
Favez



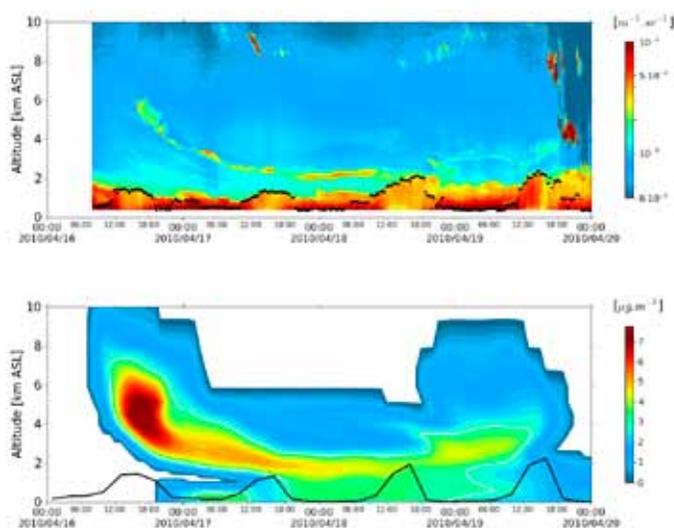
Augustin  
Colette

# Crises environnementales

La modélisation au service de la gestion

Figure 1

Série temporelle du profil vertical de rétrodiffusion lidar (haut) et de concentration de traceurs modélisée (bas) entre les 16 et 20 avril 2010 au-dessus du site d'observation du SIRTA (2.2E, 48.7 N). La ligne noire représente la variation diurne de la couche limite atmosphérique.



**P**rintemps 2010: l'Europe est perturbée par l'éruption du volcan islandais Eyjafjallajökull, dont les émissions de cendres entraînent la fermeture de la grande majorité de l'espace aérien pendant plusieurs jours. Parallèlement à la mobilisation des VAAC (*Volcanic Ash Advisory Center*) européens, notamment Météo France et le UK met.office, en charge de l'appui à l'aviation civile, le ministère français chargé de l'écologie sollicite une réaction immédiate de l'INERIS, notamment pour une évaluation en temps réel de l'altération possible de la qualité de l'air en France et de ses éventuelles conséquences pour les populations.

Les énormes progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de la modélisation et de l'observation de la composition de l'atmosphère ont permis à l'INERIS de mettre rapidement en place une cellule de crise pour répondre à cette sollicitation. Il fut ainsi possible (1) de prévoir et d'anticiper le déplacement du panache de cendres par la mise en œuvre d'un modèle de dispersion, (2) de valider les prévisions alors que le panache était encore à une certaine distance du territoire Français par comparaison avec les mesures *in situ* disponibles, (3) de confronter ces résultats avec des données de télédétection et d'observation de l'atmosphère depuis le sol, et (4) de discriminer et d'évaluer l'impact du panache de cendres sur la qualité de l'air à la surface du territoire français, de manière quantitative en temps quasi réel. Ce travail n'aurait pu aboutir sans la consultation de partenaires scientifiques français et européens (notamment le NILU en Norvège), mobilisés par le caractère exceptionnel de l'événement et détenteurs de données complémentaires auxquelles confronter nos résultats.

Le modèle CHIMERE, codéveloppé par l'INERIS et le CNRS, est utilisé quotidiennement pour la prévision de la qualité de l'air en France et en Europe dans le système PREV'AIR ([www.prevair.org](http://www.prevair.org)). Dès le début des événements, il a été adapté par l'INERIS pour fonctionner sur un domaine étendu incluant l'Islande, et tenir compte d'un terme-source spécifique correspondant aux émissions du volcan: traceurs passifs (poussières terrigènes dont la composition a pu être déterminée par des prélèvements réalisés sur le volcan) en quantité et altitude

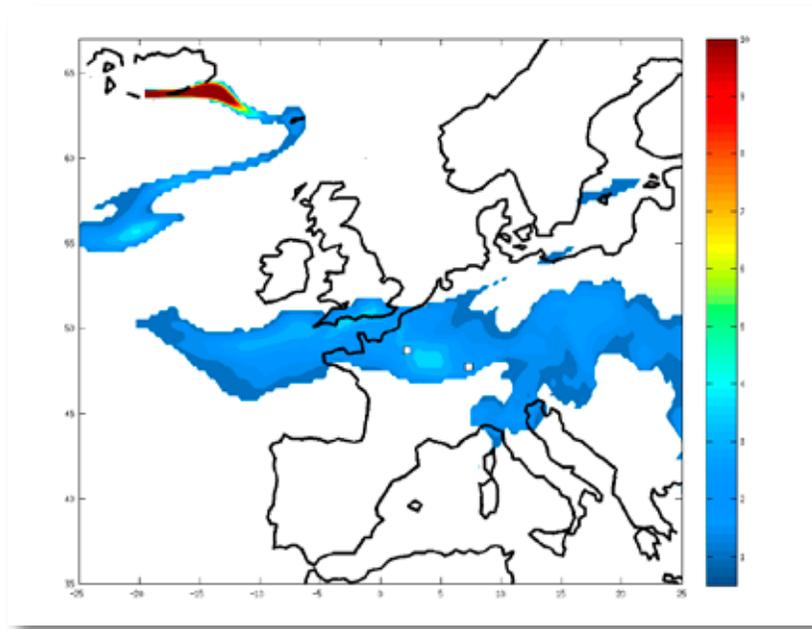


Figure 2

Étendue du panache volcanique simulée par le modèle de chimie-transport CHIMERE pour la journée du 18 avril 2010.

prescrites par des mesures *in situ* et des données de télédétection. Grâce à son implication dans les projets européens tels que le volet MACC (*Modelling Atmospheric Composition and Climate*) du GMES (*Global Monitoring for Environmental Security*), l'INERIS avait accès aux prévisions météorologiques les plus sophistiquées du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). Cette donnée a permis de mieux contraindre le calcul de l'évolution du panache. L'estimation de la quantité de matière émise par le volcan, donnée clé pour la mise en œuvre des modèles, a pu être acquise auprès d'organismes scientifiques et techniques impliqués dans la gestion de crise tels que l'Institut de physique du globe. Un second modèle, FLEXPART (développé au NILU), de nature totalement différente car reposant sur une approche Lagrangienne qui modélise le tracé des trajectoires des particules émises, fut aussi déployé par l'INERIS du fait de sa simplicité et de sa rapidité de mise en œuvre. Ce deuxième type d'outil présente une très faible diffusivité numérique, il est donc particulièrement adapté au suivi à longue distance de panaches de pollution isolés.

La confrontation des modèles et des analyses de sensibilité réalisée dans un contexte de gestion de crise (avec mise à jour régulière des données d'entrée et des simulations) a conduit l'INERIS à affirmer que le panache de cendres risquait d'affecter le territoire national à partir du 16 avril 2010 avec un impact maximal potentiel, sur la qualité de l'air ambiant, sur la moitié nord du pays.

Ces prévisions ont bien été confirmées par les observations LIDAR (*Light Detection and Ran-*

*ging*) du site d'observation de l'Institut Pierre-Simon Laplace (SIRTA, École polytechnique) avec lequel l'INERIS entretient une collaboration de longue date. On voit ainsi sur les données de télédétection de la figure 1, le passage en altitude de la couche de cendres, descendant progressivement jusqu'à se mélanger à l'air de la couche limite que nous respirons. Sur la même figure, les résultats du modèle ont aussi été reportés, pour comparaison. On voit clairement que la couche est bien modélisée – bien que légèrement trop épaisse – en particulier, la prévision avait bien anticipé l'heure et la localisation de l'impact à la surface.

Ces résultats ont aussi été corroborés par l'analyse chimique d'échantillons atmosphériques prélevés dans le cadre du programme « CARA ». Ce programme est géré par le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), dont l'INERIS est l'un des membres<sup>1</sup>, avec l'appui local des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Il fut mis en place en 2007, suite aux forts épisodes de pollution particulaire qui eurent lieu au printemps, pour disposer d'une information sur la composition chimique des particules en situation d'épisode générant de fortes concentrations de particules. Ce dispositif a été activé dès le 16 avril 2010 afin de discriminer et de quantifier parmi les particules impactant la qualité de l'air en France en cette période, celles issues du volcan, et ce en différents points du territoire.

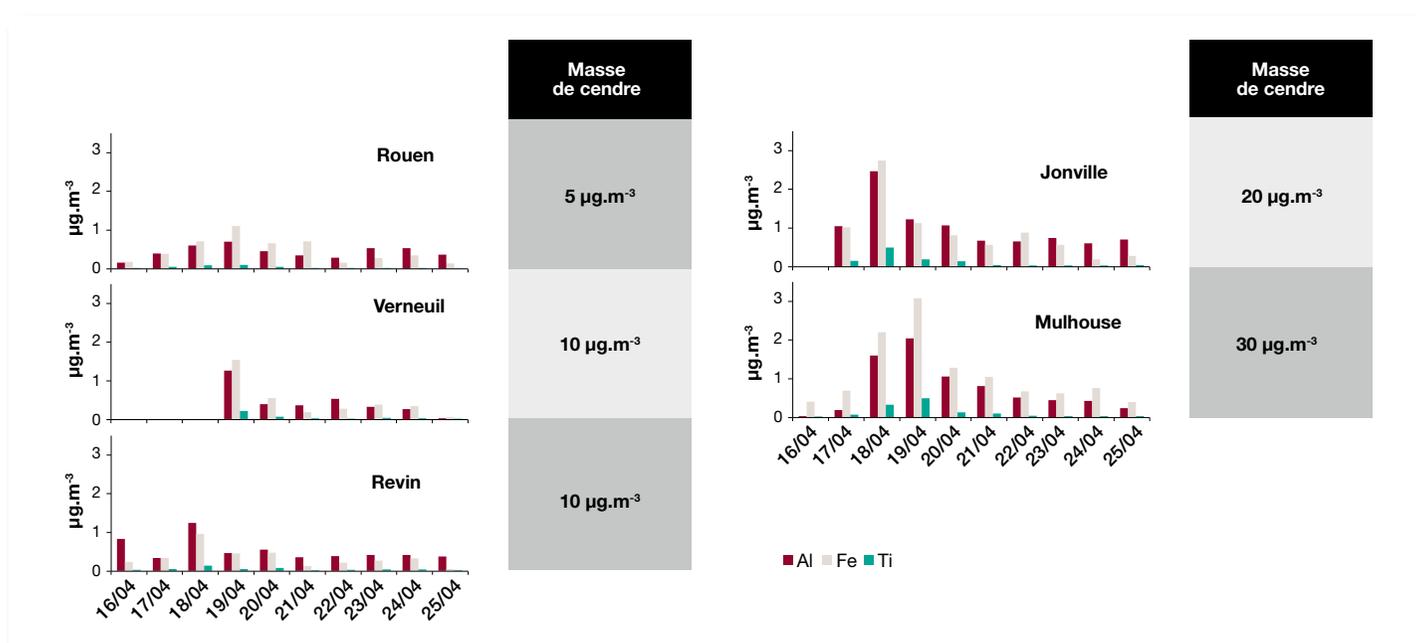
Sur la base des modélisations du panache par CHIMERE (figure 2), ainsi que des mesures en continu des concentrations en particules par les AASQA, le rapatriement et l'analyse →

## Références

- [1] Colette A., Favez O., Meleux F., Chiappini L., Haefelin M., Morille Y., Malherbe L., Papin A., Bessagnet B., Menut L., Leoz E., Rouil L., *Assessing in near real time the impact of the April 2010 Eyjafjallajökull ash plume on air quality*, Atmospheric Environment, Volume 45, Issue 5, February 2011, pp. 1217-1221, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.09.064 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010008502>

## Note

1. Avec l'école des Mines de Douai et le Laboratoire national d'essais.



**Figure 3**

Masse de métaux (aluminium, fer, titane) dans les particules déposées et estimation (à droite) de la masse totale de cendres.

→ chimique d'échantillons prélevés sur cinq sites du nord de la France (de la Normandie à l'Alsace) ont été organisés en urgence par le LCSQA et l'INERIS. À partir de la connaissance de la composition des cendres à l'émission, différents métaux considérés comme de bons traceurs de l'activité de l'Eyjafjallajökull, ont été plus particulièrement recherchés dans les analyses chimiques du programme CARA. Des « surconcentrations » de fer, titane et aluminium ont bien été repérées (figure 3) révélant un impact des émissions particulaires volcaniques sur la qualité de l'air relativement limité dans l'espace (essentiellement nord-est de la France) et dans

le temps (surtout les 18 et 19 avril), mais pouvant atteindre jusqu'à 50 % des 60 à 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  observés localement. Les prévisions des modèles se sont ainsi trouvées confirmées par l'observation.

Ce travail a été communiqué en temps réel au ministère chargé de l'écologie, et a fait l'objet d'une conférence de presse de Mme Jouanno, ministre à l'époque, qui s'est déroulée sur le site de l'INERIS à Verneuil-en-Halatte. Les résultats ont aussi été valorisés par une publication dans une revue spécialisée à comité de lecture (*Atmospheric Environment*) parue dès septembre 2010, démontrant la réactivité de l'INERIS et l'approbation de la méthodologie mise en œuvre par la communauté scientifique.

## ABSTRACT

The eruption of the Eyjafjallajökull in April 2010 in Iceland released a considerable amount of fine ash into the European atmosphere leading to an unprecedented disruption of air traffic. While that disruption was making the headlines, INERIS – in its role of technical support to the French Ministry of Environment – was solicited to provide a detailed assessment of potential impacts on air quality. A core of scientists of the institute representing expertises as diverse as chemistry-transport modelling forecasts, remote sensing, in-situ monitoring, assistance to policy makers and environmental crisis communication was put together within hours. Such a reactivity and expertise in the field of environmental forecasting and monitoring could only be achieved thanks to the implication of INERIS in various research and operational initiatives such as the design and operation of the PREV'AIR forecasting system, the Global Monitoring for Environmental Security Programme of the European Commission, as well as the aerosol chemical characterization program (CARA) of the national reference laboratory for air quality monitoring (LCSQA).

The CHIMERE model issued its first forecasts a few hours after the eruption started. These forecasts were soon validated against remote sensing observations of the plume and showed a potential impact at the surface in Northern France. In-situ sampling and dedicated analysis of airborne trace metals confirmed that up to half of the 60-70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  of coarse particulate matter could be attributed to the Eyjafjallajökull ash plume locally.

Au-delà de l'évaluation de l'apport du nuage de cendres sur la qualité de l'air, cet événement illustre l'intérêt de la mise en œuvre d'approche d'évaluation combinant observation, analyse et modélisation. Il illustre la complémentarité d'un réseau d'observation tel que celui des AASQA ou le programme CARA et des systèmes de prévisions de la composition de l'atmosphère tels que ceux mis en œuvre par l'INERIS pour assister la prise de décision dans la gestion des épisodes de pollution atmosphérique, et informer le public. Depuis avril 2010, une approche similaire a été mise en œuvre à deux reprises : lors des intenses feux de forêt ayant touché la Russie au cours de l'été 2010 et lors de l'éruption du Grimsvötn, autre volcan islandais, en mai 2011. Aucun de ces événements n'a eu d'impact comparable au panache de l'Eyjafjallajökull sur la qualité de l'air en France, mais ils ont permis de prouver de nouveau la mobilisation des équipes de l'INERIS dans la documentation de situations exceptionnelles.



## Contributeurs



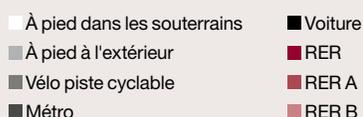
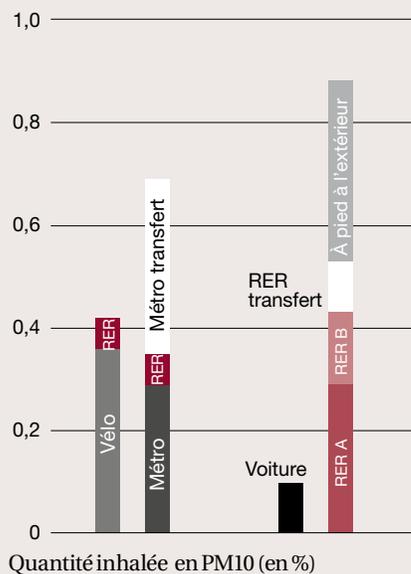
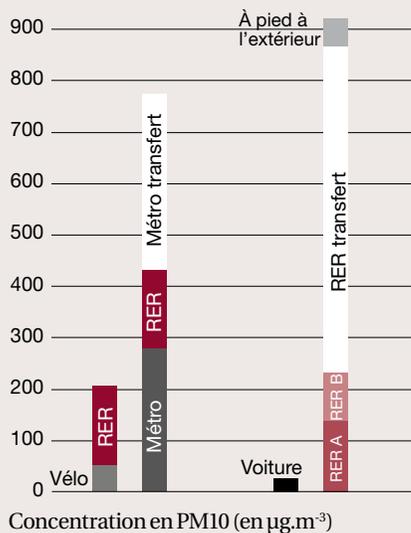
Marc Durif



Jessica Queron

### FOCUS

# L'OUTIL INTER'MODAL



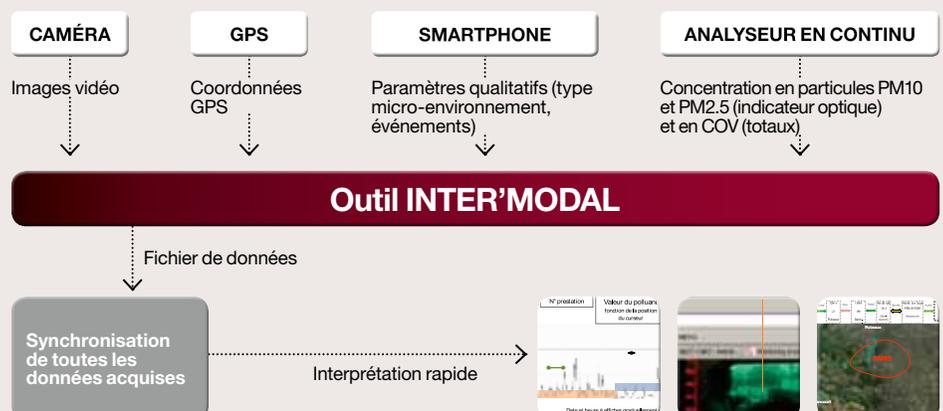
L'outil INTER'MODAL, transportable dans un sac à dos, permet d'évaluer les concentrations en polluants atmosphériques, notamment grâce à des mesures effectuées en continu et à une fréquence d'acquisition de données rapide. Ce système embarqué est composé d'une caméra, d'un GPS, d'un smartphone (saisie d'informations contextuelles) et d'analyseurs en continu (particules et composés organiques volatils – COV – totaux). La synchronisation de l'ensemble des données collectées permet une interprétation rapide des résultats. De futures évolutions de l'outil devraient permettre d'intégrer la mesure en continu d'autres polluants afin d'apporter une vision la plus complète possible des expositions.

Une mise en application de l'outil a été réalisée, limitée aux particules (PM10 et PM2.5) dans un premier temps. Ces tests ont permis de montrer que l'évaluation fine de l'exposition des populations aux polluants lors de déplacements urbains impose l'association entre la concentration des particules dans l'air ambiant et les quantités de particules inhalées. La quantité de particules cumulées sur un trajet, tenant compte de la durée d'exposition et des taux d'inhalation, s'avère, en effet, un paramètre important, susceptible de modifier la hiérarchisation des expositions.

Ainsi, par exemple, les mesures réalisées ont montré que sur un trajet en RER, les concentrations moyennes en particules peuvent être plus faibles dans les rames que sur les quais et dans les couloirs en station. Or le calcul des quantités inhalées inverse les tendances sur ce même trajet en RER (exposition en réalité plus forte dans les rames qu'en station, compte tenu de la durée d'exposition plus longue dans la rame).

Autre exemple, les concentrations en particules mesurées en vélo peuvent être plus faibles que celles mesurées en métro, mais la différence s'atténue lorsque l'on tient compte des quantités inhalées, le taux d'inhalation étant plus important pour un trajet en vélo.

Cette comparaison devrait être approfondie avec l'utilisation d'autres critères comme, notamment, la composition des particules. Par ailleurs, il est important de remettre en perspective les enseignements sur l'exposition individuelle que peut apporter ce type d'outil avec les enjeux plus globaux de la pollution atmosphérique liée aux transports (autres polluants à considérer, émissions de GES...).





Wilfried Sanchez



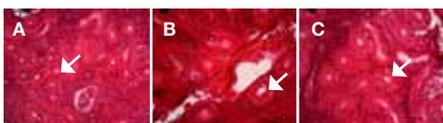
Contributeur

# Biomarqueurs

## Vers leur utilisation pour la surveillance des milieux aquatiques

Figure 1

Coupes histologiques de reins de chabots exposés pendant 21 jours à 0 (A), 0,5 µg/l (B) et 5 µg/l (C) d'acétate de trenbolone. Une augmentation de l'épaisseur de l'épithélium rénal est observée proportionnellement à la concentration d'exposition (flèches). La barre d'échelle représente 30 µm.



Depuis 2000, l'unité d'écotoxicologie de l'INERIS s'est fortement investie dans le développement et la validation d'un ensemble de biomarqueurs chez différentes espèces de poissons dulçaquicoles [1, 2] (épinouche, chabot, chevaine, gardon, goujon) mais également estuariennes et/ou marines (flet, bar, tilapia). Ces paramètres biologiques, spécifiques de mécanismes d'action des contaminants (e.g. induction de stress oxydant, neurotoxicité) ou de perturbations de fonctions physiologiques centrales chez le poisson (e.g. reproduction, immunité), permettent d'évaluer les effets globaux de la contamination des milieux aquatiques, tout en considérant la biodisponibilité des molécules, leur métabolisation, leur toxicité ainsi que la susceptibilité des organismes. Ils sont ainsi considérés comme complémentaires aux approches chimiques et biocénétiques (indices poissons par exemple) conventionnellement mises en œuvre pour la surveillance des masses d'eau [3].

Tableau 1

Relations entre la réponse des enzymes de biotransformation et les paramètres de croissance mesurés chez des bars engagés dans différentes zones portuaires. Coefficient de corrélation de Pearson, \*, \*\* et \*\*\* indiquent des corrélations négatives significatives pour  $p < 0,05$ - $0,01$  et  $0,001$  respectivement.

	Croissance en poids	Croissance en taille	ARN/ADN	Ratio lipidique
EROD	-0,41*	-0,49*	-0,43*	-0,45*
GST	-0,57**	-0,56***	-0,48*	-0,37
Catalase	0,74	0,70	0,47	0,63

### Développement et caractérisation de nouveaux biomarqueurs

Du fait de l'accroissement des connaissances sur la physiologie des organismes et les mécanismes d'action des contaminants, le développement et la caractérisation de nouveaux outils s'avèrent pertinents. Dans cet objectif, l'INERIS coordonne, par exemple, le programme DEVIL (Développement et validation de biomarqueurs chez le poisson pour une application dans le cadre de la réglementation environnementale) réalisé en partenariat avec le laboratoire d'écotoxicologie des universités de Reims et du Havre, les UMR 8187 et 6539 du CNRS, ainsi que le laboratoire de radioécologie et d'écotoxicologie de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). En plus des biomarqueurs d'immunotoxicité (voir article Bado-Nilles et Sanchez, p. 66), ce programme de recherche appliquée s'attache à la validation de biomarqueurs liés aux capacités de croissance des organismes ainsi qu'à l'étude des relations entre les réponses de ces marqueurs physiologiques intégratifs et celles de marqueurs biochimiques plus classiquement utilisés en écotoxicologie. Les résultats acquis sur des bars (tableau 1) et des turbots engagés dans une zone portuaire (Boulogne-sur-Mer) aux contaminations variées montrent qu'il existe une corrélation négative entre l'activité des enzymes de biotransformation (i. e. EROD et Glutathion-S-Transférase) et la teneur lipidique des poissons ainsi que leur croissance [4]. Cette observation tend alors à suggérer une possible prédictivité des biomarqueurs de métabolisation des xénobiotiques vis-à-vis de perturbations à des niveaux supérieurs d'organisation biologique, population ou communauté. Des travaux complémentaires sont d'ores et déjà engagés afin de confirmer cette hypothèse et d'en étendre éventuellement la portée à d'autres espèces de poissons, notamment dulçaquicoles.

L'INERIS participe également au programme européen INTERREG IVA – DIESE (Développement d'indicateurs environnementaux pertinents: une stratégie pour l'Europe) dont la coordination est assurée par l'université du Havre. Dans le cadre de ce travail, l'unité d'écotoxicologie de l'institut s'attache au déve-

## ABSTRACT

Since 2000, the ecotoxicological unit of INERIS develops several biomarkers in various freshwater and marine fish species. These tools are described as relevant parameters to assess the effects of aquatic ecosystems in wild fish species and could be used in regulatory environmental monitoring activities. However, due to increase knowledge on fish physiology and mechanisms of action of pollutants, it is relevant to develop new biomarkers to assess specific effects of environmental pollution such as androgenic endocrine disruption or to obtain new data on biomarker responses and associated predictivity. Biomarkers are research tools weakly applied in regulatory monitoring programmes. As highlighted by the French workshop on development and validation of biomarkers and bioassays for environmental monitoring, the lack of biomarker validation and difficulties for data analysis are major gaps for further large applications. To bridge these gaps, collaborative research activities will be performed at national and European level by AQUAREF and NORMAN network respectively.

loppement d'un marqueur d'exposition aux androgènes chez le chabot. Des travaux antérieurs avaient abouti, chez l'épinoche, à la validation d'un dosage par ELISA d'une protéine androgéno-réglée: la spiggin [5]. La mesure de ce biomarqueur chez des épinoches vivantes dans différents cours d'eau du nord de la France avait alors permis de mettre en évidence l'existence d'une exposition à des molécules à activité androgénique [6]. En raison de la répartition sporadique de l'épinoche dans les cours d'eau, il est toutefois impossible d'obtenir une vision large de l'exposition des poissons à des polluants androgéniques, d'où le besoin d'identifier puis de caractériser la réponse d'autres marqueurs androgéno-régulés. Les travaux entrepris ont d'ores et déjà permis de confirmer l'existence d'un marqueur histologique d'exposition aux androgènes dans le rein du chabot dans des conditions physiologiques normales mais également suite à l'exposition à des androgènes modèles tels que la trenbolone. En effet, un épaississement de l'épithélium rénal est observable chez les poissons mâles en période de reproduction et est également observé, de manière dose-dépendante, chez des chabots femelles exposés à un androgène (figure 1). En plus d'un travail de caractérisation de ce biomarqueur au niveau histologique, des études complémentaires sont mises en œuvre en partenariat avec l'université de Bretagne occidentale afin d'identifier les déterminants moléculaires qui sous-tendent les modifications du tissu rénal [7].

### Vers l'application réglementaire des biomarqueurs

Les biomarqueurs sont des outils très utilisés dans des programmes de recherche. L'efficacité des contrôles et l'amélioration de la qualité des milieux pourraient bénéficier de ces indicateurs. Ils intègrent les effets de multipollution de façon précoce, ils alertent avant que ne s'observent des dommages plus graves chez les espèces. C'est

une opportunité de substituer des actions de prévention simples à des actions correctives coûteuses et de gérer au plus près les rejets industriels. Afin d'identifier les verrous scientifiques et techniques à lever pour leur mise en œuvre dans le cadre de programmes de surveillance de l'état des eaux et des milieux aquatiques, et de dégager des pistes opérationnelles et des axes de recherche prioritaires vis-à-vis de ces indicateurs biologiques, l'INERIS a organisé le 17 novembre 2010, en partenariat avec l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER) et l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), le séminaire national consacré au développement et à la validation, au sens réglementaire, des biomarqueurs et bioessais pour la surveillance des milieux aquatiques. Cet événement a regroupé une cinquantaine de participants représentant des universités, des organismes de recherche publics, de l'industrie, des structures impliquées dans la gestion de la qualité des milieux aquatiques, et du ministère en charge de l'écologie. Il a permis de dégager des pistes d'utilisation des biomarqueurs pour la surveillance des rejets, les études d'impacts ou encore la mise en œuvre des réseaux de surveillance. Ce séminaire a également identifié différentes approches pour faciliter, à terme, la mise en œuvre réglementaire de ces outils avec la réalisation d'étude, d'inter-comparaison des outils disponibles, aussi bien chez les vertébrés que chez les invertébrés, la définition de protocoles normalisés ou encore le développement d'outils d'analyse des résultats issus des études multibiomarqueurs. En accord avec les recommandations formulées lors de cette réunion, ces approches seront abordées, dès 2012, au niveau national dans le cadre des activités du laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques AQUAREF, et au niveau européen dans le cadre des actions du groupe de travail « Bioessais et biomarqueurs » du réseau Norman.

## Références

- [1] Sanchez W., Ait-Aïssa S., Palluel O., Ditche J.-M., Porcher J.-M., *Preliminary investigation of multi-biomarker responses in three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) sampled in contaminated streams*, Ecotoxicology, 2007, 16 (2), pp. 279-287.
- [2] Hinfray N., Palluel O., Piccini B., Sanchez W., Ait-Aïssa S., Noury P., Garric J., Gomez E., Minier C., Brion., Porcher J.M., *Endocrine disruption in wild population of chub (Leuciscus cephalus) in contaminated French streams*, The Science of Total Environment, 2010, 408, pp. 2 146-2 154.
- [3] Sanchez W., Porcher J.-M., *Fish biomarkers for environmental monitoring within the Water Framework Directive*, Trends in Analytical Chemistry, 2009, 28 (2), pp. 150-158.
- [4] Kerambrun E., Sanchez W., Henry F., Amara R., *Are biochemical biomarker responses related to physiological performance of juvenile sea bass (Dicentrarchus labrax) and turbot (Scophthalmus maximus) caged in a harbour polluted area?*, Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, doi:10.1016/j.cbpc.2011.05.006.
- [5] Sanchez W., Goin C., Brion F., Olsson P.E., Goksøyr A., Porcher J.-M., *A new ELISA for the three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) spiggin, using antibodies against a synthetic peptide*, Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2008, 147 (1), pp. 129-137.
- [6] Sanchez W., Katsiadaki I., Piccini B., Ditche J.-M., Porcher J.-M., *"Biomarker responses in wild three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) as a useful tool for freshwater biomonitoring: a multiparametric approach"*, Environment International, 2008, 34 (4), 490-498
- [7] Villeret M., Minier C., Wiest L., Vulliet E., Porcher J.M., Sanchez W., *A new biomarker of androgen exposure in the European bullhead (Cottus sp.), "Aquatic Toxicology"*, soumise.



## Contributeurs



Anne  
Bado-Nilles



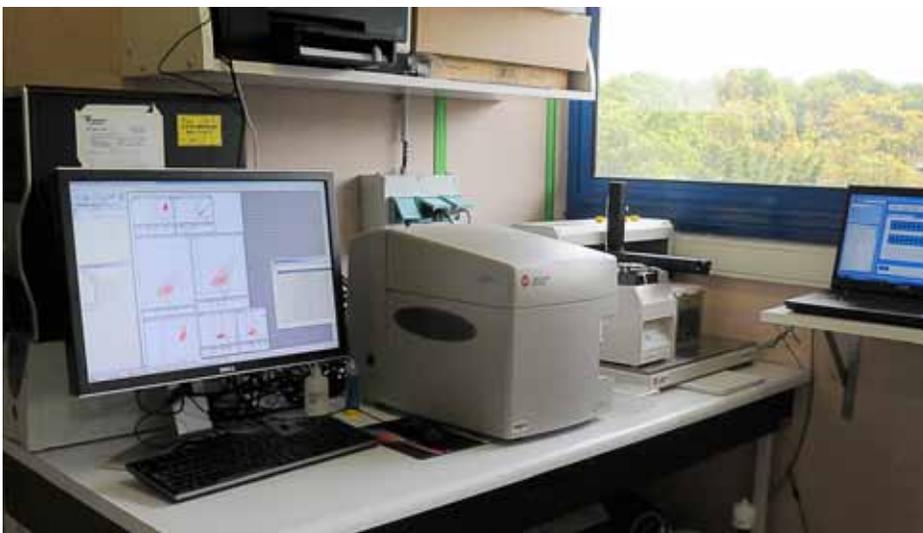
Wilfried  
Sanchez

# La cytométrie de flux, un outil innovant en écotoxicologie

La cytométrie de flux consiste à étudier les caractéristiques physiques et chimiques de particules, telles que les cellules, entraînées dans un flux liquide. Les cellules sont excitées par un laser et émettent en réponse un rayonnement qui permet d'obtenir des informations multiples les concernant. Ces informations sont obtenues soit directement par l'autofluorescence des cellules, soit indirectement par l'intermédiaire de fluorochromes qui sont souvent des marqueurs

### Figure 1

Plateforme cytométrie avec le Cyan™ ADP flow cytometer (Beckmann Coulter) connecté à son lecteur de microplaque, l'hypercyt®intellicyt (Beckmann Coulter).



cellulaires. Les premiers cytomètres de flux ont été inventés dans les années 1950 pour une utilisation en biologie médicale. Depuis quelques années, les domaines d'intérêt se sont élargis à l'analyse biologique et plus spécifiquement à l'évaluation environnementale des effets des substances chimiques avec, à terme, une possible automatisation du suivi de biomarqueurs de la qualité des milieux. Ces méthodes d'analyse en cytométrie de flux sont intéressantes du fait de leur rapidité d'analyse, de l'utilisation de faibles volumes d'échantillon, de leur facilité de transposition à de nombreux modèles biologiques et de l'automatisation possible des dosages. De ce fait, certains laboratoires cherchent à développer des tests en routine pour la détermination, notamment en biosurveillance, de l'état de santé des organismes. Dans ce cadre, des méthodes de dénombrement des cellules sanguines [6], de dosage des différentes activités immunitaires cellulaires [1, 5, 7], de génotoxicité [3] ou encore d'analyse des activités algales [4] ont été développées. L'utilisation grandissante de cet outil en écotoxicologie a tout naturellement conduit l'INERIS à se munir d'une plateforme de cytométrie de flux équipé d'un Cyan™ ADP flow cytometer (Beckmann Coulter) connecté à un lecteur de microplaque, l'hypercyt®intellicyt (Beckmann Coulter) (figure 1). Ce déploiement s'est déroulé dans le cadre d'un programme de recherche appliquée (*Développement et validation de biomarqueurs chez le poisson pour une application dans le cadre de la réglementation environnementale*) coordonné par l'INERIS et associant

**Figure 2**

Localisation des sites d'échantillonnage sur le bassin du Haut-Allier.

le laboratoire d'écotoxicologie des universités de Reims et du Havre, les UMR 8187 et 6539 du CNRS ainsi que le laboratoire de radioécologie et d'écotoxicologie de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Il a pour principal objectif de faciliter l'utilisation en biosurveillance de biomarqueurs peu usités par le biais de l'acquisition d'un socle commun de connaissances. Dans ce contexte, la cytométrie de flux permet le développement de biomarqueurs en lien avec la fonction immunitaire des poissons et un transfert en routine des descripteurs les plus pertinents.

### Application de la cytométrie de flux à l'analyse des activités immunitaires

L'utilisation de la cytométrie de flux est un atout majeur pour les études en biosurveillance car elle allie rapidité de mise en œuvre, analyse quantitative et multiparamétrique, sensibilité de détection et robustesse. De ce fait, au sein de l'INERIS, la plateforme de cytométrie est maintenant utilisée en routine, dans le cadre de différents projets de recherche en biosurveillance, pour le dosage de paramètres immunitaires tels que la distribution leucocytaire, la mortalité cellulaire (nécrose et apoptose), l'activité de phagocytose ou encore la flambée oxydative, à la fois *ex vivo*, *in vivo* et *in situ*. L'immunité est en effet une fonction clé chez les organismes aquatiques du fait de son implication dans la protection vis-à-vis des pathogènes. Aussi, des perturbations de cette fonction physiologique notamment suite à l'exposition à des polluants, peuvent avoir des conséquences écologiques

importantes pour les individus et les populations.

Faisant suite à une étude initiée par la Fédération de pêche de l'Ardèche sur le bassin du Haut-Allier qui a permis d'identifier les sources de contaminants induisant un déséquilibre dans la structure démographique en population d'ombre commun (*Thymallus thymallus*), une collaboration a été mise en place avec l'INERIS afin d'appréhender l'impact de cette contamination sur la truite fario (*Salmo trutta fario*) et le goujon (*Gobio gobio*). En plus des biomarqueurs relatifs à la perturbation endocrinienne ou au métabolisme des polluants déjà disponibles à l'INERIS, des marqueurs de l'immunité ont été mis en œuvre sur les poissons échantillonnés sur deux stations. La station de Luc, point amont de l'Allier, est un secteur à prédominance forestière où les pressions anthropiques sont faibles; à l'inverse, la station de Vabres, en aval, présente des pressions anthropiques intenses liées à l'agriculture, à l'élevage et aux rejets urbains et industriels (figure 2). La campagne de prélèvement réalisée a permis de mettre en exergue, sur les activités immunitaires testées, un effet amont/aval identique pour les deux espèces de poisson. Ces modifications du système immunitaire peuvent être influencées à la fois par des pathogènes [2] et par des paramètres physicochimiques (température, pH, matières en suspension, xénobiotiques...) [8]. Du fait de l'absence d'anomalies externes macroscopiques (parasites, déformations, tumeurs...) et microscopiques (protozoaires) ainsi que de la faible variation des →

## Références

- [1] Chilmonczyk S., Monge D., "Flow cytometry as a tool for assessment of the fish cellular immune response to pathogens", *Fish & Shellfish Immunology*, 1999, 9(4), pp. 319-333.
- [2] Ellis A. E., "Innate host defense mechanisms of fish against viruses and bacteria", *Developmental & Comparative Immunology*, 2001, 25(8-9), pp. 827-839.
- [3] Goanvec C., Theron M., Poirier E., Le Floch S., Laroche J., Nonnotte L., Nonnotte G., "Evaluation of chromosomal damage by flow cytometry in turbot (*Scophthalmus maximus* L.) exposed to fuel oil", *Biomarkers*, 2004, 9(6), pp. 435-446.
- [4] Haberkorn H., Hégaret H., Marie D., Lambert C., Soudant P., "Flow cytometric measurements of cellular responses in a toxic dinoflagellate, *Alexandrium minutum*, upon exposure to thermal, chemical and mechanical stresses", *Harmful Algae*, 2011, 10(5), pp. 463-471.
- [5] Harford A., J.O'Halloran K., Wright P. F. A., "Flow cytometric analysis and optimisation for measuring phagocytosis in three Australian freshwater fish", *Fish & Shellfish Immunology*, 2006, 20(4), pp. 562-573.
- [6] Inoue T., Moritomo T., Tamura Y., Mamiya S., Fujino H., Nakanishi T., "A new method for fish leucocyte counting and partial differentiation by flow cytometry", *Fish & Shellfish Immunology*, 2002, 13(5), pp. 379-390.
- [7] Kalgraff C. A. K., Wergeland H. I., Pettersen E. F., "Flow cytometry assays of respiratory burst in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) leucocytes", *Fish & Shellfish Immunology*, In Press.
- [8] Snieszko S. F., "The effects of environmental stress on outbreaks of infectious diseases of fishes", *Journal of Fish Biology*, 1974, 6(2), pp. 197-208.

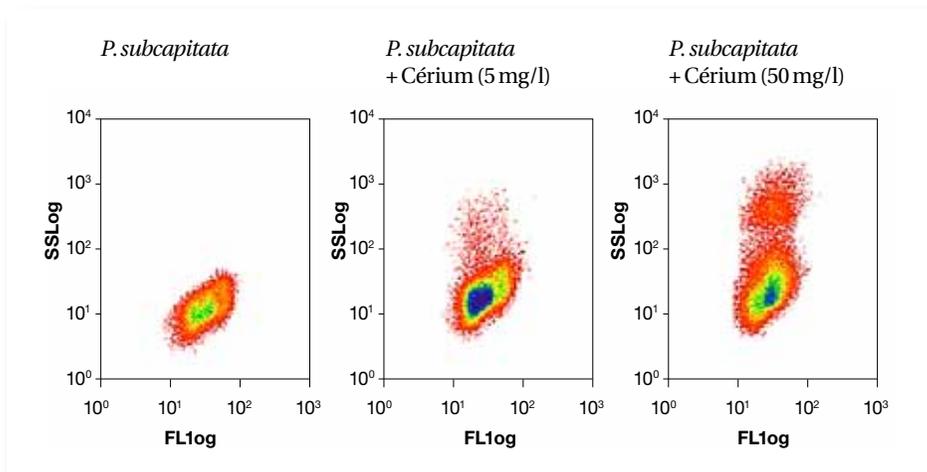


Figure 3

Analyse en cytométrie de flux de la capacité d'adsorption des nanoparticules de cérium sur la membrane des algues, *Pseudokirchneriella subcapitata*. L'axe FL1 correspond à la fluorescence verte provenant de l'autofluorescence des algues. L'axe SSLog est lié à la complexité de la cellule. Ainsi, plus l'algue possède de cérium adsorbé, plus sa complexité va augmenter. Une relation entre taux en cérium et augmentation de la complexité algale est alors clairement démontrée.

→ paramètres physicochimiques (température, oxygène dissout, turbidité), seules les différences de pressions environnementales et donc de contamination apporteraient une explication aux réponses biologiques observées. Le site de Vabres semble donc être une zone de déstabilisation des capacités de défense des organismes par rapport à la station de Luc. Or, cet affaiblissement du système immunitaire pourrait rendre les animaux plus sensibles aux pathogènes et donc provoquer, à terme, une diminution de leur survie. Les résultats de cette étude de ter-

rain montrent clairement l'intérêt de la mise en œuvre de biomarqueurs relatifs à l'immunité dans un contexte de biosurveillance.

### Ouverture de la cytométrie de flux à d'autres applications

En marge de ce programme, la plateforme de cytométrie de flux est ouverte à d'autres applications en écotoxicologie mais également dans d'autres domaines d'expertise de l'Institut. Ainsi, un test a été validé pour l'analyse de l'adsorption des nanoparticules chez différentes espèces d'algues (cf.: *Influence des condi-*

*tions d'essais et des paramètres physico-chimiques sur l'écotoxicité des nanoparticules pour le milieu aquatique*, p. 49). Concernant ce test de toxicité algale, il a notamment été montré une relation dose dépendante entre le taux de cérium présent dans le milieu et l'adsorption de nanoparticules sur la membrane des algues (figure 3). In fine, cette adsorption de cérium provoquerait une réduction de la quantité d'algues dans le milieu, ce qui pourrait induire des conséquences néfastes sur l'écosystème dans son ensemble, car ces algues sont la base de la nourriture de nombreux invertébrés. De même, l'évaluation de la qualité des spermatozoïdes a été mise en place chez l'épinoche à trois épines afin d'appréhender les effets des polluants sur la reproduction des poissons. Un développement similaire est également envisageable chez les mammifères. Dans le domaine de la toxicologie, l'analyse des micronoyaux et des cassures à l'ADN est en cours de développement chez le rat. Il en est de même pour l'étude de l'internalisation des nanoparticules (dioxyde de titane; dioxyde de silicium) sur des cultures de cellules pulmonaires humaines.

Depuis la mise en place de la plateforme de cytométrie de flux, cette technologie a montré son intérêt pour la surveillance des effets induits par les polluants environnementaux sur l'immunité des poissons. Elle offre toutefois de multiples autres possibilités d'applications et devrait, à court terme, intégrer plusieurs programmes de recherche au sein de l'Institut.

## ABSTRACT

Flow cytometry is a technique for counting and examining microscopic particles, such as cells, in a simultaneous multiparametric analysis of the physical and/or chemical characteristics. Currently, flow cytometry is used in the diagnosis of health disorders, but has many other applications in both research and clinical practice. In fact, some laboratories used flow cytometer for biomonitoring of organism health and risk assessment. Thus, a flow cytometry platform was purchased by the INERIS Institute to use it in several projects, such as DEVIL (Development and validation of fish biomarkers for the implementation of environmental legislation). The immune capacities were now routinely performed *ex vivo*, *in vivo* and *in situ* in the Institute. In the same way, other scopes of applications were proposed, such as genotoxicity in rats and three-spined sticklebacks; toxicity in human cultured cells and algae. All these studies enable using of flow cytometry for risk assessment by ecotoxicological, toxicological and biomonitored experiments.



## Contributeurs



Julien  
Caboche



Sébastien  
Denys



Karine  
Tack

# Bioaccessibilité orale des éléments traces métalliques

dans les sols pollués

## Références

[1] Oomen A.G., Hack A., Minekus M., Zeijdner E., Cornelis C., Scoeters G., Verstraete W., Van de Wiele T., Wragg J., Rempelberg C.J.M., Sips A., Van Wijnen J.H., "Comparison of five in vitro digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants", Environmental Sciences and Technology, 2002, 36, pp. 3326-3334.

[2] Caboche J., « Validation d'un test de mesure de bioaccessibilité. Application à 4 éléments traces métalliques dans les sols: As, Cd, Pb et Sb », thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Lorraine, 2009, 248 p.

[3] Denys S., Caboche J., Tack K., Wragg J., Cave M., Jondreville C., Feidt C., "In vivo validation of the Unified Barge Method to assess the bioaccessibility of metals in soils. Communication orale", Conference ICOBTE, Florence, Italie.

Les activités industrielles ont généré une accumulation des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols qui, pour certains d'entre eux, sont toxiques pour l'homme. La gestion des sites et sols pollués repose sur l'évaluation des expositions à ces éléments. Le retour d'expérience montre que les voies d'exposition directe, notamment l'ingestion de terre pour les enfants, engendrent les niveaux de risque les plus élevés. Toutefois, la pratique courante du calcul d'exposition et du risque utilise la concentration totale d'un polluant dans un sol, alors qu'il a été démontré que seule la fraction biodisponible de ce contaminant est susceptible d'induire un effet toxique. La biodisponibilité orale est la fraction de contaminant ingéré absorbée à travers l'épithélium intestinal et qui atteint la circulation systémique. La pratique actuelle tend donc à surestimer la dose à laquelle les cibles sont exposées. Divers protocoles *in vitro* permettant d'approcher de façon simplifiée la biodisponibilité ont été développés ces dernières années. Ces derniers proposent une estimation de la bioaccessibilité orale, fraction de contaminant ingéré qui est solubilisée à l'intérieur de la lumière intestinale. Au vu des nombreux protocoles publiés (e.g. [1]), le groupe Barge (*Bioaccessibility Research Group Europe*), fédération d'instituts et de laboratoires impliqués en évaluation de risque, a proposé un protocole unique. Toutefois, en vue d'une application large et en routine de ce protocole, il est nécessaire de le valider.

## Objectif de l'étude

Afin d'évaluer la pertinence du test de bioaccessibilité *in vitro* UBM (*Unified Barge Method*), et d'en valider les résultats, nos travaux ont consisté à le confronter à des mesures de biodisponibilité *in vivo* [2].

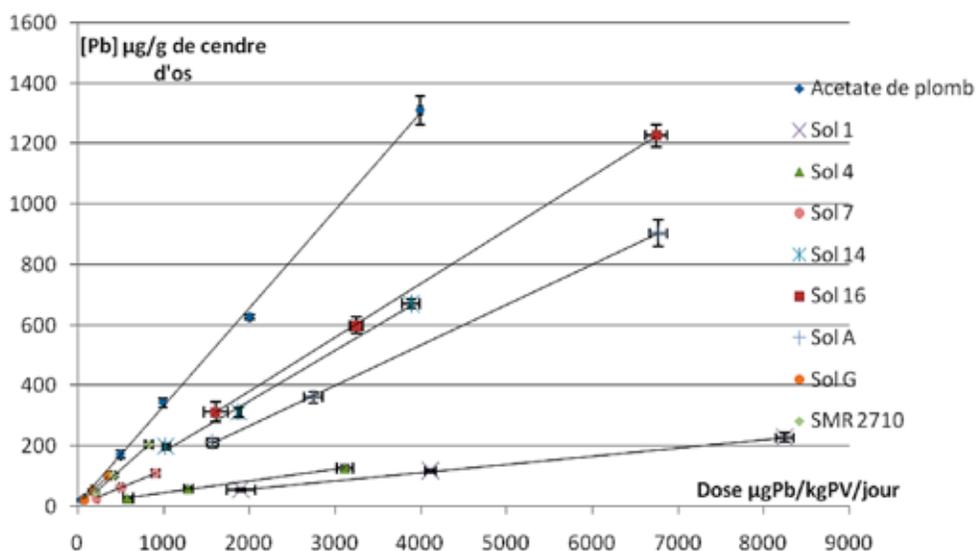
## Matériels et méthodes

Des sols ont été échantillonnés. Ils présentent des historiques de contamination différents et des caractéristiques physicochimiques les plus contrastées possibles afin d'avoir une large variation des valeurs de biodisponibilité pour chacun des ETM. Seize sols en provenance de trois sites ont été échantillonnés à la superficie du sol. Sur deux sites, des apports anthropiques, liés à des activités d'extraction et de traitement de minerais, se superposaient à une anomalie géochimique. Les sols du troisième site ont été contaminés par des dépôts de particules en provenance d'une fonderie.

La biodisponibilité des ETM dans les sols a été évaluée sur des porcelets dont les caractéristiques du système digestif sont proches de celui de l'homme (réalisé au sein du laboratoire de l'ENSAIA/Nancy). Pour chaque sol, trois doses (0,5; 1 et 2 g) ont été administrées par voie orale aux porcelets, à jeun, quotidiennement et pendant 14 jours. En parallèle, et selon le même protocole, les porcelets ont été exposés à des formes de référence (totalement soluble) de chaque élément trace métallique (ETM). Finalement, les concentrations en ETM →

Figure 1

Exemple de courbes dose-réponse pour différents sols et pour l'acétate de plomb dans l'os (moyenne  $\pm$  écart type, n = 3).



→ ont été mesurées par ICP-MS dans les urines, les reins, le foie et l'os. La biodisponibilité relative<sup>1</sup> de chaque ETM, pour chaque sol, est calculée comme étant le ratio des pentes des courbes dose-réponse obtenues (figure 1), pour un sol donné et pour la forme de référence au sein du même compartiment.

Le test UBM repose sur des extractions successives à l'aide de solutions digestives synthétiques simulant les processus physiques et chimiques de la bouche, l'estomac et l'intestin grêle. Le test BARGE unifié permet ainsi d'estimer une bioaccessibilité gastrique et gastro-intestinale. Dans la mesure où la bioaccessibilité est une étape limitante dans le processus de biodisponibilité, une corrélation linéaire doit être obtenue entre les deux paramètres [3].

#### Note

1. La biodisponibilité relative permet de quantifier la différence de biodisponibilité d'un ETM entre une matrice « sols » et une matrice de référence (ici un sel soluble, utilisé pour développer une VTR en toxicologie). La définition s'applique aussi à la bioaccessibilité relative.

## Résultats et discussions

Les résultats montrent que la biodisponibilité relative est très variable en fonction des sols pour le plomb (8 % à 82 %), le cadmium (12 % à 91 %) et l'arsenic (3 % à 78 %). Pour l'antimoine, les valeurs de biodisponibilité relative et de bioaccessibilité relative sont très faibles indépendamment des caractéristiques variées des sols utilisés (valeurs < 20 %) et ainsi ne permettent pas d'obtenir une corrélation linéaire robuste sur une large gamme de valeurs. Pour les trois autres contaminants, les comparaisons entre les données *in vivo* et *in vitro*, ont démontré que la biodisponibilité relative et la bioaccessibilité relative dans les deux phases du test étaient linéairement corrélées pour des gammes de valeurs très étendues. De plus, les résultats montrent que les corrélations obtenues sont hautement significatives ( $r^2 > 0,9$ ) et pour chaque corrélation une pente non significativement différente de 1 est obtenue, ce qui valide le postulat initial de l'effet limitant de la bioaccessibilité dans l'exposition aux ETM du sol (figure 2). Les différences de biodisponibilité entre un contaminant présent dans la matrice sol et un contaminant présent sous une forme soluble peuvent être estimées par les différences de bioaccessibilité de l'élément au sein de ces matrices. Ainsi, l'étude confirme que la bioaccessibilité permet une bonne estimation de la biodisponibilité. Actuellement, le test UBM est le seul test *in vitro* validé par des données *in vivo* pour plusieurs ETM.

## CONCLUSION

L'étude démontre que la biodisponibilité des ETM dans les sols peut être très variable d'un sol à un autre et d'un contaminant à un autre. De plus, les résultats démontrent que la concentration biodisponible peut être nettement inférieure à la concentration totale d'un ETM. Ceci met en évidence la nécessité d'aller au-delà de la simple mesure de la concentration totale d'un élément dans les sols afin d'en appréhender sa toxicité. D'où l'importance d'avoir une méthode validée, rapide et facile pour estimer la biodisponibilité des polluants dans les sols. Ainsi, les résultats de l'étude mettent en lumière que la phase gastrique et intestinale du test *in vitro* BARGE unifié peut fournir une alternative possible aux investigations *in vivo* afin de déterminer la biodisponibilité relative dans l'optique d'affiner la mesure des concentrations d'exposition par ingestion aux ETM présents dans les sols pollués.

## PERSPECTIVES

La validation du test UBM étant acquise pour l'arsenic, le cadmium et le plomb, il est désormais envisageable, pour ces éléments, d'affiner l'estimation des expositions humaines à ces métaux à partir de la bioaccessibilité orale et, non plus à partir de la concentration totale. Ainsi, de manière opérationnelle, la mesure de la bioaccessibilité est un outil novateur qui peut être proposé pour la mise en œuvre de méthodes telles que l'interprétation de l'état des

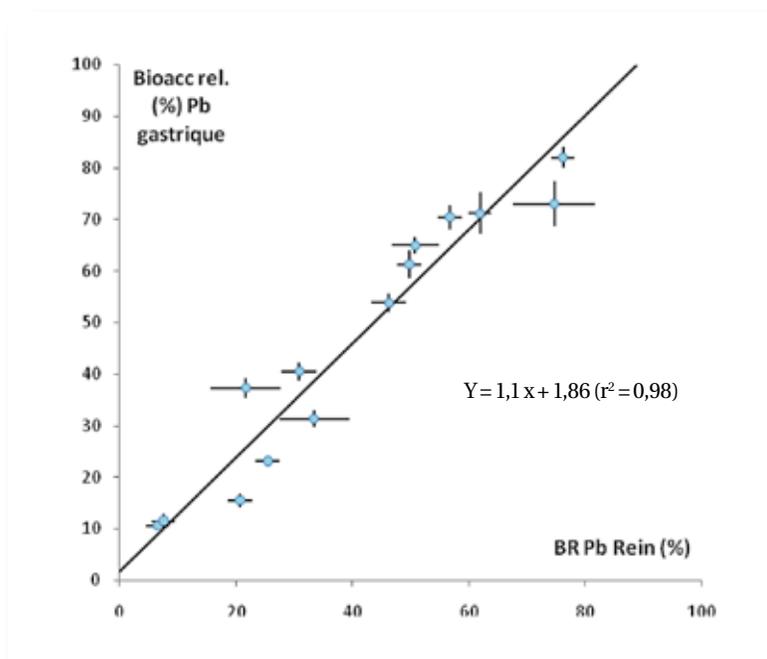


Figure 2

Corrélation entre la bioaccessibilité gastrique relative et la biodisponibilité relative, pour le plomb.

milieu ou l'évaluation quantitative du risque sanitaire.

Sur le plan des perspectives de développement, les résultats issus de recherches concernant l'imprégnation humaine à d'autres types de substances, telles que les retardateurs de flamme bromés ou les polluants organiques persistants pourront également être analysés à la lumière de la connaissance de la bioaccessibilité de ces contaminants, pour les différentes voies déterminantes de l'exposition à ces contaminants.

À ce titre, il conviendra, vraisemblablement, d'étendre les travaux menés jusqu'à présent sur les métaux et la voie orale, aux contaminants organiques de l'environnement et à d'autres voies d'exposition, telles que l'inhalation ou l'ingestion de végétaux. L'INERIS a ainsi proposé en 2011, dans le cadre de l'appel à projet de l'Anses, une étude concernant le développement de tests de mesure de la bioaccessibilité pour la voie inhalation et appliquée aux métaux. Une autre voie de développement est l'intégration de la bioaccessibilité dans les évaluations spatialisées des expositions humaines aux substances chimiques (cf. *article sur les inégalités environnementales*, p. 57).

À terme, les travaux concernant le développement de la notion de bioaccessibilité pour les substances organiques et les autres voies d'exposition pourront également être avantageusement intégrés dans les outils pour l'évaluation spatialisée des expositions et des risques.

## ABSTRACT

Industrial activities lead to contaminate environmental media such as soils. These later accumulate the pollutants such as heavy metal. Management of contaminated sites is based on the estimation of the Human exposure to these elements through either direct or indirect routes. In this context, soil ingestion is often considered, at least in residential areas, as a major exposure route driving the rehabilitation process. For this route, the exposure concentration is based on the total soil concentration of the elements whereas only a fraction of this concentration (the bioavailable fraction) is absorbed by the organism and is likely to exert a toxic effect. Thus estimation of the exposure from the total soil concentration is a conservative approach. These last years, numerous *in vitro* tests were developed to evaluate the bioavailability through the bioaccessibility, the fraction of the soil contaminant digested in the gastro-intestinal tract. The bioaccessibility research group of Europe (Barge) developed a unified protocol (UBM). INERIS conducted studies to assess the accuracy of this test regarding the physiological phenomenon. To achieve this goal, bioavailability of lead, cadmium, arsenic and antimony in different contaminated soils were measured in piglets used as surrogates of humans. Values were correlated to the *in vitro* bioaccessibility values measured by the UBM. Results showed that the bioavailability of antimony was very low and that no significant correlation was obtained for this element. Concerning the 3 other elements, bioavailability and bioaccessibility were highly correlated. These results demonstrate the accuracy of the UBM to improve the exposure assessment of humans to contaminated soils through the ingestion route. It allows the proposal of a new characterization of the human exposure to environmental contaminants. With respect to this validation, the bioaccessibility concept can be integrated to different research project concerning the human exposure to flame retardants or pesticides and the spatialized multimedia human exposure to soil contaminants. In the near future, some works will have to be likely developed to develop the bioaccessibility measurement for organics and for others exposure routes such as inhalation or vegetables consumption.


**Contributeurs**


Valérie Bert

Rodolphe  
GaucherMartine  
Ramel**FOCUS**

# LE PROJET PHYTOSTAB

**Références**

[1] Bert V., Seuntjens P., Dejonghe W., Lacherez S., Thi Thanh Thuy H., Vandecasteele B., *Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites*, Environ Sci Pollut Res, 2009, 16: pp. 745-764.

[2] Mench M., Schwitzguébel J.-P., Schröder P., Bert V., Gawronski S., Gupta S., *Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: I. Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety*, Environ Sci Pollut Res, 2009, 16, pp. 876-900.

[3] Mench M., Lepp N., Bert V., Gawronski S., Schwitzguébel J.-P., Schröder P., Vangronsveld J., *Successes and limitations of phytotechnologies, Outcomes, assessment and outlook from COST ACTION 859. J soils sediments*, 2010, 10: pp. 1039-1070.

La loi Grenelle II promeut l'utilisation des « techniques de dépollution par les plantes » (phyto-rémediation) pour la gestion des sites pollués. Depuis plusieurs années, l'INERIS, mène des projets scientifiques basés sur des expérimentations en vraie grandeur, pour évaluer les performances de ces techniques.

La phytostabilisation aidée est une technique *in situ* de stabilisation des polluants, basée sur l'utilisation conjointe de plantes et d'amendement, pour réduire la biodisponibilité des polluants. Les amendements sont destinés à réduire l'accumulation des polluants dans les parties aériennes des plantes et la toxicité éventuelle des polluants sur les plantes permettant ainsi l'établissement d'une couverture végétale sur un site pollué. La végétation diminue le lessivage des polluants et empêche la dispersion des poussières polluées par le vent et l'érosion, ce qui contribue à diminuer l'impact de la pollution sur le site lui-même et les écosystèmes adjacents.

Le projet PHYTOSTAB, initié en 2007 et coordonné par l'Institut, a pour objectif de vérifier l'efficacité et la pérennité de la phytostabilisation aidée. Ce projet poursuit le travail initié dans le cadre du projet PHYTODEC ([www.phytodec.nl](http://www.phytodec.nl)).

Le dispositif expérimental, mis en place en 2002 à Lallaing (59), est constitué de 9 parcelles réalisées à partir de sédiments de curage du canal de la Scarpe riches en éléments traces métalliques et sur lesquelles des traitements différents ont été appliqués (fétuque rouge ou canche cespiteuse en combinaison avec un amendement minéral basique ou une hydroxylapatite). L'efficacité de la phytostabilisation aidée a été étudiée *via* la mesure des performances des plantes (recouvrement...), de la mobilité des métaux dans le sédiment et de l'accumulation des métaux dans les plantes.

Les résultats ont montré que, sur le long terme, la couverture végétale se maintient grâce à la croissance d'espèces spontanées, ce qui contribue à limiter la dispersion des polluants par lessivage ou érosion. En matière d'immobilisation, le couplage canche/amendement minéral basique se révèle le plus efficace pour stabiliser le cadmium et le zinc, et réduire ainsi les possibilités de transfert dans le sol. Par ailleurs, les graminées, dont fait partie la canche, sont les espèces qui accumulent le moins le cadmium et le zinc dans leurs parties aériennes, diminuant ainsi les risques de contamination de la chaîne alimentaire.

Le projet PHYTOSTAB a été financé par l'ADEME et a été réalisé en collaboration avec l'École des Mines de Douai. Le projet se poursuit sous l'appellation PHYTOSED (2010-2013). Les connaissances acquises ont permis le passage à l'échelle 1, dans le cadre d'un projet de démonstration de la phytostabilisation aidée, couplée à la valorisation de la biomasse produite (PHYTOSED échelle 1 ; 2011-2014).



Karine Tack



Contributeur

# Mesure des métaux rejetés par l'industrie nucléaire dans l'environnement marin

## Note

1. Coordinateurs du GRNC: E. Thybaud et K. Tack (INERIS), P. Germain et O. Connan (IRSN). Membres du comité de pilotage du GRNC: J.-C. Amiard (CNRS), P. Coryn (Expert), J. Delmont (DRIRE Basse Normandie), C. Dressayre (ANDRA), J. Foos (CSPI), A. Guillemette (ACRO), S. Le Bar (Areva NC), C. Louis dit Guérin (EDF).

Le Groupe radioécologie Nord Cotentin (GRNC)<sup>1</sup> a été mandaté par le ministère en charge de l'Environnement pour évaluer l'impact sur l'environnement et sur la santé des rejets chimiques des installations nucléaires de la région du Nord Cotentin. En effet, alors que l'impact des effluents radioactifs rejetés par l'industrie nucléaire sur les niveaux de radioactivité dans l'eau de mer et les espèces marines est largement documenté [3, 4], il y a eu

peu d'études sur l'impact des substances chimiques non radioactives rejetées [7]. Pour ce faire, le GRNC, dont la coordination était assurée conjointement par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) a été amené à réaliser en 2002 un inventaire de leurs différents rejets, effluents radioactifs et rejets gazeux à partir des déclarations d'émissions des industriels concernés. La région du Nord Cotentin abrite une centrale nucléaire (EDF Flamanville), un site de retraitement de combustibles irradiés (AREVA), un site de stockage de déchets faiblement radioactifs (ANDRA), mais également l'arsenal militaire de Cherbourg. Le GRNC est constitué de représentants de ces installations ainsi que de scientifiques, de représentants d'associations des résidents du Nord Cotentin, des services déconcentrés de l'État et des écologistes. À l'issue de cet inventaire et en l'absence de résultats de mesure disponibles, des modélisations ont été réalisées afin d'estimer les concentrations qui pourraient être retrouvées dans l'environnement en fonction des rejets identifiés [5].

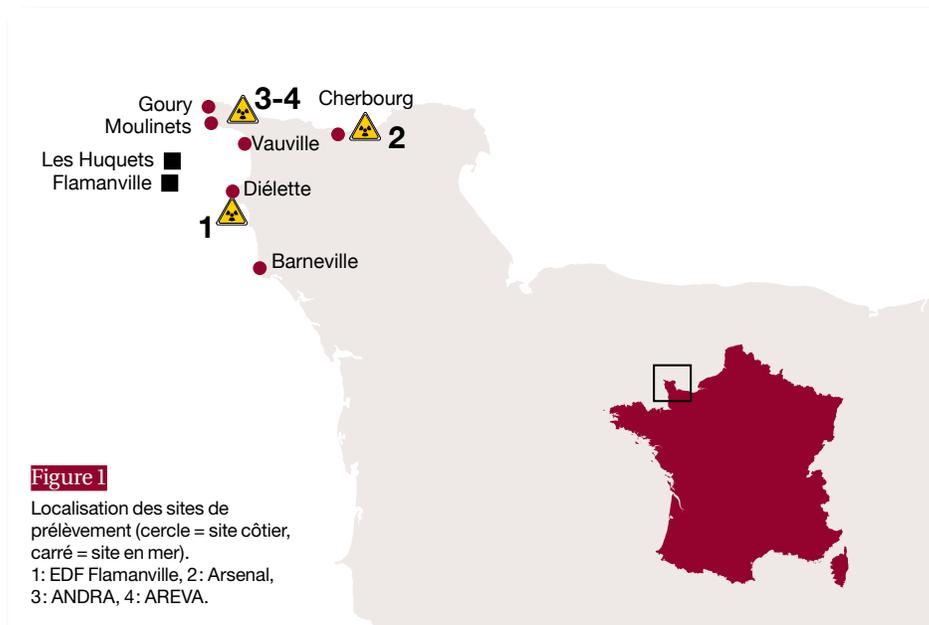
Ensuite, les travaux du GRNC ont consisté à effectuer en 2007, sur la base des traceurs et du plan d'expérience définis en 2002, une campagne de prélèvements et d'analyses afin de valider les modèles élaborés lors de la première phase, mais également de répondre aux interrogations des populations environnantes sur leur exposition potentielle à ces polluants, notamment *via* la chaîne alimentaire.

Sont présentés ci-après les résultats de cette campagne de mesures, effectuée entre mars 2006 et février 2007 dans le milieu marin de la région Nord Cotentin. Ceux de la campagne de mesures effectuées sur le milieu terrestre (ruisseaux, sédiments, fruits, sols, herbes...) et dans l'air ne sont pas reportés ici.

## La campagne de prélèvements et d'analyses

### Localisation des sites de prélèvements

Les différents sites de prélèvements sont identifiés sur la **figure 1**. Sont également reportées les différentes installations nucléaires. →



Station	Al	Ba	Cr	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
Barneville	13066 ± 760	187 ± 14	8,9 ± 2,8	2,0 ± 0,4	2,9 ± 2,0	3221 ± 465	109,7 ± 11,7	5,5 ± 2,5	5,2 ± 0,8	10,2 ± 6,3
Vauville	11958 ± 1476	203 ± 70	8,4 ± 2,8	1,7 ± 0,5	2,4 ± 0,5	3393 ± 606	101,7 ± 26,7	4,8 ± 1,8	4,9 ± 1,2	7,2 ± 2,4
Moulinets Sud	37925 ± 12051	481 ± 137	13,3 ± 4,3	5,4 ± 1,5	6,8 ± 2,9	9808 ± 3298	166,0 ± 41,6	8,8 ± 1,9	7,0 ± 1,4	19,9 ± 5,1
Moulinets Nord	48275 ± 10941	595 ± 129	15,1 ± 3,4	6,7 ± 1,9	9,8 ± 3,1	13227 ± 3440	207,3 ± 34,0	10,6 ± 2,5	7,2 ± 1,7	28,2 ± 4,0
Cherbourg	22183 ± 1911	292 ± 52	16,2 ± 3,8	3,4 ± 0,7	10,9 ± 1,9	8195 ± 709	79,6 ± 12,8	9,8 ± 3,4	16,8 ± 3,9	37,9 ± 5,5

### Tableau 1

Concentration en métaux (mg.kg<sup>-1</sup> MS) dans les sédiments marins (moyenne ± écart type ET) mesurée entre mars 2006 et mars 2007 (prélèvement mensuel). Hg, Cd et Cr(VI) présentent des concentrations inférieures à leur limite de quantifications respective.

→ Le site de prélèvement le plus au sud, Barneville, est considéré comme le site de référence vis-à-vis des rejets des installations nucléaires. Il est situé à la pointe sud d'un tourbillon anticyclonique dans l'eau et ne serait donc que légèrement affecté par ces rejets. En effet, les mesures réalisées sur les éléments radioactifs ont montré que ceux-ci tendent à se disperser vers le nord-est [6]. Le site de Diélette est proche de la centrale nucléaire de Flamanville. Les sites de Flamanville et des Huquets sont proches de la zone où les effluents liquides de la centrale EDF et ceux de l'usine de retraitement sont rejetés en mer. Le site de Vauville est situé entre les deux sites nucléaires. L'émissaire sous-marin par lequel AREVA rejette ses effluents liquides passe au centre de l'anse des Moulinets. Des prélèvements ont eu lieu à la fois dans la partie nord et dans la partie sud de l'anse. Le site de Goury est situé en mer à 5 km au nord de la sortie de l'émissaire des rejets d'effluents liquides de l'usine AREVA. Ce point est connu pour être clairement affecté par les rejets [2]. Enfin, le site de Cherbourg est situé en zone urbaine de la ville de Cherbourg; il est affecté à la fois par l'activité de la ville et par l'activité portuaire, civile et militaire.

### Choix des matrices échantillonnées et des substances analysées

Les matrices à prélever et les éléments à mesurer lors de cette campagne ont été choisis par le GRNC sur la base des résultats de la modélisation [5]. Les matrices retenues pour l'étude de l'impact des rejets chimiques sur le milieu marin, devaient permettre à la fois de mesurer une éventuelle pollution dans l'environnement marin mais également de faire un lien avec l'exposition humaine à ces contaminants *via* la chaîne alimentaire. En effet, les espèces biologiques prélevées comme les patelles (*Patella sp.*), la vieille commune (*Labrus bergylta*) et les crabes (*Cancer pagurus*) sont consommés, au moins, localement. Les sédiments des plages ont également été analysés et ce, notamment parce que les enfants peuvent aussi être exposés à la contamination des sédiments par ingestion de ceux-ci lorsque le sable adhère à leurs mains.

Les substances recherchées, dans une finalité d'étude d'impact sur le milieu marin, ont été sélectionnées selon leur toxicité pour l'environnement et/ou pour la santé humaine, mais également en fonction des concentrations rejetées par les installations nucléaires, les concentrations du fond géochimique et la capacité de bioaccumulation de certaines substances dans la chaîne alimentaire [5]. Enfin, certaines substances ont été sélectionnées en raison de l'absence de données disponibles les concernant dans la littérature afin d'acquérir une certaine connaissance quant à leur présence éventuelle dans l'environnement et à leur quantité. Les substances telles que l'hydrazine ou bien encore le tributylphosphate (TBP), qui sont des substances caractéristiques de rejets d'installation nucléaire, ont été incluses dans la campagne de mesures.

Ainsi, les substances chimiques retenues pour être analysées dans les sédiments sont: Al, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn, Ba, CrVI et Fe; Al, Cd, Cr, Co, Cu, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn et TBP pour les poissons, crustacés et mollusques et enfin, TBP et hydrazine dans l'eau de mer.

### Résultats et discussion

Les concentrations en métaux mesurées dans les sédiments sont présentées dans le **tableau 1**. Les concentrations en métaux décroissent selon la séquence suivante: Al>Fe, >Ba>Mn>Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>Co>Cr(VI)>Cd>Hg. Les plus faibles concentrations ont été mesurées à Vauville et Barneville tandis que les plus fortes l'ont été à l'anse des Moulinets ainsi que dans la rade de Cherbourg (Pb, Zn, Cu et Cr). Dans les deux cas, des apports anthropiques sont connus et peuvent expliquer ces observations. Toutefois, la comparaison de ces résultats aux données de la littérature montre que les concentrations en métaux dans les sédiments sont globalement faibles dans cette étude, exception faite pour Ba à l'anse des Moulinets et pour Pb sur le site de Cherbourg [1].

Les concentrations en métaux et en TBP dans les vieilles (*Labrus bergylta*) et les crabes (*Cancer pagurus*) sont présentées dans le **tableau 2**. On

## Références

- [1] Connan O., Tack K., *Environmental Monitoring Assessment*, 2010, 165, pp. 67-86.
- [2] Fraizier A., Guéguéniat P., Salomon J.-C., *Oceanologica Acta*, 1992, 15, pp. 75-85.
- [3] Germain P., Miramand P., *Nucl instrum. Methods Phys. Res.*, 1984, 223, pp. 502-509.
- [4] Germain P., Leclerc G., Le Cavelier S., Solier L., Baron Y., *Radioprotection*, 2000, 35, 2, pp. 175-200.
- [5] GRNC, 2002a, IRSN, Fontenay-aux-Roses, 309 p.
- [6] Guéguéniat P., Gandon R., Baron Y., Salomon J.-C., Pentreath J., Brylinski J.M., Cabioch L., *Radionuclides, A tool for oceanography*, Guary J.-C., Guegueniat P., Pentreath R. J., éditeurs. Elsevier Science Publishing Co, Inc, New York, 1988, pp. 260-270.
- [7] Miramand P., Bentley D., *Science of The Total Environment*, 1992, 111, 2-3, pp. 135-149.

Station	Espèces	Date	Al	Cd	Cr	Co	Cu	Mn
Flamanville	Vieille ( <i>Labrus bergylta</i> )	20/06/2007	8,6 ± 1,6	<0,04	<0,8	<0,8	1,2 ± 0,5	2,5 ± 0,4
		16/10/2007	5,5 ± 1,2	<0,03	<0,6	<0,6	1,5 ± 0,6	2,3 ± 0,6
Les Huquets		20/06/2007	35,4 ± 6,9	<0,05	<0,9	<0,9	1,4 ± 0,5	2,3 ± 0,5
		16/10/2007	3,9 ± 0,8	<0,04	<0,8	<0,8	1,2 ± 0,4	1,2 ± 0,4
Flamanville	Crabe ( <i>Cancer pagurus</i> )	20/06/2007	3,9 ± 0,8	0,06 ± 0,01	<1,1	<1,1	24,2 ± 8,8	<1,1
		16/10/2007	7,8 ± 1,7	<0,09	<1,7	<1,7	19,1 ± 7,0	<1,7
Les Huquets		20/06/2007	3,1 ± 0,6	0,04 ± 0,01	<0,8	<0,8	23,0 ± 8,6	<0,8
		16/10/2007	5,0 ± 1,0	<0,05	<1,0	<1,0	18,9 ± 7,0	<1,0

Station	Espèces	Date	Hg	Ni	Pb	Zn	TBP (µg.kg <sup>-1</sup> MF)
Flamanville	Vieille ( <i>Labrus bergylta</i> )	20/06/2007	0,373 ± 0,057	<0,8	<0,21	16,0 ± 2,1	< 10
		16/10/2007	0,515 ± 0,081	<0,6	0,26 ± 0,06	16,0 ± 2,0	
Les Huquets		20/06/2007	0,639 ± 0,097	<0,9	0,51 ± 0,14	13,8 ± 1,8	
		16/10/2007	0,526 ± 0,081	<0,8	0,27 ± 0,08	12,4 ± 1,5	
Flamanville	Crabe ( <i>Cancer pagurus</i> )	20/06/2007	0,297 ± 0,044	<1,1	<0,28	289,3 ± 35,2	
		16/10/2007	0,435 ± 0,070	<1,7	<0,43	402,3 ± 48,7	
Les Huquets		20/06/2007	0,335 ± 0,051	<0,8	<0,20	335,8 ± 40,6	
		16/10/2007	0,558 ± 0,085	<1,0	0,50 ± 0,15	409,4 ± 49,3	

constate que les résultats sont cohérents d'une campagne de mesure à l'autre, d'un site à l'autre, mais également entre les deux espèces biologiques suivies sur un même site. Par comparaison avec les données de la littérature, il ressort que les concentrations mesurées dans le Nord Cotentin sont en adéquation, voire inférieures, avec les gammes de valeurs observées dans d'autres zones côtières [1]. D'un point de vue réglementaire, les concentrations sont inférieures aux valeurs limites imposées par la Communauté européenne (CE 2006) sur l'alimentation pour le Cd, Pb et Hg mesurés dans le poisson, mais également dans le crabe. Compte tenu de ces résultats, obtenus sur deux campagnes de mesures, sur deux sites et pour seulement deux espèces, il ne semble pas y avoir de marquage des poissons et des crustacés par les rejets chimiques dans le Nord Cotentin. Enfin, concernant l'eau de mer sur les mêmes sites, les concentrations en hydrazine et en TBP sont systématiquement inférieures aux limites de quantification. Cela confirme un impact non significatif sur l'eau.

Pour ce qui est des patelles, les concentrations en métaux mesurées décroissent selon la séquence suivante: Al > Zn > Mn = Cd > Cu > Cr > Ni > Pb > Co > Hg. Barneville est le site pour lequel les concentrations sont les plus élevées, mais également les plus dispersées (figure 2). Il semble qu'il y ait un marquage de ce site lié à des apports anthropiques, autres que ceux des installations nucléaires (site hors influence), apports propres

à ce site. Toutefois, les concentrations mesurées restent comparables à des concentrations en métaux mesurées dans d'autres régions et sur d'autres mollusques [1]. Un effet saisonnier n'a pas pu être clairement établi. Toutefois, une tendance vers des valeurs plus faibles au printemps a pu être observée pour Al, Mn et Zn.

## CONCLUSION

Pour les sédiments marins, cette étude montre des différences entre les sites échantillonnés pour un certain nombre de métaux traces. Les sites de la rade de Cherbourg et des Moulins présentent des teneurs plus élevées que les autres sites de prélèvement. L'hypothèse la plus probable pour expliquer ces différences est la présence, à Cherbourg, d'activités portuaires, industrielles et de rejets urbains. Aux Moulins, la présence de la conduite de rejets issus d'une installation nucléaire au niveau de la zone de prélèvement peut également influencer les concentrations, à laquelle s'ajoute également la teneur du fond géochimique. Cependant, les valeurs mesurées ne sont pas très importantes comparativement aux données de la littérature.

Les teneurs mesurées dans les poissons (*Labrus bergylta*) et les crustacés (*Cancer pagurus*) sont dans la gamme des valeurs habituellement mesurées dans des zones côtières et sont inférieures aux normes existantes en termes de réglementation pour la consommation humaine. →

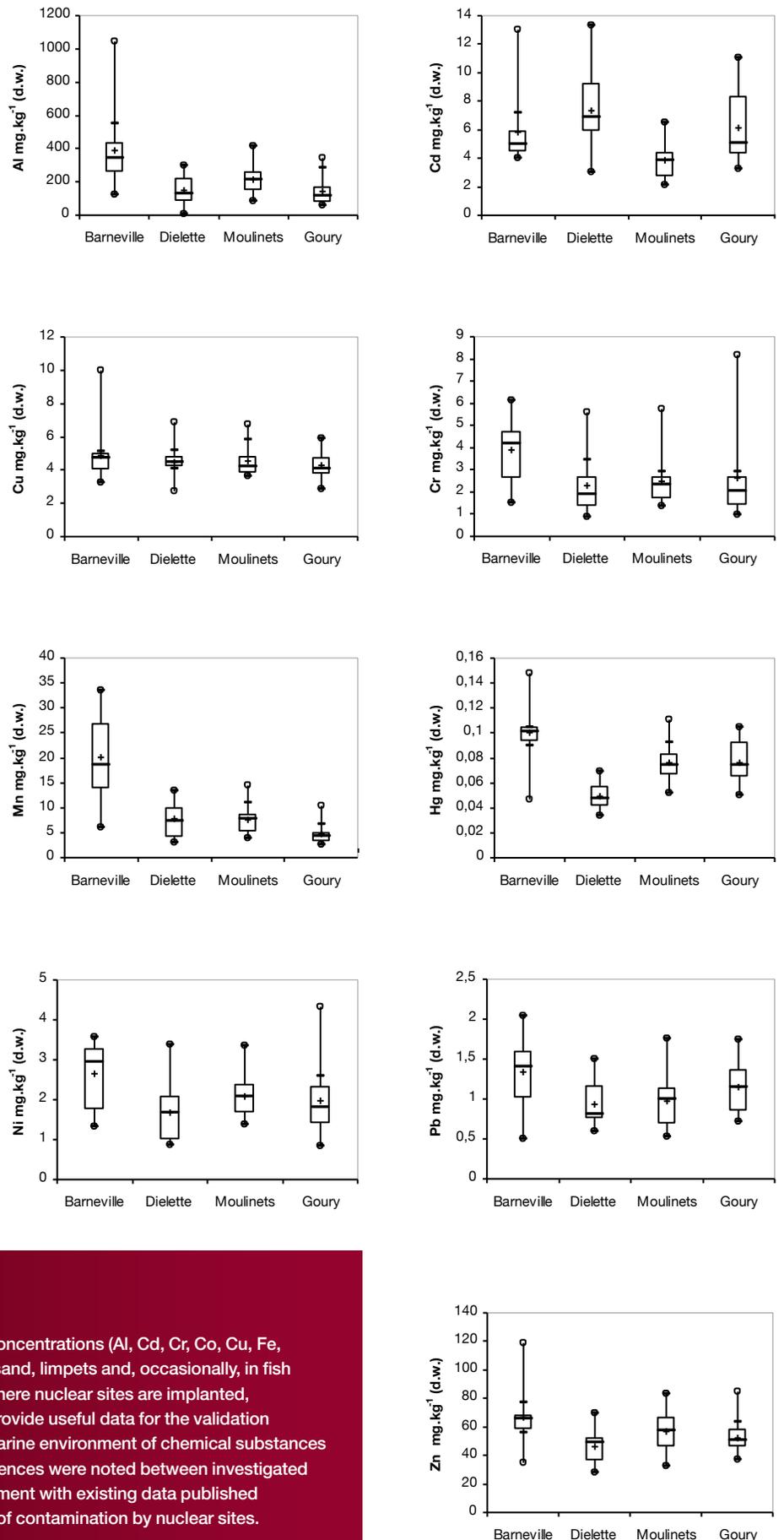
**Tableau 2**

Concentration en métaux (mg.kg<sup>-1</sup> MS.) dans les vieilles (*Labrus bergylta*) et les crabes (*Cancer pagurus*) sur les sites de Flamanville et Les Huquets (moyenne ± écart type ET).

**Figure 2**  
Concentrations mesurées  
dans les patelles (*Patella sp.*)

→ Les teneurs mesurées dans les patelles indiquent des teneurs plus élevées et une plus grande variabilité en métaux traces sur le site de Barneville, sans que cela puisse être attribué aux activités nucléaires de la région, mais plutôt au fond géologique local ou aux conséquences de dragages effectués dans la zone; ceci n'a pas pu être vérifié au cours de l'étude. Sur les autres sites échantillonnés, il n'y a pas de différences significatives entre les teneurs mesurées pour les différents métaux. Par rapport aux données de la littérature, les concentrations mesurées sont dans la gamme de valeurs rencontrées usuellement.

Les rejets chimiques émis par les industries nucléaires du Nord Cotentin ne semblent pas marquer de manière chronique l'environnement marin de la région. Cependant, cette conclusion repose en partie sur la comparaison avec des données de la littérature peu nombreuses. De plus, l'étude a porté sur des mesures effectuées sur une seule année, année qui peut ne pas être totalement représentative de l'activité des installations considérées ici. Par ailleurs, la périodicité des prélèvements allant de bisannuels, pour certains, à mensuels pour d'autres, génère des incertitudes différentes dans l'interprétation des résultats obtenus.



## ABSTRACT

The results of a 1-year long survey of trace metal concentrations (Al, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Hg, Ni, Pb, Zn) have been measured in beach sand, limpets and, occasionally, in fish and shellfish in the North Cotentin area (France), where nuclear sites are implanted, are presented. The objective of this study was to provide useful data for the validation of models predicting the potential impact on the marine environment of chemical substances contained in the radioactive effluents. Even if differences were noted between investigated sites for various metals, their amounts are in agreement with existing data published for similar site and do not appear to give evidence of contamination by nuclear sites.



Interview



Yann Macé

# Risques industriels

## Quels sont les travaux menés par l'INERIS concernant les risques d'accidents majeurs dus aux aléas naturels?

— **Y. M.:** Le début de l'année 2011 a rappelé, avec les événements tragiques survenus au Japon, l'importance de maîtriser les risques dits Natech, induits par des phénomènes naturels exceptionnels (dans le cas présent, un tsunami d'une ampleur hors du commun) sur les installations industrielles. L'INERIS travaille depuis plusieurs années sur ces risques pour améliorer leur évaluation et qualifier les mesures de sécurité proposées. Il s'agit, notamment, de « durcir », face au phénomène naturel redouté, les barrières de sécurité techniques, humaines ou organisationnelles destinées à maîtriser le risque industriel.

## Comment évaluer la performance des organisations complexes industrielles?

— **Y. M.:** La catastrophe de Fukushima a aussi souligné le rôle clé des hommes et de l'organisation dans la maîtrise des risques à toutes les étapes de la vie d'une installation industrielle (conception, exploitation, gestion de crise). L'organisation doit être conçue pour que les humains, qui opèrent au cœur du système industriel complexe, soient le moins possible facteurs de risque. Elle doit aussi être la barrière ultime pour éviter un accident ou permettre de gérer la crise qui en résulte. Il faut donc disposer de moyens de diagnostic intégré, des barrières humaines de sécurité et d'organisation. L'INERIS mène ainsi des travaux pour objectiver et évaluer la capacité des acteurs à mettre en œuvre les mesures de sécurité définies et ainsi déterminer leur niveau de confiance. Les travaux sur la réalité virtuelle également présentés dans ce rapport scientifique répondent aussi à cet objectif. Mettre des acteurs en situation dans un environnement virtuel peut aider à estimer leurs aptitudes à appliquer les procédures, voir à adapter si besoin les procédures ou renforcer la préparation des opérateurs. De tels outils permettent également de simuler des situations inhabituelles auxquelles ils devront faire face inopinément. En outre, le prototype ainsi développé s'appuie sur un modèle de règles conçu pour articuler et mettre en cohérence analyses de risques et de tâches, équipements et organisation. Ce modèle constitue donc

un cadre de référence pour bâtir et documenter un référentiel utile pour le système de management des risques.

## En quoi l'INERIS permet-il le développement de l'activité économique?

— **Y. M.:** Maîtriser les risques industriels d'un territoire, c'est adopter une vision large, prospective et pragmatique. Cette représentation doit en particulier prendre en compte les risques directs et induits, les dimensions technique et humaine, les risques actuels et futurs. Il s'agit de gérer les situations constatées et aussi d'anticiper les risques plus improbables et d'accompagner l'innovation. Comme rappelé par le projet européen iNTeg-Risk, auquel contribue significativement l'INERIS, une organisation résiliente se doit aussi de traiter des risques des technologies émergentes. C'est pourquoi, l'INERIS accompagne l'innovation pour permettre cette anticipation. Dans cette même perspective, l'INERIS contribue au projet PIVERT (Picardie innovations végétales, enseignements et recherches technologiques) qui vise à développer la bioraffinerie du futur, sûre et respectueuse de l'environnement. Associant industriels, universités et centres de recherche, ce projet, l'un des deux seuls IEED (Institut d'excellence pour une énergie décarbonée) retenus cette année dans le cadre des investissements d'avenir, nous offre un cadre de travail unique pour étudier les dangers des procédés innovants de transformation de biomasse et développer, avec les partenaires, la gestion de la sécurité d'un système complexe nouveau. L'INERIS démontre ainsi sa volonté et ses capacités à embrasser la totalité de la problématique du risque industriel en le traitant, si possible, dès sa genèse aux côtés des acteurs économiques. De tels travaux amont de l'INERIS seront ensuite valorisés lors d'actions d'expertise au service de toutes les parties prenantes et peuvent également se concrétiser dans des produits à usage général et à caractère prénormatifs, réglementaires ou encore des guides de bonnes pratiques. Une illustration récente en est le CEN Workshop décidé en 2011, issu d'iNTeg-Risk et concernant un cadre méthodologique de détection et gestion des risques émergents avec pour ambition de réduire simultanément les risques et/ou donc le cycle de mise sur le marché des innovations.



## Contributeurs



Agnès  
Vallée



Mathieu  
Reimeringer



Christophe  
Duval

# Phénomènes naturels, prévenir les accidents majeurs

## Références

[1] Campedel M., *Analysis of major industrial accidents triggered by natural events reported in the principal available chemical accident databases*, JRC, EUR 23391 EN – 2008.

[2] Cozzani V., Campedel M., Renni E., Krausmann E., *Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents*, J. Hazard. Mater. 175 (2010), pp. 501-509.

[3] Renni E., Krausmann E., Cozzani V., *Industrial accidents triggered by lightning*, J. Hazard. Mater. 184 (2010), pp. 42-48.

[4] Affeltranger B., *Séisme de Wenchuan (Chine) du 12 mai 2008 – Impact sur les installations industrielles – Rapport de mission (9-19 novembre 2008)*, Programme 189 APSYRIS, 2010.

[5] Krausmann E., Cruz A.M., Affeltranger B., *The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities*, J. Loss Prev. 23 (2010), pp. 242-248.

[6] Krausmann E., Salzano E., Rota R., Busini V., Derudi M., Masi M., Marzo E., Moscatelli D., Nano G., Cozzani V., Spadoni G., Antonioni G., Bonvicini S., Stramigioli C., Santarelli F., Aneziri O., Vallée A., Affeltranger B., Duval C., Gruet P., Reimeringer M., *Handbook of good practices for the mitigation of Natech issues*, ERRA Natech, Projet européen iNTeg-Risk, 7<sup>e</sup> PCRD, 2010.

[7] Affeltranger B., *Sites industriels inondables : de la vulnérabilité à l'alerte*, Programme 189 APSYRIS, 2009.

**T**empêtes, inondations, séismes, mouvements de terrain, foudre... sont des phénomènes naturels dont les conséquences peuvent être désastreuses pour les populations comme pour les acteurs de la vie économique. Les récents événements survenus en France ou à l'étranger, en 2010 (tempête Xynthia et inondations dans le Var) ou en 2011 (séisme et tsunami au Japon) en constituent la terrible démonstration. Compte tenu des évolutions liées au changement climatique et aux évolutions démographiques et économiques des pays potentiellement touchés, il est fort probable que ces catastrophes soient de plus en plus fréquentes et de plus en plus dévastatrices pour des sociétés dont l'aversion au risque est croissante.

Pour les acteurs économiques impactés tels que les installations industrielles à risques, ces événements naturels peuvent être à l'origine d'accidents technologiques, aussi appelés accidents « Natech ». L'analyse des accidents passés en témoigne : dommages subis par la raffinerie de Tüpras en Turquie (séisme en août 1999), destructions occasionnées aux industries côtières et *offshore* du Golfe du Mexique (cyclone de Katrina, août 2005), inondation de sites industriels (France, septembre 2002), séisme de Wenchuan (Chine, mai 2008)...

Ces événements Natech, peu connus et mal traités jusqu'à présent, ont la particularité d'être à la croisée de plusieurs disciplines (risques naturels, risques technologiques, génie civil...) et se caractérisent par d'importants dégâts simultanés sur les sites industriels, dans un environne-

ment externe également très perturbé (difficulté d'accès, perte d'alimentation électrique générale...). Cette situation rend difficile la mise en œuvre des barrières classiques de prévention, de limitation et d'intervention.

L'INERIS a pris toute la mesure de cette problématique depuis déjà une dizaine d'années. C'est maintenant un acteur identifié pour cette thématique Natech, sur la scène nationale et européenne. Pour répondre aux questions posées quant à la gestion des Natech, en particulier ceux engendrés par un séisme ou une inondation, les réflexions engagées par l'INERIS, dans le cadre du programme APSYRIS et du projet européen iNTeg-Risk, ont porté sur :

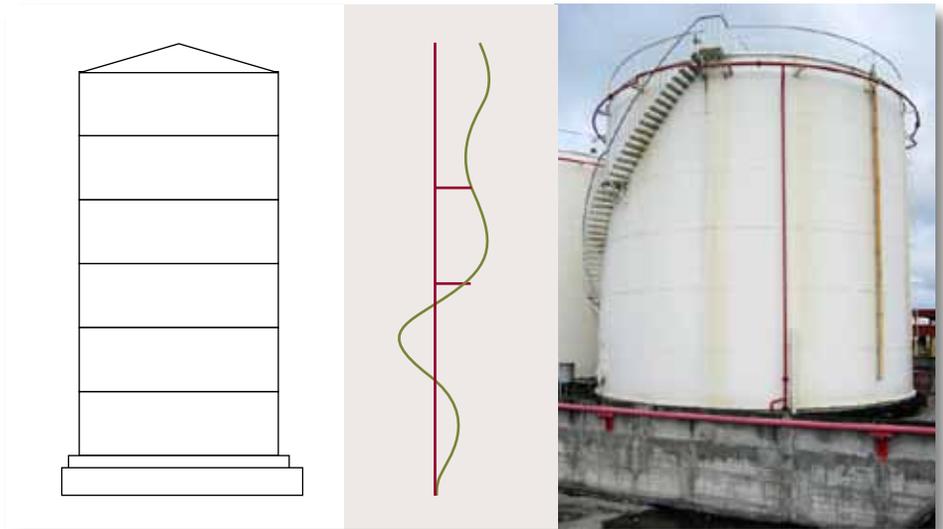
- l'amélioration de nos connaissances sur les accidents Natech en exploitant le retour d'expérience,
- la compréhension et la modélisation du comportement des structures industrielles soumises à un aléa sismique;
- le développement d'une méthode d'analyse du risque;
- la mise en place d'une méthode d'élaboration d'un système d'alerte pour les sites industriels en zone inondable.

## Retour d'expérience

La démarche de retour d'expérience est essentielle à l'amélioration de la maîtrise des risques Natech. Elle permet de comprendre les dynamiques accidentelles dans leurs dimensions techniques et organisationnelles, de vérifier la pertinence des séquences accidentelles établies lors de l'analyse de risques et de valider les

**Figure 1**

Installations industrielles détruites par le séisme de la province du Sichuan, en Chine, en mai 2008.

**Figure 2**

Modèle de réservoir soumis à une sollicitation sismique.

hypothèses ou les résultats de modélisation, relatifs à la réponse des structures.

Le travail a consisté, en collaboration avec le *Joint Research Center* (JRC) et l'université de Bologne, à établir un inventaire des accidents Natech survenus dans le monde, à partir de la littérature et des bases de données existantes (ARIA, MHIDAS, MARS, TAD, FACTS, US NRC) et à les analyser pour en dégager les équipements les plus vulnérables, les dommages observés et les substances impliquées [1, 2, 3].

Le retour d'expérience de terrain de l'INERIS est venu compléter cette analyse. L'INERIS avait ainsi participé, en 1999 en Turquie, à la mission post-sismique de l'Association française de génie parasismique (AFPS), et au retour d'expérience sur l'impact des inondations du sud-est (septembre 2002) sur les activités présentant un risque technologique. L'INERIS et le JRC ont réalisé en 2008 une mission en Chine après le séisme de Wenchuan, survenu le 12 mai 2008, pour observer le comportement de certaines installations industrielles à la sollicitation sismique [figure 1] [4, 5].

### Comportement des structures industrielles soumises à un aléa sismique

L'INERIS a développé son activité d'expertise dans le domaine de la réponse dynamique des réservoirs industriels aux sollicitations sismiques.

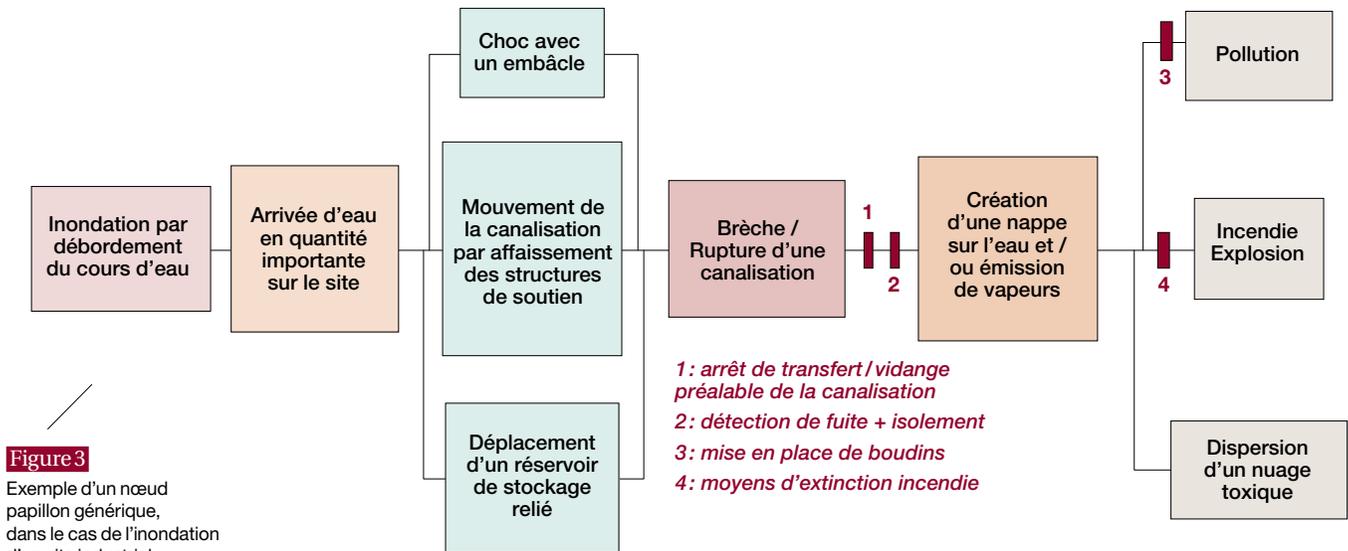
Le calcul des réservoirs est réalisé en trois étapes [figure 2]:

- une analyse modale où sont combinés les modes de poutres représentant le comportement global de la virole, un mode de liquide fixe solidaire du réservoir (fréquence impulsive) et un mode de liquide ballotant;
- le calcul des pressions exercées sur les parois ainsi que les efforts de cisaillement et de flexion en pied et sur les fondations;
- le calcul des critères de flambage élasto-plastique et la hauteur de vague. →

## ABSTRACT

Interaction between natural (earthquake, flooding, lightning, storm, forest fire...) and technological hazards within industrial plants could have disastrous consequences on installations containing hazardous substances, electrical systems...

In this context, INERIS has worked to improve Natech accidents knowledge and prevention in the framework of APSYRIS and INteg-Risk projects, with the Joint Research Center (JRC) and the University of Bologna as partners. The main results are as following: a detailed analysis of past Natech accidents, a model of dynamic equipment response to earthquake, a consolidated methodology combining a quantitative risk assessment approach (QRA) and the bow tie method for piping, atmospheric and pressurised vessels, recommendations for the establishment of an early warning system for industrial plants in flooding areas. Considering the recently growing importance of Natech aspects, INERIS must continue to provide its expertise. Behaviour to earthquake of specific equipments (valves, sensors, cables...), development of models to predict behaviour of equipments in case of flooding, analysis of power supply networks vulnerability, making emergency plans more robust in relation to Natech risk, taking into account several natural hazards occurring simultaneously (earthquake and flooding, drought and forest fires...)... could be the research direction followed by INERIS in the coming years.



### → Méthode d'analyse du risque Natech

Des nœuds papillons génériques, représentant les séquences accidentelles Natech, ont été construits (figure 3) pour aider les exploitants à intégrer les risques naturels dans leur démarche de prévention des accidents majeurs. Les dispositions techniques et/ou humaines qu'un industriel peut mettre en place pour réduire sa vulnérabilité au séisme et à l'inondation (prévention, limitation, protection) ont été répertoriées et examinées pour en déterminer la fonction de sécurité associée et les critères à considérer pour l'évaluation de leur performance.

De plus, dans le cadre du projet européen iNTeg-Risk, une méthode consolidée, alliant d'une part une approche quantitative des risques (QRA) (université de Bologne) et d'autre part une approche par nœud papillon (INERIS) utilisée usuellement en France, a été développée pour les réservoirs atmosphériques et sous pression et les tuyauteries [6]. Cette méthode permet, en particulier, de :

- décrire les séquences accidentelles possibles;
- réaliser une évaluation simple de la résistance des équipements concernés (utilisation de courbes de fragilité);
- conduire, si nécessaire, une analyse plus détaillée de réponse dynamique pour les équipements les plus critiques;
- tenir compte de la présence et de la mise en œuvre de barrières de sécurité, pour finalement se positionner sur l'acceptabilité du risque de l'établissement indus-

triel, à l'aide d'outils tels que la matrice de criticité gravité/probabilité ou les courbes iso-risques.

### Élaboration d'un système d'alerte

Pour les installations industrielles situées en zone inondable, un système d'annonce de crue et une alerte efficace peuvent contribuer à une meilleure réponse opérationnelle des industriels, des collectivités locales et des services de secours. L'INERIS a ainsi été amené à proposer des orientations pratiques utiles à l'évaluation, l'amélioration ou à la conception d'un système d'alerte [7]. La définition d'une stratégie d'alerte appropriée requiert, en effet, l'analyse de la vulnérabilité industrielle en cas d'inondation, l'identification des besoins opérationnels en cas de montée de l'eau et la compréhension des attitudes et des comportements face au danger. Au-delà de ces aspects techniques et organisationnels, le mécanisme d'alerte doit être considéré comme un processus où l'implication des usagers de ce système d'alerte est primordiale (conception participative, facilitation à l'appropriation de l'outil, organisation de tests...).

### CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus par l'INERIS ont permis, à ce jour, d'améliorer la connaissance des accidents Natech et d'établir des méthodes/outils pour aider à une meilleure intégration des risques naturels. Il a été constaté que l'intérêt pour cette thématique Natech va croissant depuis peu. Pour preuves, on peut citer les interactions risques naturels/risques technolo-

giques qui sont les sujets phares de certains colloques nationaux et internationaux organisés récemment (RACR en 2009, Mulhouse en 2010...), la création d'un groupe de travail OCDE en 2009.

Dans ce contexte, l'INERIS se doit de continuer ses travaux. La réflexion engagée sur le comportement au séisme pourrait être étendue à d'autres équipements plus spécifiques comme les vannes, les capteurs, les automates et les câbles de transmission... Il est prévu de réaliser le même type d'analyse pour les équipements soumis à l'action de l'eau. Il est également nécessaire de s'interroger sur la vulnérabilité des réseaux (électricité, gaz naturel, eau, télécommunications...) et de proposer des solutions palliatives. L'INERIS pourra aussi définir des améliorations pour rendre plus robustes les plans d'urgence à l'égard du risque Natech. La démarche d'évaluation des risques, construite sur le principe d'un seul aléa naturel considéré comme agresseur, sera testée et adaptée au besoin dans le cas de plusieurs aléas naturels simultanés (séisme et inondation, sécheresse et feu de forêt...).



Contributeur



Emmanuel Plot

# Facteurs humains,

## management des risques et apport des outils de simulation basés sur la réalité virtuelle

**D**e 2005 à 2010, l'INERIS a conduit une recherche sur les facteurs humains et le management des risques, principalement sur la définition des règles importantes pour la maîtrise des risques, le test et la formation des équipes, ainsi que sur l'apport des outils de simulation basés sur les technologies de la « réalité virtuelle »<sup>1</sup>. Cette recherche a été conduite en particulier via un projet européen (VIRTHUALIS – *Virtual Reality and Human factors Applications for Improving Safety*), un projet national – ANR – (V3S – *Virtual Reality for Safe SEVESO Subcontractors*), et un projet régional avec la Picardie.

### Apport de l'INERIS

Le B.A.-BA de la maîtrise des risques est de tester la performance des équipements en situation dégradée. Il devrait en être de même pour les équipes en charge du bon fonctionnement des installations industrielles. Les tests et la formation sur simulateurs semblent d'autant plus incontournables que les systèmes techniques deviennent de plus en plus sûrs et donc les occasions d'« apprentissage » de plus en plus rares, sachant que le libre apprentissage par essais et erreurs est impossible étant donné la gravité des conséquences d'un accident.

On peut considérer que les outils de simulation favorisent :

- le travail sur les situations rares (dégradées, dangereuses) ;

- la répétition des mises en situation contraintes ;
- la mise à jour du niveau réel de compréhension des opérateurs ;
- le travail sur des situations épurées ;
- la contextualisation des connaissances (dans l'espace et dans le temps) ;
- la sensibilisation aux conséquences d'un écart aux standards, en montrant les phénomènes dangereux qui y sont associés (« en pédagogie, il faut aller jusqu'à l'accident ») ;
- les apprentissages (la mémorisation).

L'usage de simulateurs est très répandu pour les activités de conduite. À EDF, par exemple, une partie des tests et des formations se passe sur des simulateurs de salle de commande. C'est également le cas pour les pilotes d'avion. Mais l'usage de simulateurs est quasi inexistant, à quelques exceptions près<sup>2</sup>, pour les activités humaines qui se déroulent auprès des installations industrielles (démarrage d'un équipement critique, maintenance, chargement/déchargement de substances dangereuses, etc.). Cela tient sans doute à la difficulté de modélisation de ces activités : qu'est-ce qui est important à mettre en scène dans une simulation, sachant qu'il n'est pas possible de tout y mettre ? L'INERIS a travaillé à la résolution de cette difficulté en mettant au point une approche de modélisation permettant d'articuler les analyses de risques, les analyses de tâches (modes nominaux et dégradés) dans un langage adapté à la logique des systèmes informatiques. Ainsi, l'INERIS, au sein des projets VIRTHUALIS et V3S, →



Photos 1 et 2

Rendre concrète la modélisation des risques.

## NOTES

1. Une définition parmi d'autres de la réalité virtuelle: « *Domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et des interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou des utilisateurs (...)* » Fuchs, 2006 – *Le Traité de la réalité virtuelle*.

2. L'ENSOSP, par exemple, a développé depuis plusieurs années, des outils de simulation dédiés aux tests des POI (Plan d'Opération Interne) sur sites industriels. Le CEA et EDF ont, autre exemple, mis au point des applications de réalité virtuelle afin de familiariser les opérateurs à des actions difficiles en leur évitant d'affronter inutilement des environnements hostiles comme par exemple les ambiances radioactives.

3. L'INERIS a développé une méthodologie et le prototype d'une solution informatique de support pour la modélisation des BFDF où le modèle de l'activité humaine est le modèle du simulateur, si bien que le travail sur l'un permet d'améliorer l'autre.

4. Nous avons emprunté, en l'enrichissant, la notion de BFDF aux auteurs de l'ouvrage *Les Clés de la santé-sécurité au travail*, Gaëtan Gibeault et al. 2004 Éditions Afnor.

→ a développé et outillé<sup>3</sup> le concept de BFDF (Bonne Façon de Faire)<sup>4</sup>. La recherche s'est conduite au croisement entre sciences de l'ingénieur, sciences humaines, et informatique.

### La notion de BFDF

Une BFDF est un scénario d'action, une solution (meilleur consensus parmi les différents acteurs) au problème de l'intégration des différents enjeux que les opérateurs doivent prendre en compte dans l'espace et le temps où ils devraient être en mesure de réaliser les tâches d'une ou plusieurs Barrière Humaine de Sécurité (BHS) considérées. Ces exigences sont mises à plat par les analyses de risques liés à la production, à la qualité, à la sécurité, à l'environnement, etc. La BFDF est un arrangement de ces exigences en un ensemble de tâches, plus au moins flexibles, selon une stratégie adaptée à la situation.

La BFDF doit répondre à trois critères:

1. L'ensemble des enjeux doit être pris en compte. Il ne s'agit pas de « faire de la sécurité » d'un côté, de la « production » d'un autre côté, puis encore de la « qualité », mais de réaliser les activités avec la qualité requise, tout en assurant la sécurité. La force de la BFDF réside dans le fait que les compromis sont documentés et choisis, de sorte que l'exécutant n'a pas à faire intervenir différentes règles pour réaliser correctement son travail.

2. Les conditions d'acceptation d'un fonctionnement dégradé sont précisées: sa durée acceptable, les conduites à tenir en cas de

dépassement de cette durée acceptable (mise à l'arrêt, information du management, analyses spécifiques des risques particuliers), les sécurités compensatoires à mettre en œuvre, la nature des informations à traiter et à transmettre (avec un circuit de transmission des informations définies).

3. La BFDF doit être appropriable par les acteurs en charge de son application ou du contrôle de sa bonne application. Ceux-ci doivent être capables de réaliser un diagnostic de la faisabilité des actions prévues: vérification de la compatibilité des opérations avec les conditions concrètes de leur exécution (disponibilité des ressources humaines et matérielles, synchronisation des tâches souvent définies séparément les unes des autres et affectées à des individus différents et « isolés » les uns des autres).

Une BFDF est un pont entre la manière dont les opérateurs pensent et vivent leur activité, et les analyses des ingénieurs. La difficulté est d'intégrer les analyses entre elles (risques, tâches, etc.) au bon niveau de détail, ainsi que les préoccupations et capacités contingentes des acteurs: capacités d'abstraction et de représentation, confiance en soi, fatigue, stress, etc., tout ce qui est utile à l'élaboration des compromis cognitifs de chacun.

Le concept de BFDF donne un cadre pour évaluer des barrières humaines de sécurité. C'est la performance des BFDF compte tenu de l'activité réelle des acteurs qu'il faut évaluer pour en déduire la performance des BHS.

## ABSTRACT

From 2005 to 2010, INERIS has developed a research on human factors and risk management mainly dedicated to the definition of rules, their testing and the training of operators as well as the contribution of simulation tools based on virtual reality. An innovative concept was explored and enriched: RWTD (Right Way To Do). It is defined as the pragmatic and consensual solution to the issue of integration of all the production, safety and environment requirements an operator faces at work. It includes the necessary adjustments that are needed to operate safely and maintain the performance of human safety barriers in degraded environments.

Eliciting the RWTD requires to establish the correspondence between risk and task analysis at the right detail level. It also requires to take into account the constraints and capacities of operators in terms of abstraction and representation, self-confidence, resistance to fatigue and stress. All these aspects contribute to the emergence of cognitive trade-offs.

The objective is to avoid creating a system that actors couldn't appropriate.

The research, based on three case studies in which virtual environments were developed and used, shows that the main contribution of simulation tools lies in this capacity to offer a support for dialogue between actors of the system both during its specification phase and during its use for training, making explicit aspects that are usually hidden or ignored by most actors involved in the design of rules and management systems.

Une BFDF aide à concevoir et rédiger des procédures, ainsi que les contenus de tests et de formation des acteurs de terrain.

### BFDF et simulation: premier bilan

Dans la perspective d'une BFDF, la simulation consiste à placer les opérateurs dans des situations réalistes, rares mais plausibles, où ils auront à contrôler les points critiques, à anticiper les dégradations éventuelles, et à répondre aux problèmes avérés en restant dans le scénario d'action proposé par la BFDF. Les questions seront alors les suivantes : la BFDF est-elle bien conçue ? Si oui, les opérateurs l'ont-ils bien assimilée ?

À travers plusieurs cas d'études, l'INERIS a développé et testé une méthodologie et des outils d'aide à la conception, à la formation et

aux tests des BFDF. Le résultat déjà constaté est que, avant d'être des supports de formations pratiques, les outils de simulation semblent relever le niveau d'exigence en matière de modélisation de activités humaines. Ceci pour deux raisons :

1. La conception d'un environnement virtuel de simulation suppose d'être précis sur ce qu'il faut :

- voir;
- toucher;
- entendre;
- sentir;
- dire;
- manœuvrer;
- ... sous certaines CONDITIONS;
- ... dans l'ESPACE et le TEMPS.

Ce qui oblige à lever de très nombreuses ambiguïtés et/ou incohérences dans les analyses de risques et les analyses de tâches.

2. Les résultats (environnements virtuels, contenus des tests et des formations) sont une épreuve critiquable par toutes les parties prenantes. Autrement dit, les opérateurs ont un accès direct aux analyses de risques et aux analyses de tâches, et peuvent plus facilement apporter leurs expertises pour participer à leur amélioration.

La recherche est à poursuivre, par exemple sur l'utilisation des environnements virtuels comme outils de comparaison des options de la maîtrise des risques. Elle est également à poursuivre sur la modélisation des agents humains virtuels «autonomes» et «intelligents», ou sur le développement d'une physique plus réaliste. Cependant, on peut considérer que les technologies disponibles sont d'ores et déjà suffisantes pour formaliser efficacement les BFDF, et, par ce biais, améliorer la performance des équipes en charge du bon fonctionnement des installations industrielles.

Figure 3

La BFDF : une solution pour l'appropriation des procédures.





Interview



Christophe  
Didier

# Sols et sous-sols

## Comment progresser dans la prévision du déclenchement d'instabilités géologiques?

— **C. D.:** Deux démarches complémentaires peuvent contribuer à la prévision de ce type de phénomènes potentiellement dangereux. La première s'appuie sur une meilleure compréhension des mécanismes de rupture permettant notamment, au travers de la modélisation numérique, de restituer précisément le comportement d'un massif rocheux et d'identifier, par là même, les configurations et les secteurs les plus sensibles à une possible rupture. La seconde consiste à détecter l'émission de signaux précurseurs à la rupture grâce à l'exploitation de systèmes de surveillance en continu des massifs rocheux. Au travers de l'axe COSMOS et de divers projets de recherche nationaux et européens, l'INERIS est fortement impliqué dans le développement de ces deux démarches. Ces travaux concernent notamment la technique de surveillance microsismique et couvrent en particulier le domaine des risques d'effondrements de cavités souterraines ou d'éboulements de versants rocheux.

## Par quel autre moyen peut-on maîtriser ce type de risque?

— **C. D.:** Outre la capacité à prévoir et s'opposer au déclenchement des phénomènes naturels, il est également possible de limiter la sensibilité des territoires en réduisant la vulnérabilité des biens potentiellement exposés. Si cela peut prendre la forme de règles d'urbanisme ayant vocation à interdire ou limiter l'implantation de nouveaux enjeux sur des zones à risque (démarche des Plans de prévention des risques), il est également possible de concevoir des enjeux moins vulnérables aux aléas pressentis sur un territoire. Dans ce domaine, s'appuyant sur un modèle physique innovant qui permet de restituer fidèlement le déclenchement d'affaissements de terrain, l'INERIS travaille depuis plusieurs années afin d'évaluer les conséquences de mouvements de terrain sur

différents types de constructions ainsi que l'efficacité de diverses techniques de confortement ou de protection du bâti.

## La sécurité des puits de mine est-elle encore un sujet d'actualité?

— **C. D.:** Il peut sembler anachronique de s'investir dans le domaine de la sécurité des puits de mine alors qu'aujourd'hui l'exploitation minière est réduite à sa plus simple expression en France métropolitaine. Cet état de fait n'est toutefois pas partagé par tous les pays communautaires, certains faisant même état d'une forte reprise des activités d'extraction minière pour combler les besoins croissants de la société en matières premières. L'INERIS a valorisé ses compétences de plusieurs décennies en sécurité minière pour élaborer et coordonner le projet européen MISSTER. Ce projet s'intéresse au dimensionnement et au confortement des puits de mines en activité, éléments cruciaux pour la sécurité du personnel et pour l'économie de l'exploitation. Il se consacre également à la problématique complexe des puits abandonnés et souvent oubliés dont plusieurs milliers parsèment aujourd'hui le territoire français. Ces ouvrages, fréquemment situés en zone urbanisée et sans que leur emplacement ne soit forcément précisément connu, peuvent présenter, pour certains d'entre eux, des profondeurs de plusieurs centaines de mètres. Associées à divers partenaires polonais, anglais et espagnols, les équipes de la direction des Risques du sol et du sous-sol développent, notamment, des compétences dans les domaines de la localisation et de la mise en sécurité de ces anciens ouvrages.





Matthieu  
Caudron



Contributeur

# Vulnérabilité, conséquences

## des aléas accidentels et naturels sur les biens

### Références

- [1] Boscardin M.D. & Cording E.G. 1989. *Building response to excavation-induced settlement*, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 115(1): pp. 1-21.
- [2] Dimmock P.S. and Mair R.J. 2008. *Effect of building stiffness on tunneling-induced ground movement*, Tunneling and Underground Space Technology, 23: pp. 438-450.
- [3] Caudron M., Hor B., Emeriault, F. and Al Heib M. 2010. *A large 3D physical model: a tool to investigate the consequences of ground movements on the surface structure*, 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Experimental Mechanics, EDP sciences, Poitiers, France, 6, 22001, pp. 1-8.
- [4] Hor B., Caudron M., Al Heib M. & Emeriault F. 2011. *Effectiveness of a mitigation technique for buildings subjected to ground subsidence*. ICAGE. Perth. 7-9 November 2011
- [5] Peng S.S., Luo Y. and Dutta D. 1996. *An Engineering Approach to Ground Surface Subsidence Damage Due to Long-wall Mining*, Mining Technology, 78(900), 1996, pp. 227-231.
- [6] INERIS-DRS-08-95042-13683A. *Recommandations pour l'évaluation et le traitement des conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti*. 2008. 73 p. (disponible sur [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)).

**N**otre société est confrontée de manière répétée aux aléas naturels (séisme, inondation, tempête, mouvements de terrain) et aux risques qui en découlent. Ces aléas ont des conséquences sur notre société, nos activités et notre environnement. Par exemple, les images de structures et infrastructures, habitats, voies de communication, industrie... durement touchés par un séisme, par la sécheresse géotechnique, par une inondation ou par un effondrement minier nous sont familières.

La solution la plus évidente est de se soustraire à ces aléas, de s'implanter dans des zones non exposées. Dans un contexte d'expansion démographique, d'accroissement de la pression immobilière et par la nature même de certains aléas, cela n'est pas forcément possible ou envisageable. La société doit s'habituer et s'adapter pour vivre avec le risque.

Ainsi, parallèlement aux travaux qui sont réalisés pour mieux connaître l'aléa (le phénomène, son intensité, sa propagation...), il est nécessaire de bien connaître la réponse et la vulnérabilité des constructions exposées pour s'assurer de leur comportement sous une sollicitation donnée. Un exemple de cette démarche est le génie parasismique qui, de manière succincte, cherche à préserver la stabilité, voire l'intégrité des ouvrages en choisissant la localisation des zones fusibles afin de protéger les occupants et pouvoir réhabiliter/remettre en service celui-ci, à moindre frais, par la suite. Ce type de démarche, performante, est encore peu répandu dans le domaine de la construction.

Par ailleurs, les constructions sont exposées généralement à plusieurs aléas, qui ne se produisent pas forcément de manière concomitante: par exemple, inondation et mouvements de terrain ou séisme et sécheresse géotechnique... Il y a donc une nécessité de prendre en compte la combinaison des vulnérabilités aux différents aléas auxquels une construction est exposée afin de pouvoir apprécier la performance de l'une ou l'autre technique de protection dans un contexte multi-aléas.

La direction des risques du sol et du sous-sol pilote un axe de recherche «Évaluation et réduction de la vulnérabilité des biens aux aléas naturels et miniers». À travers cet axe de recherche, sont étudiés et développés des moyens permettant d'évaluer la vulnérabilité de constructions (maisons, immeubles, mais aussi infrastructures: voies de communication, installations industrielles...) vis-à-vis de différents aléas, notamment les mouvements de terrains [1]. Par la suite, des techniques et méthodes permettant de réduire la vulnérabilité de ces enjeux, par rapport aux aléas considérés, sont évaluées en termes de performance et de compatibilité dans un environnement multi-aléas.

L'étude des conséquences des aléas de type mouvement de terrain sur les structures et infrastructures est menée grâce à la modélisation physique à échelle réduite et à la modélisation numérique [2, 3].

### Modélisations physique et numérique

Un modèle réduit physique, conçu à l'INERIS, est utilisé pour reproduire, de manière →

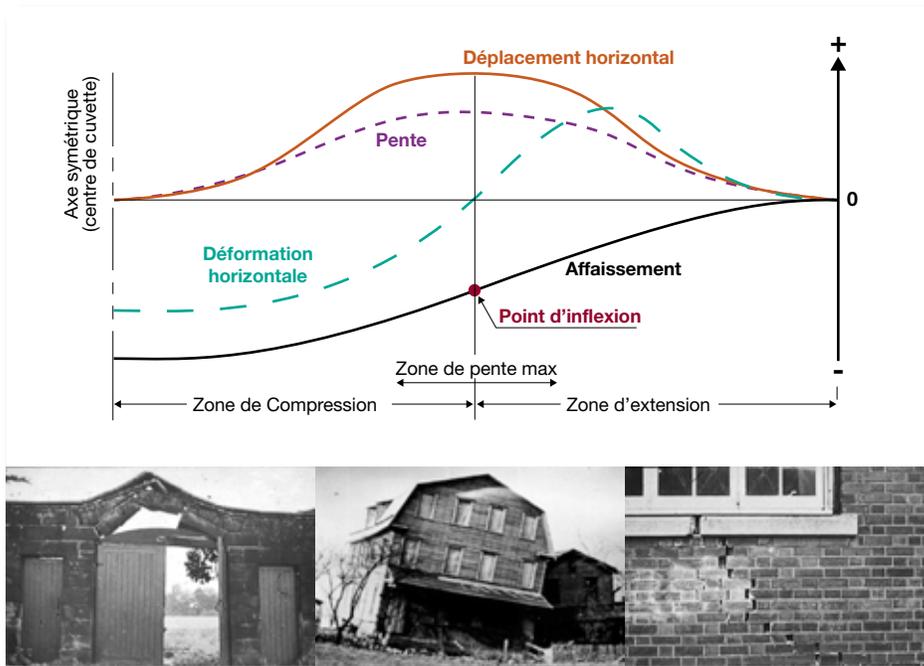


Figure 1

Principales caractéristiques des mouvements de terrain pour un affaissement et leurs conséquences sur les structures.

Figure 3

Dispositions constructives applicables à la structure, à la fondation ou au sol [6].

DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES		Affaissement		Fontis	
		Neuf	Ancien	Neuf	Ancien
Sol	Comblement	x	x	x	x
	Tranchées périphériques	x	x		
	Renforcement par injection	x	x	x	x
	Renforcement par géotextiles			x	
Fondation	Types de fondation	x		x	
	Interfaces horizontales sous l'ouvrage	x			
	Adaptation du système des fondations		x		x
	Reprise en sous-œuvre sous chaînage				x
Structure	Types d'ouvrage	x		x	
	Implantation	x		x	
	Architecture d'ensemble	x		x	
	Dimensions et conception des structures	x		x	
	Matériaux employés	x		x	
	Joints verticaux	x			
	Renforcement de l'ouvrage	x	x	x	x



Figure 2

Carrière (à droite).  
Falaise sous cavée (à gauche).

→ répétable, différentes formes de mouvements de terrain et étudier leurs conséquences sur une structure en surface. À l'échelle géométrique 1/40, une cuvette d'affaissement est, par exemple, simulée avec un ensemble de caractéristiques données (affaissement vertical, profil de déplacements et déformations horizontaux...). Une maquette de structure, représentative du comportement macroscopique d'une maison d'habitation individuelle, est utilisée

pour étudier le phénomène d'interaction sol-structure et le comportement de la structure en fonction de sa position au sein de la cuvette d'affaissement.

En complément, un modèle numérique est réalisé à partir d'un code de calcul aux éléments finis. Après une phase initiale de calage, cet outil permettra d'étendre les résultats obtenus par la modélisation physique en s'affranchissant des limites inhérentes à cet outil. Ainsi, des études paramétriques pourront être menées plus aisément. Ce modèle numérique permet de représenter le mouvement de terrain, la structure, le phénomène d'interaction sol-structure ainsi que la présence éventuelle de techniques de protection visant à réduire la vulnérabilité du bâti.

### Vulnérabilité du bâti et solutions techniques de protection

La première phase a consisté en l'étude et la caractérisation des processus régissant le phénomène d'interaction sol-structure. Plus précisément, il s'agit de bien comprendre comment les déformations qui se développent dans le sol se transmettent à la structure en surface, et comment la présence de celle-ci, par sa géométrie, sa masse, peut modifier les déformations apparaissant dans le sol. Différentes positions de la structure au sein d'une cuvette d'affaissement ont été simulées, permettant d'apprécier le comportement au cours de différentes sollicitations transmises à la structure. Cette première partie a permis de vérifier que la raideur relative de la structure par rapport au sol, sa position sont des paramètres régissant le transfert des déformations depuis le sol de fondation vers le bâti.



Figure 4

Modèle physique permettant la reproduction de mouvements de terrain (INERIS).

Dans un second temps, une solution technique de protection des constructions vis-à-vis de l'aléa affaissement est étudiée dans le cadre de cet axe de recherche. Il s'agit de la tranchée périphérique, un élément que l'on vient placer dans le sol, autour de la structure, afin d'absorber une partie des déformations causées par l'affaissement. L'objectif de l'étude est de préciser les performances que l'on peut attendre de cette technique de protection en fonction de plusieurs paramètres tels que ses caractéristiques géométriques (épaisseur, profondeur, distance de la structure) et donc indirectement son coût, les caractéristiques de la structure et du sol de fondation.

Un modèle réduit de tranchée périphérique a été développé afin de reproduire son fonctionnement réel. Ainsi, un modèle réduit d'un bâtiment protégé par une tranchée périphérique est soumis à un affaissement en utilisant différentes configurations des paramètres. La comparaison des déformations qui apparaissent dans la maquette de structure en l'absence de la tranchée et en présence de celle-ci permet d'évaluer, de manière directe, sa performance en termes de réduction de la vulnérabilité de la structure [4]. De ces essais menés avec le modèle physique réduit, les résultats sont aussi utilisés pour valider un outil basé sur la modélisation numérique qui facilitera la réalisation d'études paramétriques. Quelques performances obtenues avec les différentes configurations de tranchée périphérique sont présentées (figure 6). Elles sont parfaitement comparables aux résultats obtenus lors d'essais en vraie grandeur [5]. Pour les directions les plus sollicitées en fonction de la



Figure 5

Exemple d'application de la tranchée périphérique dans le cadre d'une expérience conduite aux États-Unis [5].

Figure 6

Performance de la tranchée périphérique - Réduction des déformations apparaissant dans différents côtés de la structure.

		Position en pente maximale		Position en extension maximale		
		Tranchée à 1,6 m		Tranchée à 0,6 m		
		Bord haut	Bord haut	Bord droit	Bord haut	Bord droit
ε <sup>h</sup> , moy (%)	Sans tranchée	-0,21	-0,26	-0,16	-0,24	-0,16
	Avec tranchée	-0,13	-0,18	-0,06	-0,20	-0,09
Réduction		38 %	31 %	63 %	20 %	44 %

position de la structure dans la cuvette d'affaissement, la réduction des déformations apparaissant dans la maquette de structure atteint 38 à 63 %, ce qui témoigne d'une efficacité intéressante de cette technique de protection.

### PERSPECTIVES

Pour la suite de cet axe de recherche, il est prévu de poursuivre deux axes de développement. Le premier porte sur l'étude de la vulnérabilité des structures à d'autres aléas, tels le retrait-gonflement des argiles. Des modifications du modèle physique seront réalisées afin de le rendre capable de reproduire, en surface du massif de sol, un champ de déformations similaires à celui engendré par la sécheresse géotechnique. Parallèlement, une maquette de structure plus proche de la réalité sera conçue avec les caractéristiques principales suivantes: un système de fondation, des éléments de

superstructures de type voile de maçonnerie et la présence d'ouvertures (porte, fenêtre). De plus, d'autres moyens techniques, permettant de réduire la vulnérabilité de ces enjeux vis-à-vis des différents aléas pris en compte, seront étudiés et caractérisés afin de pouvoir évaluer leur performance: l'utilisation de géotextile, par exemple [6]. La modélisation numérique sera de même employée pour étendre les résultats obtenus.

Le deuxième axe de travail porte sur la compatibilité des techniques de protection dans un contexte multi-aléas tel qu'évoqué précédemment. En effet, il n'est pas rare qu'un bâtiment soit, par exemple, exposé au risque sismique (compte tenu de la nouvelle réglementation parasismique) et au risque lié au retrait-gonflement des argiles ou au risque mouvement de terrain lié à la présence d'une cavité souterraine (mine, carrière...).

## ABSTRACT

Population growth constrains the society to build in areas that have been avoided earlier because they can be impacted by different natural hazards (for instance, earthquakes, floods, storms, grounds movements, landslides). Beyond the knowledge of these phenomena, it became necessary to assess and reduce the vulnerability of structures to such hazards. It is in this context that INERIS uses physical and numerical modeling in order to analyze specifically the impact of ground movements on buildings. This study is performed in order to propose some methods to reduce the vulnerability of structures. This is achieved by the way of testing several proposed technical solutions and determining the more important parameters driving their effectiveness. Further developments are mainly based on a small scale physical testing apparatus which allows the study of the structure subjected to several and complex natural loadings.


**Contributeur**

**Romuald Salmon**
**FOCUS**

# LES RISQUES MINIERES LIÉS AUX PUIITS DE MINE

**Pour plus d'information**
<http://www.misster.eu>


La sécurité et la fiabilité des puits et des ouvrages d'accès aux travaux miniers sont des préoccupations tant pour l'activité d'exploitations souterraines (mines et carrières) que pour l'aménagement à long terme du territoire, après fermeture d'exploitations. L'INERIS a développé une expertise forte dans ce domaine grâce à son expérience acquise dans le cadre des études de risques liés aux anciens puits de nombreux bassins miniers français, en particulier:

- le développement d'outils et techniques de localisation et de caractérisation des puits (caméra, essais de localisation de puits);
- l'évaluation des risques associés aux anciens puits miniers, en particulier dans le cadre de la réalisation des PPRM (Plan de prévention des risques miniers);
- la définition des moyens de leur mise en sécurité.

Depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2010 et pour une durée de trois ans, l'INERIS s'est vu confié par la Commission européenne, dans le cadre du programme RFCS (*Research Fund for Coal and Steel*), la coordination d'un projet européen relatif aux risques liés aux puits de mines.

L'INERIS s'est associé, pour ce projet, à des partenaires privilégiés européens, experts reconnus dans le domaine minier (exploitants, universitaires, organismes de recherche et développement) couvrant ainsi aussi bien la phase d'exploitation que celle de post-exploitation minière. Les partenaires de ce projet sont l'université de Nottingham (Royaume-Uni), le Central Mining Institute (Pologne), l'exploitant minier Kompania Weglowa (Pologne), DMT (Allemagne), GEOCONTROL (Espagne) et Mines Rescue (Royaume-Uni).

Le projet MISSTER (*Mine Shafts: improving Security and new Tools for the Evaluation of Risks*) a pour objectif:

- de constituer un retour d'expérience d'incidents de puits à l'échelle européenne, pour lequel l'INERIS participe activement (la sortie de ce document de référence est prévue pour l'automne 2011);
- de développer les techniques de localisation et d'auscultation des puits qui ne sont plus visibles et localisés avec précision mais qui peuvent poser des problèmes de sécurité;
- d'améliorer techniquement et économiquement les méthodes de mise en sécurité des puits (choix des matériaux de remblai, ouvrages bétonnés de fermeture...);
- de constituer un guide de bonne pratique pour l'évaluation des risques associés aux puits et pour identifier les techniques de fermeture les mieux adaptées aux enjeux de proximité.

L'INERIS et ses partenaires seront fortement impliqués dans la troisième Conférence Internationale sur le Dimensionnement et la construction de puits, organisée par la Mining Technology Division de l'Institute of Materials, Minerals and Mining, qui se tiendra du 24 au 26 avril 2012 à Londres. Au-delà du domaine minier et « après-mine », les travaux menés dans le cadre de ce projet bénéficieront au secteur des stockages souterrains de CO<sub>2</sub>, d'hydrocarbures et de déchets (problème de fuite et impact sur la sécurité et l'environnement).

**Figure 1**

Pologne, septembre 2008. Bassin minier "Knurów-Szczygłowice" – vue générale de l'effondrement du puits 5 (la zone effondrée est indiquée en jaune). Source: GIG.



# Programmes 190

Axes de recherche soutenus par le ministère chargé de l'Écologie  
Recherche sur l'évaluation des risques technologiques et des pollutions

## LISTE AU 1<sup>ER</sup> SEPTEMBRE 2011 DES AXES DE RECHERCHE EN COURS

### Direction des risques chroniques

- Toxicologie prédictive et expérimentale
- Écotoxicologie
- Chimie de l'environnement
- Procédés propres et valorisation de sous-produits
- Métrologie de l'environnement
- Modélisation de la qualité de l'air/(CHIMERE et ses produits dérivés)
- Analyses socio-économiques et modélisation intégrées
- Évaluation du risque sanitaire

### Direction des risques accidentels

- Dynamique des fuites et formation des nuages
- Développement des explosions en milieu complexe, du processus de combustion aux effets sur les structures
- EPHEDRA Plateforme numérique
- Sécurité des procédés de production ex-biomasse appliquant les principes de la chimie verte intégrés en bioraffineries
- Risques accidentels liés aux nanoparticules et matériaux nanostructurés
- Modélisation moléculaire
- Risque, décision et incertitudes
- Organisation et sécurité : du diagnostic à l'ingénierie

### Direction des risques du sol et du sous-sol

- EVARISTE: Évaluation des risques à long terme liés au stockage souterrain du CO<sub>2</sub>
- COSMOS: Compréhension, modélisation et surveillance de la déformation et de la rupture des massifs rocheux
- EREVAN: Évaluation et réduction de la vulnérabilité des biens exposés aux aléas naturels et miniers

# Programmes de recherche

soutenus par l'Agence nationale de la recherche – ANR (en cours au 15 septembre 2011)

2006	
V3F	Virtual reality for safe SEVESO subcontractors
2007	
SENTINELLE	Monitoring 4D de sites de stockage de CO <sub>2</sub> – Bilan des flux et traçage des sources
COREGI	Définition et conception d'une architecture technologique d'aide au management de la résilience d'un complexe industriel
BIOMAP	Analyse environnementale, socio-technico-économique et évaluation des risques des filières bioénergies: applications pratiques à différentes problématiques
SEDIGEST	Gestion durable des sédiments de dragages des ports: élaboration d'une méthodologie de validation de la filière « restauration de cavités terrestres de la bande littorale »
HPPP-CO <sub>2</sub>	High pulse poroelasticity protocol for geophysical monitoring of CO <sub>2</sub> injection in reservoirs
VULCAIN	Étude de la vulnérabilité des structures industrielles soumises à des sollicitations dynamiques: explosions ou impacts d'origine accidentelle ou malveillante
HYPE	Réservoir hydrogène haute pression
AQUANANO	Transfert de nanoparticules manufacturées dans les aquifères: développement d'une méthodologie et identification des processus
2008	
CLEANWAST	Évaluation des technologies propres et durables de gestion des déchets
MEGAPOLI-PARIS	Pollution des aérosols: impact sur la qualité de l'air et scénarios
FLUXOBAT	Développement d'outils optimisés pour l'évaluation des transferts de COV depuis une source dans le sol ou la nappe vers l'air atmosphérique et l'air intérieur des bâtiments
DIMITHRY	Données et instrumentation de la mitigation du risque hydrogène pour des applications grand public des systèmes pile à combustible
ATESTOC	Stockage d'énergie thermique en aquifère pour la réalisation d'éco-quartier: étude du site de Château-Thierry
AgingNano&Troph	Impact environnemental des résidus de dégradation des nanomatériaux (RDNs) commercialisés: devenir, biotransformation et toxicité vis-à-vis d'organismes cibles d'un milieu aquatique
RISKER	Recherche intégrée des impacts sanitaires et environnementaux de la contamination par les polluants organiques persistants aux îles Kerguelen
NANOSEP	Procédés d'agrégation et de séparation des nanoparticules
NANOCARA	Caractérisation globale (taille, concentration, composition en ligne) des nanoparticules produites par des procédés en phase gazeuse
QUAD_BBC	Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les bâtiments à basse consommation d'énergie
2009	
AMORE	Analyses multicritères pour le développement d'outils d'aide à la décision en vue de la prévention des risques environnementaux
SLAMS	Études multidisciplinaires du mouvement de Séchilienne: aléas, risques associés et conséquences socio-économiques
NANOFRESES	Nanoparticules de fer pour la remédiation des eaux souterraines
2010	
ECHIBIOTEB	Outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi de traitements avancés des eaux usées et des boues
INCERDD	Prise en compte des incertitudes pour les décisions durables
PREDIMOL	Prédiction des propriétés physicochimiques des produits par modélisation moléculaire
TRISTAN	Structures intrinsèquement sûres aux tirs d'armes et aux engins improvisés
BARPPRO	Dimensionnement des barrières physiques de protection contre la propagation d'ondes de souffle consécutives à une explosion
BIOFILTREE	Filtration biologique pour la réduction des éléments traces dans la biomasse des arbres
2011 (PROGRAMMES EN COURS D'ÉVALUATION)	
ECOTOXTAILS	Nouvelle plateforme pour évaluer l'écotoxicité des mélanges de polluants
POLYSAFE	Conduite en sécurité d'un réacteur échangeur intensifié continu pour des réactions polyphasiques

# Autres programmes

(financements sur fonds publics) – en cours au 1<sup>er</sup> septembre 2011

## ADEME

NANOFlueGas	Caractérisation et réduction des émissions particulaires issues de l'incinération des déchets contenant des nanomatériaux manufacturés
France Nord	Analyse et Maîtrise du risque Intégré – Démonstrateur de Recherche Captage-Transport-Stockage du CO <sub>2</sub>
Impact environnemental du stockage du CO <sub>2</sub>	
PRIMEQUAL 2	Qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments et des transports : caractérisation des émissions
MAPEC	Mesure Automatisée des PM et Emissions Canalisées
Peren Bois	Biomasse énergie
Procédures de référence pour la mesure des émissions de bâtiments d'élevage et stockages d'effluents d'élevage	
Intercomparaison de chambres à flux	
BIOHEALTH	Health effects of particulate emissions from small scale biomass combustion
Pesticides glyphosate air intérieur, air extérieur	
EMILIBS	Développement d'un dispositif de mesure de métaux lourds en continu par spectroscopie LIBS
DIMENSION	Impact métaux particules/bioaccess
PRO-EXTERN	Analyse coûts-bénéfices du recyclage des déchets urbains en agriculture
SALUT'AIR	Changement climatique et stratégies de lutte contre le transport de la pollution à longue-distance
APIFLAME	Développement d'un module opérationnel de calcul des émissions de feux de forêts en Europe
Recherche Isogaz	
ATTENA	Acceptation de l'AN des polluants organiques
CAPHEINE 2	Caractérisation des phénomènes de transfert en zone insaturée des éléments traces
POST-EXPLOITATION	Gestion du biogaz des lixiviats pendant la phase de post-exploitation – étude et évaluation des méthodes d'oxydation de méthane et traitement de lixiviats par atténuation naturelle
Évaluation de la qualité métrologique de capteurs passifs susceptibles d'être utilisés pour la surveillance des eaux souterraines au droit et en périphérie des sites pollués	
CaraCityChlor	Outils de caractérisation pollutions COV dans les eaux souterraines et sols
OSSIMED	Outil spécifique au site de mesure et suivi des émissions diffuses
ANOPE	Analyse des nouveaux polluants pour la déclaration E-PRTR
Valorisation COMRISK	Organiser l'implication des populations dans l'évaluation et la gestion des sites pollués
Programme d'étude des pesticides dans l'air de logement d'agriculteurs mis en œuvre par ATMO Nord-Pas-de-Calais	
RÉSEAU RSEIN	Recherche santé environnement intérieur
OFRI+	Observatoire français des ressources dans les infrastructures
Caractérisation des substances émergentes dans les composts	
PHYTOSED	Efficacité et pérennité de la phytostabilisation aidée sur un sédiment excavé contaminé par les éléments traces
PECMICMOG	Les interactions perturbateurs endocriniens – microorganismes et matières organiques, moteurs de l'écodynamique et de l'impact des polluants au sein d'écosystèmes épuratoires
Sélection de bioindicateurs de la qualité des sols et typologie des matières fertilisantes organiques à l'aide de différentes approches statistiques	
Écotoxicité des matières fertilisantes organiques	
ZAPA-IZNOGOU BARC	Impact des Zapa, nouvelle génération d'outils de diagnostic et d'évaluation des bénéfices sanitaires et économiques attribuables aux restrictions de circulation
EMBRUVE	Émissions atmosphériques liées au brûlage de véhicules
PHYTOSED 2	Parcelle expérimentale de grande taille
PHYTOAGGLO	Intégration des phyto technologies de gestion et de traitement des sols pollués dans un projet de renouvellement urbain de la communauté d'agglomération creilloise

## MEDDTL

PICASO Alternatives	Places des méthodes alternatives en expérimentation animale dans le domaine santé-environnement : prise en compte des attentes sociétales
---------------------	---

# L'INERIS, partenaire de 28 programmes européens

(au 15 septembre 2011)

PREDICT-IV	Profiling the toxicity of new drugs: a non animal-based approach integrating toxicodynamics and biokinetics
NANODEVICE	Novel concepts, methods and technologies for the production of portable, easy to use devices for the measurement and analysis of airborne engineered nanoparticles in workplace air
MACC	Monitoring atmospheric composition and climate
iNTeg-Risk	Early recognition, monitoring and integrated management of emerging, new technology related, risks
ALFA-BIRD	Alternative fuels and biofuels for aircraft development
FLOMINET	Flooding management of underground coal
EC4MACS	European consortium for modelling of air pollution and climate strategies
AQUAREHAB	Development of rehabilitation technologies and approaches for multipressured degraded waters and the integration of their impact on river basin management
NANOFOL	Folate-based nanobiodevices for integrated diagnosis/therapy targeting chronic inflammatory diseases
GedSet	Gestion des sédiments transfrontaliers
CITEAIR II	Common Information to European air
Diese	Détermination d'indicateurs environnementaux pertinents: une stratégie pour l'Europe
Citychlor	Tackling urban soil and groundwater contamination caused by chlorinated solvents
HELIOS	High energy Lithium-Ion storage solutions
CO <sub>2</sub> PIPEHAZ	Quantitative failure consequence hazard assessment for next generation CO <sub>2</sub> pipelines
NANOCARA	Caractérisation des procédés de fabrication des nanoparticules
CARBOLAB	Improving the knowledge of carbon storage and coal bed methane production by <i>in situ</i> underground tests
FONTIS	Validation de méthodes et d'outils de reconnaissance et surveillance de zones à risque de fontis
MISSTER	Mine shafts: improving security and new tools for the evaluation of risks
COSMOS	Integrated <i>in silico</i> models for the prediction of human repeated dose toxicity of cosmetics of optimise safety
ATOPICA	Atopic diseases in changing climate, land use and air quality
GREENLAND	Gentle remediation of trace element contaminated land
MACC II	Monitoring Atmospheric Composition and Climate Interim Implementation
Q-NANO	A pan-european infrastructure for quality in nanomaterial safety testing
HEROIC	Health and Environmental Risks : Organisation, Integration and Cross-fertilisation of Scientific Knowledge
ENVIROMONITOR	Demonstration of an on-site automated environmental monitoring instrument for real-time detection of hazardous airborne particles and activation alarms
DEMCAMER	Développement de membranes nanostructurées pour réacteurs/procédés chimiques
MARINA	Managing risks of nanomaterials

Programme coordonné par l'INERIS

# Sujets de thèse sélectionnés en 2011

## Risques accidentels

Compréhension des mécanismes d'incompatibilités chimiques par modélisation moléculaire

## Risques chroniques

Malformations congénitales et exposition à certains toxiques de l'environnement en Bretagne

Approches *in vitro* et *vivo* du métabolisme de perturbateurs endocriniens chez le poisson zèbre

Analyse spatio-temporelle du lien environnement-cancer en Picardie (ASTECC-Picardie)

Détermination de stratégies de surveillance des milieux aquatiques basées sur l'utilisation de biomarqueurs chez le poisson

Étude du métabolisme et de la toxicocinétique du benzo[c]fluorène (B[c]F)

Étude de l'émission de nanoparticules lors du vieillissement de produits finis

Fin de vie des nanomatériaux : caractérisation physicochimique des nanoparticules relarguées vers les milieux aqueux -

Compréhension des sources et des processus de formation de la pollution particulaire

Impact d'une exposition périnatale aux champs électromagnétiques sur le développement des fonctions cérébrales chez le rat jeune et adulte

Étude de la génotoxicité des nanoparticules chez les rongeurs

Développement et validation de méthodes *in vitro* et *in silico* pour l'évaluation de risque de substances chimiques

## Risques sols et sous-sols

Amélioration des méthodes de surveillance géophysique des cavités souterraines

Étude des effets de l'eau sur les mécanismes de déformation et de rupture affectant les carrières de craie

Impact des fontis sur le bâti : évaluation de la vulnérabilité des bâtis aux fontis par modélisation physique

Effets de l'eau sur l'altération des discontinuités rocheuses. Expérimentation et approches numériques

# Gouvernance scientifique

(au 3 novembre 2011)

## Le Conseil scientifique

### Neil Mitchison

#### Président du Conseil

Représentant de la Commission européenne en Écosse

### Francelyne Marano

#### Vice-présidente

Professeur des Universités  
Laboratoire de cytophysiologie et toxicologie cellulaire (LCTC)  
Université Paris VII-Denis-Diderot

### Véronique Bach

#### Professeur des Universités

en physiologie humaine  
Université de Picardie Jules-Verne

### Martha Heitzmann

#### Senior Vice President

Research & Innovation  
AREVA

### Christian Blaise

#### Chercheur scientifique

Responsable de l'Unité de toxicologie aquatique au Centre Saint-Laurent  
Montréal, Québec, Canada

### Alain Desroches

#### Professeur

Codirecteur du pôle Santé et Biotechnologies  
École Centrale de Paris

### Patrick Landais

#### Directeur Scientifique

ANDRA

## Invités permanents au Conseil

### M. Christian Delvosalle

#### Président de la commission

« Risques accidentels »

Faculté polytechnique de Mons

### Patrick Flammarion

#### Président de la commission

« Risques chroniques »

Directeur Scientifique, délégué à la recherche  
ONEMA – Office national de l'eau et des milieux aquatiques

### Jean-Louis Durville

#### Président de la commission

« Risques sol et sous-sol »

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement  
– Conseil Général des Ponts-et-Chaussées

## Core (Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise)

### COLLÈGE ACADÉMIQUE

#### André Laurent

Professeur Laboratoire des Sciences du Génie Chimique – CNRS

École nationale supérieure des industries chimiques de Nancy

### COLLÈGE INDUSTRIEL

#### Jean-Charles Boutonnet

Chef du Département Toxicologie et Environnement

ARKEMA

#### Henri Molleron

Directeur Environnement

COLAS SA

#### Manoelle Lepoutre

Directeur du Développement Durable

TOTAL

### Philippe Lubineau

Responsable Recherche et développement mécatronique et développement durable  
CETIM

Direction de l'Agence de programme

### COLLÈGE ASSOCIATIONS

#### Maryse Arditi

Pilote du réseau Risques et impacts industriels

France Nature Environnement

#### Francis Glemet

Porte-parole

Coordination nationale médicale santé environnement

#### Ariane Vennin

Porte-parole

Écologie sans Frontière

### Éric Pracisnore

Vice-Président

CLCV

### COLLÈGE SYNDICAT

#### Gérald Hayotte

CFDT

#### Louis Persico

CFE-CGC

### COLLÈGE ÉLU

#### Michel Guilloux

Adjoint au maire

Mairie de Feyzin

#### René Drouin

Maire

Mairie de Moyeuve-Grande

### COLLÈGE ÉTAT

#### Cédric Bourillet

Sous-Directeur des risques accidentels

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement  
Direction générale de la prévention des risques Service des risques technologiques

#### Claire Hubert

Chef du service de la recherche (représentée par Lionel Moulin, chef de la mission environnement, risques et santé)

Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement  
Commissariat général au développement durable.  
Direction de la recherche et de l'innovation

# Les Commissions scientifiques

(au 3 novembre 2011)

## Risques chroniques

### Patrick Flammarion

#### Président

Directeur scientifique, délégué à la recherche  
ONEMA – Office national de l'eau et des milieux  
aquatiques

### Scott Altmann

#### Vice-président

Chef du service « Transfert des radionucléides »  
Direction scientifique  
ANDRA

### Robert Barouki

Directeur Unité INSERM U747  
UFR BIOMEDICALE  
Université de Paris V – René-Descartes

### Jean-Yves Bottero

Directeur de Recherche CNRS  
Directeur de l'IFRI12 PMSE  
CEREGE UMR 6635 CNRS  
Université Paul-Cézanne – Aix-en-Provence

### Marie-Thérèse Brondeau

Chef du département « Polluants et santé »  
INRS – Vandoeuvre-lès-Nancy

### Hélène Budzinski

Université Bordeaux 1  
Environnements et paléoenvironnements  
océaniques et continentaux  
EPOC – UMR 5805 CNRS  
Laboratoire de physico- et toxico-chimie  
de l'environnement (LPTC)

### Pierre-André Cabanes

Adjoint au Directeur du service des études  
médicales  
EDF-Gaz de France

### Claude Casellas

UMR 5569 « Hydrosociences »  
Département Sciences de l'environnement  
et santé publique  
IPU – Faculté de Pharmacie – Montpellier

### Christian Cochet

Chef de la Division Santé  
Centre scientifique et technique du bâtiment  
(CSTB)

### Louis de Gimel

Chargé de la coordination des questions  
de développement durable  
Direction de la coordination statistique  
et des relations internationales (DCSRI)  
INSEE

### Éric Parent

Enseignant-chercheur  
École nationale du génie rural, des eaux et des  
forêts (ENGREF)

### Laurent Perotin

Chef de Département  
EDF  
Laboratoire national d'hydraulique  
et environnement

### Laurent Rosso

Directeur  
École nationale du génie rural, des eaux  
et des forêts (ENGREF)

### Dimosthenis A. Sarigiannis

Physical and Chemical Exposure  
Institute for Health and Consumer Protection  
European Commission – Joint Research Centre  
Ispra – Italy

### Christian Seigneur

CEREA  
École nationale des Ponts et Chaussées

### Paule Vasseur

Professeur de toxicologie  
Université de Metz EBSE  
UFR Sciences fondamentales appliquées

## Risques accidentels

### Christian Delvosalle

#### Président

Professeur Génie des procédés chimiques  
Faculté polytechnique de Mons

### Philippe KLEIN

#### Vice-président

Chef du département Management  
des risques industriels  
EDF – Recherche et Développement

### Alain Chetrit

Chargé de mission Risques technologiques  
TOTAL

### Jean-Marie Flaus

Laboratoire d'automatique de Grenoble  
École nationale supérieure d'ingénieurs  
électriciens de Grenoble (ENSIEG)

### Franck Guarnieri

Directeur  
École des Mines de Paris  
Pôle Cindyniques Sophia Antipolis

### Éric Issartel

Responsable Sécurité incendie  
Direction générale des opérations L'ORÉAL

### Pierre-Étienne Labeau

Service de métrologie nucléaire  
Faculté des sciences appliquées  
Université libre de Bruxelles

### Jean-Paul Lacoursière

Professeur associé du département de génie  
chimique  
Université de Sherbrooke – Québec – Canada

### François Murgadella

Responsable du programme  
« Sécurité globale »  
Agence nationale de la recherche

### Yves Mortureux

Union internationale des chemins de fer  
Plateforme Sécurité/Équipe d'appui

### Abdelhamid Nazih

EADASTRIUM  
Service Sûreté nucléaire

### Laurent Perrin

École nationale supérieure des industries  
chimiques (ENSIC)  
Nancy

### Christophe Renier

Directeur d'objectifs infrastructures  
GDF SUEZ

### Isabelle Sochet

École nationale supérieure d'ingénieurs  
de Bourges (ENSIB)

### Richard Turcotte

Natural Resources Canada  
Canadian Explosives Research Laboratory  
CANMET – OTTAWA, Ontario, Canada

## Risques du sol et du sous-sol

### Jean-Louis Durville

#### Président

Ministère de l'Écologie, du Développement  
durable, des Transports et du Logement – Conseil  
Général des Ponts-et-Chaussées

### François-Henri Cornet

#### Vice-président

Institut de Physique du Globe de Strasbourg

### Hafid Baroudi

Directeur  
GEODERIS  
Metz

### Dominique Bruel

École des Mines de Paris  
Centre de Géosciences – Fontainebleau

### Didier de Bruyn

Chef de l'Unité Balance of Plant  
Centre d'Étude de l'énergie nucléaire (SCK-CEN)  
Belgique

### Denis Fabre

Professeur au CNAM  
Chaire de Géotechnique

### Pierre-Lionel Forbes

Directeur Stratégie matières et déchets,  
BG aval  
AREVANC

### Alain Guilloux

Président-Directeur-général  
TERRASOL

### Yves Guise

Directeur Sogimines

### François Hedou

Chargé de Mission de la Prévention des Risques  
Mouvements de Terrain  
Ministère de l'Écologie, du Développement  
durable, des Transports et du Logement  
Bureau des risques naturels terrestres – BNRT

### Vincent Labiouse

Maître d'enseignement et de recherche (MER)  
Rock Mechanics Laboratory LMR  
School of Architecture, Civil and Environmental  
Engineering ENAC  
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne –  
EPFL – ENAC – ICARE – LMR  
Lausanne – Suisse

### Laurent Levêque

Responsable équipe Géologie  
TEGG – SGG  
Aix-en-Provence

### Xavier Piccino

Inspection générale des carrières  
Mairie de Paris

### Pierre Potherat

Chef du groupe Mécanique des roches  
CETE de Lyon  
Laboratoire des Ponts et Chaussées de Lyon

### Jean-François Thimus

Professeur Université catholique  
de Louvain-la-Neuve  
Belgique

### Maxence Vermersch

Directeur  
MAVESA

# Indicateurs du Contrat d'objectifs 2006-2010

## RECHERCHE

	2006	2007	2008	2009	2010
<b>Nombre total de publications</b>	295	318	314	319	328
<b>Nombre total de publications dans des revues à comité de lecture</b>	68	68	68	92	92
<i>dont ISI</i>	48	54	57	74	80
<b>Nombre de communications dans les congrès</b>	237	285	305	296	321
<b>Productivité de la recherche sur fonds publics</b> (nombre de publications pour 100 k€ de fonds publics)	3,2	3	2,7	2,4	2,46
<b>Financements de la recherche de l'INERIS par des sources autres que le Programme 190 (k€)</b>	2399	3 310	3 182	4 112	4 007
<b>Chiffre d'affaires en recherche partenariale (k€)</b>	5 562	3 310	3 192	2 329	2 307
<b>Nombre de brevets</b>	4	4	4	4	4
<b>Contribution<sup>1</sup> de l'INERIS à la production scientifique des opérateurs du Programme 190</b>					
– Part française de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,55	0,58	0,52	ND	ND
– Part européenne de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,07	0,07	0,07	ND	ND
– Part mondiale de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,02	0,02	0,02	ND	ND
<b>Contribution de l'INERIS à la reconnaissance scientifique des opérateurs du Programme 190</b>					
– Part mondiale de citations reçues par les publications de l'INERIS et indice d'impact relatif à deux ans, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)					
• Part mondiale de citations	0,02	ND	ND	ND	ND
• Indice d'impact relatif <sup>2</sup>	0,66	ND	ND	ND	ND

ND: non disponible.

Nombre et taux de participation de l'INERIS aux projets financés par les programmes cadres de l'Union européenne (5 <sup>e</sup> , 6 <sup>e</sup> et 7 <sup>e</sup> PCRDT) <sup>3</sup>	5 <sup>e</sup> PCRDT		6 <sup>e</sup> PCRDT		7 <sup>e</sup> PCRDT	
	Nombre	Taux (‰)	Nombre	Taux (‰)	Nombre	Taux (‰)
• Participations	21	0,29	21	0,37	13	ND
• Coordinations (*dont 2 <i>via</i> Eu_VRI)	4	0,33	3	0,63	3*	ND

(1) – Calcul par l'OST (Observatoire des sciences et techniques).

(2) – Un indice d'impact de 1 indique que la visibilité des publications de l'INERIS est égale à celle de l'ensemble des publications.

(3) – Données calculées par l'OST, au 1<sup>er</sup> avril 2009 pour le 5<sup>e</sup>, le 6<sup>e</sup> et le 7<sup>e</sup> PCRDT.

# Publications

## Risques chroniques

### 2010

DAVID A., GOMEZ E., AIT-AISSA S., BACHELOT M., ROSAIN D., CASELLAS C., FENET H.

Monitoring organic contaminants in small French coastal lagoons: comparison of levels in mussel, passive sampler and sediment  
*Journal of Environmental Monitoring*, 2010, vol. 12, pp. 1471-1481

R'MILI B., DUTOUQUET C., SIRVEN J.-B., AGUERRE-CHARIOL O., FREJAFON E.

Analysis of particle release using LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) and TEM (transmission electron microscopy) samplers when handling CNT (carbon nanotube) powders  
*Journal of Nanoparticle research*, 2011, vol. 13, n° 2, pp. 563-577

MENCH M., LEPP N., BERT V., SCHWITZGUEBEL J.-P., GAWRONSKI S.W., SCHRODER P., VANGRONSVELD J.

Success and limitations of phytotechnologies at field scale: Outcomes, assessment and outlook from COST Action 859  
*Journal of Soils and Sediments*, 2010, vol. 10, n° 6, pp. 1039-1070

PERE J.-C., MALLET M., PONT V., BESSAGNET B.

Evaluation of an aerosol optical scheme in the chemistry-transport model CHIMERE  
*Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44, n° 30, pp. 3688-3699

YENGO L., BROCHOT C., PERY A.

Combined global sensitivity analysis and population PBPK modeling for assessing consistency of TCDD toxicokinetics data in mice  
*Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2010, vol. 2, n° 6, 2010, pp. 7770-7771. (Six<sup>th</sup> International Conference on Sensitivity Analysis of Model Output)

DE WINDT L., DABO D., LIDELOW S., BADREDDINE R., LAGERKVIST A.

MSWI bottom ash used as basement at two pilot-scale roads: Comparison of leachate chemistry and reactive transport modeling  
*Waste Management*, 2011, vol. 31, n° 2, pp. 267-280

HUBERT P.

Effet des faibles doses: preuves et inférences  
*Environnement Risques et Santé*, 2010, vol. 9, n° 4, pp. 295-302

ROOSLI M., FREI P., BOLTE J., NEUBAUER G., CARDIS E., FEYCHTING M., GAJSEK P., HEINRICH S., JOSEPH W., MANN S., MARTENS L., MOHLER E., PARSLow R.C., POULSEN A.H., RADON K., SCHUZ J., THUROCYZ G., VIEL J.F., VRIJHEID M.

Conduct of a personal radiofrequency electromagnetic field measurement study: proposed study protocol  
*Environmental Health*, 2010, vol. 9, art. 23

CICOLELLA A.

Health and environment: the 2<sup>nd</sup> public health revolution  
*Santé Publique*, 2010, vol. 22, n° 3, pp. 343-351

VOSGES M., LE PAGE Y., CHUNG B.C., COMBARNOUS Y., PORCHER J.M., KAH O., BRION F.

17 $\alpha$ -Ethinylestradiol disrupts the ontogeny of the forebrain GnRH system and the expression of brain aromatase during early development of zebrafish  
*Aquatic Toxicology*, 2010, vol. 99, n° 4, pp. 479-491

HAZEBROUCK B., BLANCHER P., VERGER P., PIRARD P., HEYMAN C., MOSQUERON L., MOTREFF Y., RICOUX C., PAGNON S.

Soil contamination following an industrial accident: towards efficient investigations and assessment  
*Proceedings of the 11<sup>th</sup> International UFZ-Deltares/TNO conference on management of soil, groundwater & sediments (CONSOIL 2010)*, 22-24 September 2010, Salzburg, Austria

HULOT C., GAY G., HAZEBROUCK B., THIAM A., MAROT F.

Transfer of volatile compounds from soil: comparison between predictions and field measurements with different models; development of the volasoil model for a depleting source  
*Proceedings of the 11<sup>th</sup> International UFZ-Deltares/TNO conference on management of soil, groundwater & sediments (CONSOIL 2010)*, 22-24 September 2010, Salzburg, Austria

BENOIT Y., CHANCERELLE L., DUMESTRE A., FALCAO SALLES J., FAYOLLE-GUICHARD F., GRUNDMANN G., KYSELKOVA M., MORINIÈRE J., PANDARD P., RICHNOW H. H., ROSELL M.

Physico-chemical and biological characterization of an aquifer polluted with ETBE  
*Proceedings of the 11<sup>th</sup> International UFZ-Deltares/TNO conference on management of soil, groundwater & sediments (CONSOIL 2010)*, 22-24 September 2010, Salzburg, Austria

LICAS L., MICHEL J., DENYS S.

PAH transport characterization in polluted soils using an innovative semi-empirical method at the field scale  
*Proceedings of the 11<sup>th</sup> International UFZ-Deltares/TNO conference on management of soil, groundwater & sediments (CONSOIL 2010)*, 22-24 September 2010, Salzburg, Austria

CABOCHÉ J., DENYS S., FEIDT C., DELALAIN P., TACK K., RYCHEN G.

Modelling Pb bioaccessibility in soils contaminated by mining and smelting activities  
*Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2010, vol. 45, n° 10, pp. 1264-1274

JOSEPH W., FREI P., ROOSLI M., THUROCYZ G., GAJSEK P., TRCEK T., BOLTE J., VERMEEREN G., MOHLER E., JUHASZ P., FINTA V., MARTENS L.

Comparison of personal radio frequency electromagnetic field exposure in different urban areas across Europe  
*Environmental Research*, 2010, vol. 110, n° 7, pp. 658-663

Ji-CHEVREUIL X.

Évaluation des expositions humaines aux particules ultrafines dans l'environnement domestique  
*Thèse de doctorat de l'université Paris-Est. Présentée et soutenue publiquement le 11 mars 2010*

GALLOU G.

Étude et optimisation de la spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS) pour le suivi en continu des polluants émis par les sources fixes  
*Thèse de doctorat de l'université Paris XI Orsay. Présentée et soutenue publiquement le 28 septembre 2010*

PERE J.-C.

Simulation de l'impact climatique des aérosols et gaz atmosphériques. Zoom sur le continent européen  
*Thèse de doctorat du Laboratoire d'aérodologie de Toulouse. Présentée et soutenue publiquement le 19 novembre 2010*

COSNEFROY A.

Évaluation intégrée *in vitro* et *in vivo* des effets oestrogéniques de substances environnementales chez le poisson-zèbre  
*Thèse de doctorat du muséum d'Histoire naturelle de Paris. Présentée et soutenue publiquement le 9 décembre 2010*

VOSGES M.

Effets neuroendocrines des perturbateurs endocriniens chez le poisson zèbre (*Danio rerio*): Étude sur le système à GnRH  
*Thèse de doctorat de l'université François-Rabelais de Tours - INRA - CNRS. Présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2010*

LEGENDRÉ A.

La barrière hémato-testiculaire, élément clé pour l'étude de la toxicologie de la reproduction: développement d'un modèle *in vitro* et étude de sa mise en place chez le rat  
*Thèse de doctorat des universités de Paris VII et Paris XI. Présentée et soutenue publiquement le 17 décembre 2010*

VILLEGIER A.-S., GALLAGER B., HESTON J., BELLUZZI J.-D., LESLIE F.-M.

Age influences the effects of nicotine and monoamine oxidase inhibition on mood-related behaviors in rats  
*Psychopharmacology*, 2010, vol. 208, n° 4, pp. 593-601

VILLEGIER A. S., SALOMON L., GRANON S., CHAMPTIAUX N., CHANGEUX J.-P., TASSIN J.-P.

Alpha 7 and beta 2<sup>n</sup> nicotinic receptors control monoamine-mediated locomotor response  
*Neuroreport*, 2010, vol. 21, n° 17, pp. 1085-1089

AIT-AISSA S., LASKOWSKI S., LAVILLE N., PORCHER J.-M., BRION F.

Anti-androgenic activities of environmental pesticides in the MAD-kb2 reporter cell line  
*Toxicology in Vitro*, 2010, vol. 24, n° 7, pp. 1979-1985

VINCENT J.-M., VINCENT G., TISSOT S.

Méthodologie de choix de valeurs seuils de toxicité aiguë par inhalation pour la maîtrise de l'urbanisation  
*Environnement Risques et Santé*, 2010, vol. 9, n° 5, pp. 409-418

**DUCROT V., PERY A., LAGADIC L.**

Modelling effects of diquat under realistic exposure patterns in genetically differentiated populations of the gastropod *Lymnaea stagnalis*  
*Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2010, vol. 365, n° 1557, pp. 3485-3494

**MOMBELLI E., DEVILLERS J.**

Evaluation of the OECD QSAR Application Toolbox and Toxtree for predicting and profiling the carcinogenic potential of chemicals  
*Sar and Qsar in Environmental Research*, 2010, vol. 21, n° 7-8, pp. 731-752

**DEVILLERS J., MOMBELLI E.**

Evaluation of the OECD QSAR application toolbox and toxtree for estimating the mutagenicity of chemicals. Part 1. Aromatic amines  
*Sar and QSAR in Environmental Research*, 2010, vol. 21, n° 7-8, pp. 753-769

**DEVILLERS J., MOMBELLI E.**

Evaluation of the OECD QSAR application toolbox and toxtree for estimating the mutagenicity of chemicals. Part 2. unsaturated aliphatic aldehydes  
*Sar and QSAR in Environmental Research*, 2010, vol. 21, n° 7-8, pp. 771-783

**CABOCHE J., JONDREVILLE C., TACK K.,**

**DENYS S., RYCHEN G., FEIDT C.**  
Tissue distribution of antimony (Sb) in piglets orally given graded levels of Sb (V)  
*Toxicological and Environmental Chemistry*, 2009, vol. 91, n° 2, pp. 267-278

**WIDORY D., PETELET-GIRAUD E., LE BIHAN O.,**

**LE MOULLEC Y., QUETEL C., SNELL J., VAN BOCKSTAEL M., HURE A., CANARD E., JOOS E., FORTI L., BULLEN T., JOHNSON T., FIANI E.**  
Les métaux dans les particules atmosphériques: les isotopes peuvent-ils aider à discriminer les pôles d'émission potentiels?  
*Pollution atmosphérique*, 2010, n° spécial septembre, pp. 75-82

**MILINKOVITCH T., NDIAYE A., SANCHEZ W.,**

**LE FLOCH S., THOMAS-GUYON H.**  
Liver antioxidant and plasma immune responses in juvenile golden grey mullet (*Liza aurata*) exposed to dispersed crude oil  
*Aquatic Toxicology*, 2011, vol. 101, n° 1, pp. 155-164

**LEROUX C., MODELON H., ROUSSELLE C.,**

**ZDANEVITCH I., EVANNO S.**  
Évaluation des risques sanitaires et accidentels liés à l'injection de biogaz épuré dans un réseau de gaz naturel  
*Techniques Sciences et Méthodes*, 2010, n° 3, pp. 66-73

**HABKA D., PERY A., LEGALLAIS C., BROCHOT C.**

Prédiction de la toxicocinétique *in vivo* de substances chimiques à partir de données *in vitro* et de modèles QSAR  
*Environnement, Risques & Santé*, 2010, vol. 9, n° 6, pp. 489-501

**2011****HENEGAR A., MOMBELLI E., PANDARD P., PERY A.**

What can be learnt from an ecotoxicity database in the framework of the REACH regulation?  
*Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, n° 3, pp. 489-494

**ABOU CHAKRA O., ROGERIEUX F., PONCET P., SUTRA J.P., PELTRE G., SENECHAL H., LACROIX G.**

Ability of Pollen Cytoplasmic Granules to Induce Biased Allergic Responses in a Rat Model  
*International Archives of Allergy and Immunology*, 2011, vol. 154, n° 2, pp. 128-136

**GONZE D., ABOU-JAOUDE W., OUATTARA D. A., HALLOY J.**

How Molecular Should Your Molecular Model Be?: On the Level of Molecular Detail Required to Simulate Biological Networks in Systems and Synthetic Biology  
*JOHNSON M.L., BRAND L. (Eds.). Computer Methods, Part C. San Diego: Academic Press, Elsevier*, 2011, pp. 171-215. (*Methods in Enzymology*, vol. 487)

**BARILLET S., ADAM-GUILLERMIN C., PALLUEL O., PORCHER J.-M., DEVAUX A.**

Uranium bioaccumulation and biological disorders induced in zebrafish (*Danio rerio*) after a depleted uranium waterborne exposure  
*Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, n° 2, pp. 495-502

**BOIS F., JAMEI M., CLEWELL H. J.**

PBPK modelling of inter-individual variability in the pharmacokinetics of environmental chemicals  
*Toxicology*, 2010, vol. 278, n° 3, pp. 256-267

**VERSCHAEVE L., JUUTILAINEN J., LAGROYE I., MIYAKOSHI J., SAUNDERS R., DE SEZE R., TENFORDE T., VAN RONGEN E., VEYRET B., XU Z.**

*In vitro* and *in vivo* genotoxicity of radiofrequency fields  
*Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2010, vol. 705, n° 3, pp. 252-268

**RONGA-PEZERET S., PAYRE C., MANDIN C., BONVALLOT N., FIORI M., LAMBROZO J., GLORENNEC P.**

Consideration of the background chemical environment in French regulatory health risk assessments: Practices and guidelines  
*Environnement, Risques & Santé*, 2010, vol. 9, n° 6, pp. 517-526

**BAEZA-SQUIBAN A., LACROIX G., BOIS F. Y.**

Modèles expérimentaux en nanotoxicologie  
**LAHMANI M., MARANO F., HOUDY P. (Dir.).**  
*Les Nanosciences. Tome IV: Nanotoxicologie et nanoéthique*, Paris, Belin, 2010, pp. 98-120

**MANDIN C., LE BIHAN O., AGUERRE-CHARIOL O.**

Métrologie et expositions environnementales  
**LAHMANI M., MARANO F., HOUDY P. (Dir.).**  
*Les Nanosciences. Tome IV: Nanotoxicologie et nanoéthique*, Paris, Belin, 2010, pp. 230-239

**GARRIC J., THYBAUD E.**

Modèles de toxicologie environnementale  
**LAHMANI M., MARANO F., HOUDY P. (Dir.).**  
*Les Nanosciences. Tome IV: Nanotoxicologie et nanoéthique*, Paris, Belin, 2010, pp. 401-417

**HUBERT P.**

L'approche des nanoparticules dans le Grenelle de l'environnement  
**LAHMANI M., MARANO F., HOUDY P. (Dir.).**  
*Les Nanosciences. Tome IV: Nanotoxicologie et nanoéthique*, Paris, Belin, 2010, pp. 468-473

**BRIGNON J.-M.**

Nouveaux produits nanométriques: bénéfices et risques sociétaux  
**LAHMANI M., MARANO F., HOUDY P. (Dir.).**  
*Les Nanosciences. Tome IV: Nanotoxicologie et nanoéthique*, Paris, Belin, 2010, pp. 515-520

**HETTELINGH J.-P., POSCH M., SLOOTWEG J., LE GALL A.C.**

Analysis of environmental impacts caused by the baseline and maximum feasible reduction scenarios  
**SLOOTWEG J., POSCH M., HETTELINGH (Eds.).**  
*Progress in the modelling of critical thresholds and dynamic modelling, including impacts on vegetation in Europe: CCE status report 2010. Bilthoven, The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Coordination Centre for Effects (CCE)*, 2010, pp. 13-26. (Report 680359001/2011)

**LEVY M., LUCIANI N., ALLOYEAU D., ELGRABLI D., DEVEAUX V., PECHOUX C., CHAT S., WANG G., VATS N., GENDRON F., FACTOR C., LOTERSZTAJN S., LUCIANI A., WILHELM C., GAZEAU F.**

Long term *in vivo* biotransformation of iron oxide nanoparticles  
*Biomaterials*, 2011, vol. 32, n° 16, pp. 3988-3999

**ADLER S., BASKETTER D., CRETON S., PELKONEN O., VAN BENTHEM J., ZUANG V., EJNER ANDERSEN K., ANGERS-LOUSTAN A., APTULA A., BAL-PRICE A., BENFENATI E., BERNAUER U., BESSEMS J., BOIS F.-Y. et al.**

Alternative (non-animal) methods for cosmetics testing: current status and future prospects-2010  
*Archives of Toxicology*, 2011, vol. 85, n° 5, pp. 367-485

**VON DER OHE P.C., DULIO V., SLOBODNIK J., DE DECKERE E., KUHNE R., EBERT R. U., GINEBREDA A., DE COOMAN W., SCHUURMANN G., BRACK W.**

A new risk assessment approach for the prioritization of 500 classical and emerging organic microcontaminants as potential river basin specific pollutants under the European Water Framework Directive  
*Science of the Total Environment*, 2011, vol. 409, n° 11, pp. 2064-2077

**PETRIC I., PHILIPPOT L., ABBATE C., BISPO A., CHESNOT T., HALLIN S., LAVAL K., LEBEAU T., LEMANCEAU P., LEYVAL C., LINDSTROM K., PANDARD P., ROMERO E., SARR A., SCHLOTTER M., SMALLA K., WILKE B. M., MARTIN-LAURENT F.**

Inter-laboratory evaluation of the ISO standard 11063 "soil quality - method to directly extract DNA from soil samples"  
*Journal of Microbiological Methods*, 2011, vol. 84, n° 3, pp. 454-460

- DEVILLERS J., **MOMBELLI E.**, SAMSER A.  
Structural alerts for estimating the carcinogenicity of pesticides and biocides  
*Sar and Qsar in Environmental Research*, 2011, vol. 22, n° 1-2, pp. 89-106
- JAFFAL A., PARIS-PALACIOS S., **JOLLY S.**, THAILLY A.F., DELAHAUT L., BEALL E., ROCHE H., BIAGIANTI-RISBOURG S., BETOULLE S.  
Cadmium and copper contents in a freshwater fish species (brook trout, *Salvelinus fontinalis*) from the subantarctic Kerguelen Islands  
*Polar Biology*, 2011, vol. 34, n° 3, pp. 397-409
- R'MILI B.**, **DUTOUQUET C.**, SIRVEN J.B., **AGUERRE-CHARIOL O.**, **FREJAFON E.**  
Analysis of particle release using LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) and TEM (transmission electron microscopy) samplers when handling CNT (carbon nanotube) powders  
*Journal of Nanoparticle Research*, 2011, vol. 13, n° 2, pp. 563-577
- COLETTE A.**, **FAVEZ O.**, **MELEUX F.**, **CHIAPINI L.**, **HAEFFELIN M.**, **MORILLE Y.**, **MALHERBE L.**, **PAPIN A.**, **BESSAGNET B.**, **MENUT L.**, **LEOZ E.**, **ROUIL L.**  
Assessing in near real time the impact of the April 2010 Eyjafjallajökull ash plume on air quality  
*Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, n° 5, pp. 1217-1221
- CELLIER P.**, **LE GALL A.C.**  
National contribution to COST Action 729: France  
*BLEEKER A., ERISMAN J.W. (Eds.). Assessing and managing nitrogen fluxes in the atmosphere-biosphere system in Europe: COST Action 729 Final report. COST office*, 2011, pp. 109-118
- PROT J.-M.**, ANINAT C., GRISCOM L., RAZAN F., **BROCHOT C.**, GUGUEN GUILLOUZO C., LEGALLAIS C., CORLU A., LECLERC E.  
Improvement of HepG2/C3a cell functions in a microfluidic biochip  
*Biotechnology and Bioengineering*, 2011, vol. 108, n° 7, pp. 1704-1715
- PROT J.-M.**, **VIDEAU O.**, **BROCHOT C.**, LEGALLAIS C., **BENECH H.**, **LECLERC E.**  
A cocktail of metabolic probes demonstrates the relevance of primary human hepatocyte cultures in a microfluidic biochip for pharmaceutical drug screening  
*International Journal of Pharmaceutics*, 2011, vol. 408, n° 1-2, pp. 67-75
- CIFFROY P.**, **TANAKA T.**, **JOHANSSON E.**, **BROCHOT C.**  
Linking fate model in freshwater and PBPK model to assess human internal dosimetry of B(a)P associated with drinking water  
*Environmental Geochemistry and Health*. [Accepté pour publication]
- MASSARIN S., **BEAUDOUIN R.**, **ZEMAN F.**, FLORIANI M., GILBIN R., ALONZO F., **PERY A.**  
Biology-Based Modeling To Analyze Uranium Toxicity Data on *Daphnia magna* in a Multigeneration Study  
*Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 45, n° 9, pp. 4151-4158
- GALLOU G., SIRVEN J.B., **DUTOUQUET C.**, **LE BIHAN O.**, **FREJAFON E.**  
Aerosols analysis by LIBS for monitoring of air pollution by industrial sources  
*Aerosol Science and Technology*, 2011, vol. 45, n° 8, pp. 918-926
- AL FARAJ A., FAUVELLE F., LUCIANI N., **LACROIX G.**, CREMILLIEUX Y., CANET-SOULAS E.  
*In vivo* biodistribution and biological impact of injected carbon nanotubes using magnetic resonance techniques  
*International Journal of Nanomedicine*, 2011, vol. 6, pp. 351-361
- TAPIE N., DEVIER M.H., SOULIER C., **CREUSOT N.**, LE MENACH K., **AIT-AISSA S.**, VRANA B., BUDZINSKI H.  
Passive samplers for chemical substance monitoring and associated toxicity assessment in water  
*Water Science & Technology*, 2011, vol. 63, n° 10, pp. 2418-2425
- LEIP A., ACHERMANN B., BILLEN G., BLEEKER A., BOUWMAN A.F., DE VRIES W., DRAGOSITS U., DORING U., FERNALL D., GEUPEL M., HEROSLSTAB J., JOHNES P., **LE GALL A.-C.**, MONNI S., NEVECERAL R., ORLANDINI L., PRUD'HOMME M., REUTER H.I., SIMPSON D., SEUFERT G., SPRANGER T., SUTTON M.A., VAN AERDENNE J., VOB M., WINIWARTER W.  
Integrating nitrogen fluxes at the European scale  
*Sutton M. A., Howard C. M., Erisman J. W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Van Grinsven H., Grizzetti B. (Eds.). The European nitrogen assessment. Cambridge University Press*, 2011, pp. 345-376
- TODOROV M., **MOMBELLI E.**, **AIT-AISSA S.**, MEKENYAN O.  
Androgen receptor binding affinity: a QSAR evaluation  
*SAR and QSAR in Environmental Research*, 2011, vol. 22, n° 3-4, pp. 265-291
- SPARFEL L., PINEL-MARIE M.-L., BOIZE M., KOSCIELNY S., **DESMOTS S.**, **PERY A.**, FARDEL O.  
Intérêt potentiel de cibles géniques des hydrocarbures aromatiques polycycliques en tant que biomarqueurs d'exposition  
*Environnement, Risques & Santé*, 2011, vol. 10, n° 3, pp. 195-199
- CAUDEVILLE J.**, **BOUDET C.**, GOVAERT G., **BONNARD R.**, **DENYS S.**, **CICOLELLA A.**  
Construction d'une plateforme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques de l'environnement  
*Environnement, Risques & Santé*, 2011, vol. 10, n° 3, pp. 239-242
- GEISS S., LETTMANN N., REY A., LEPPER H., KORNER B., MAIS S., PREY T., HILGER B., ENGELKE M., LEBERTZ S., **CHATELLIER C.**, SAWAL G., LOFFLER D., SCHLLINGS T.  
Preliminary Interlaboratory Trial for ISO/DIS 12010: Determination of Short Chain Polychlorinated Alkanes (SCCP) in Water  
*CLEAN – Soil Air Water*, 2011, vol. 39, n° 6, pp. 537-542
- ROMARY T., DE FOUQUET C., **MALHERBE L.**  
Sampling design for air quality measurement surveys: An optimization approach  
*Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, n° 21, pp. 3613-3620
- NALBONE G., **CICOLELLA A.**, LAOT-CABON S.  
L'exposition humaine au bisphénol A: un facteur de risque environnemental des maladies métaboliques et cardiovasculaires  
*Médecine & Longévité*, 2011, vol. 3, n° 1, pp. 42-51
- DE FOUQUET C., **MALHERBE L.**, **UNGA A.**  
Geostatistical analysis of the temporal variability of ozone concentrations. Comparison between CHIMERE model and surface observations  
*Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, n° 20, pp. 3434-3446
- TEBBY C.**, **MOMBELLI E.**, **PANDARD P.**, **PERY A.**  
Exploring an ecotoxicity database with the OECD QSAR Toolbox and DRAGON descriptors in order to prioritise testing on algae, daphnids, and fish  
*Science of The Total Environment*, 2011, vol. 409, n° 18, pp. 3334-3343
- BOYNARD A., BEEKMANN M., FORET G., **UNGA A.**, SZOPA S., SCHMECHTIG C., COMAN A.  
An ensemble assessment of regional ozone model uncertainty with an explicit error representation  
*Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, n° 3, pp. 784-793

## Risques accidentels

### 2010

**MARLAIR G., VIGNES A., JANES A., BERTRAND J.-P., TRIBOUILLOY B., EYNAUD N.**  
On the fire and explosion risk profile of alternative fuels to kerosene in civil transportation aircrafts  
*Proceedings of the 12<sup>th</sup> international conference Interflam, 5-7 July 2010, Nottingham, UK.*  
London: Interscience communications, 2010, vol. 2, pp. 1151-1162

**CHIVAS-JOLY C., GUILLAUME E., DUCOURTIEUX S., SARAGOZA L., LESENECHAL D., LOPEZ-CUESTA J.M., LONGUET C., SONNIER R., DUPLANTIER S., BERTRAND J.-P., CALOGINE D., MINISINI B., PARISSÉ D.**  
Influence of carbon nanotubes on fire behavior and on decomposition products of thermoplastic polymers  
*Proceedings of the 12<sup>th</sup> international conference Interflam, 5-7 July 2010, Nottingham, UK.*  
London: Interscience communications, 2010, vol. 2, pp. 1375-1386

**LENOBLE C., ANTOINE F., BOLVIN C., KOOI E.S., UIJT DE HAAG P.A.M.**  
Benchmark study for a flammable liquid depot – A comparison of two risk analyses  
*Ale B.J.M., Papazoglou I.A., Zio E. (Eds.). Reliability, Risk and safety: Back to the future: Proceedings of the annual conference ESREL 2010, 5-9 September 2010, Rhodes, Greece.*  
London: Taylor & Francis, 2010, pp. 266-271

**PLOT E., CAMUS F., KONSTANDINIDIOU M., NIVOLIANITOU Z., MONFERINI A., LEVA C., KAFKA P., KONTOGIANNIS T., NAAR M., MOKRI M., AINES A., BEHILIL L.**  
Safety organization resilience based on frontline teams: added value of virtual reality technologies – Virtualis Project  
*Ale B.J.M., Papazoglou I.A., Zio E. (Eds.). Reliability, Risk and safety: Back to the future: Proceedings of the annual conference ESREL 2010, 5-9 September 2010, Rhodes, Greece.*  
London: Taylor & Francis, 2010, pp. 1812-1819

**BRISSAUD F., SMIDTS C., BARROS A., BERENQUER C.**  
Dynamic reliability modeling of cooperating digital-based systems  
*Ale B.J.M., Papazoglou I.A., Zio E. (Eds.). Reliability, Risk and safety: Back to the future: Proceedings of the annual conference ESREL 2010, 5-9 September 2010, Rhodes, Greece.*  
London: Taylor & Francis, 2010, pp. 1051-1060

**ADJADJ A., DE DIANOUS V., DOLLADILLE O., PRODHOMME G., REIMERINGER M.**  
Control of ageing of industrial facilities: comparison of the policies in France and in 4 foreign countries  
*Ale B.J.M., Papazoglou I.A., ZIO E. (Eds.). Reliability, Risk and safety: Back to the future: Proceedings of the annual conference ESREL 2010, 5-9 September 2010, Rhodes, Greece.*  
London: Taylor & Francis, 2010, pp. 1254-1260

**PALTRINIERI N., COZZANI V., WARDMAN M., DECHY N., SALZANO E.**  
Atypical major hazard scenarios and their inclusion in risk analysis and safety assessments  
*Ale B.J.M., Papazoglou I.A., Zio E. (Eds.). Reliability, Risk and safety: Back to the future: Proceedings of the annual conference ESREL 2010, 5-9 September 2010, Rhodes, Greece.*  
London: Taylor & Francis, 2010, pp. 588-595

**BOUILLARD J., VIGNES A., DUFAUD O., PERRIN L., THOMAS D.**  
Ignition and explosion risks of nanopowders  
*Journal of Hazardous Materials, 2010, vol. 181, n° 1-3, pp. 873-880*

**DAUBECH J., SOCHET I., PROUST C.**  
Highlights of the flame acceleration in a confined nonuniform H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixture  
*Process Safety Progress, 2010, vol. 29, n° 3, pp. 224-230*

**GUODONG L., DAN S., HUILIN L., BOUILLARD J., YINGHUA B., SHUAI W.**  
Computations of Fluid Dynamics of a 50 MWe Circulating Fluidized Bed Combustor  
*Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, vol. 49, n° 11, pp. 5132-5140*

**ROUSSEAU A., GRUET P.**  
Surge protective devices selection for true installations  
*Proceedings of the 30<sup>th</sup> International conference on lightning protection, 13-17 September 2010, Cagliari, Italy*

**DUBOIS J.**  
Étude expérimentale de jets libres, compressibles ou en présence d'un obstacle  
*Thèse 2010*

**MERAD M., DECHY N., MARCEL F.**  
La gestion du changement par la concertation: exemple de la mise en place d'un plan développement durable  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**ADJADJ A., DE DIANOUS V., DOLLADILLE P., PRODHOMME G., REIMERINGER M.**  
Maîtrise du vieillissement des installations industrielles: comparaison des politiques en France et dans quatre pays étrangers  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**LE COZE J.-C., PERINET R.**  
Culture sécurité, du débat scientifique à l'expérience de régulation norvégienne  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**BRISSAUD F., CHARPENTIER D., BARROS A., BERENQUER C.**  
Fiabilité des capteurs-transmetteurs intégrant des fonctionnalités numériques  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**PERINET R., VU T. N.**  
Évaluer la fiabilité humaine: quelle(s) méthode(s) choisir?  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**DECHY N., DIEN Y., LLOYM M.**  
Pour une culture des accidents au service de la sécurité industrielle  
*Actes du 17<sup>e</sup> Congrès de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement (Lambda Mu 17), 5 octobre 2010, La Rochelle*

**ABOU ASSALI A.**  
Apport de l'ingénierie des connaissances et des ontologies à la sécurité industrielle  
*Thèse de doctorat de l'Université de technologie de Compiègne. Présentée et soutenue publiquement le 18 janvier 2010*

**FAYET G.**  
Développement de modèles QSPR pour la prédiction des propriétés d'explosibilité des composés nitroaromatiques  
*Thèse de doctorat de l'UMPC – Chimie Paristech. Présentée et soutenue publiquement le 30 mars 2010*

**LEROUX M.-H.**  
Optimisation des choix logistiques pour la maîtrise des risques liés aux produits dangereux: méthodes et outils d'aide à la décision  
*Thèse de doctorat de l'École polytechnique de Montréal. Présentée et soutenue publiquement le 1<sup>er</sup> avril 2010*

**MERLE I.**  
La maîtrise des risques d'accidents majeurs dans les établissements industriels visés par la Directive SEVESO II – Définition, application et évaluation des politiques de prévention  
*Thèse de doctorat de l'Institut d'Études Politiques de Paris. Présentée et soutenue publiquement le 16 juin 2010*

**CAPO S.**  
Rôle de l'expérience dans la prévention des accidents industriels majeurs: analyse ergonomique d'une installation à hauts risques  
*Thèse de doctorat de l'Université René-Descartes. Présentée et soutenue publiquement le 13 octobre 2010*

**CAMUS F.**  
Conception d'environnements virtuels dédiés à la maîtrise des risques: l'approche MELISSA  
*Thèse de doctorat de l'Université de technologie de Compiègne – HEUDYASIC. Présentée et soutenue publiquement le 15 octobre 2010*

**BRISSAUD F.**  
Contribution à la modélisation et à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes de sécurité à fonctionnalités numériques  
*Thèse de doctorat de l'Université de technologie de Troyes. Présentée et soutenue publiquement le 2 novembre 2010*

**BRANKA R., MARLAIR G., NEDELEC B.**

Risk analysis of fireworks transport in cargo container ships  
*Contestabile E., Von Rosen B., Von Oertzen A., Tamura M., Schneider R. L. (Eds.). Proceedings of the 12<sup>th</sup> International symposium on fireworks, 11-15 October 2010, Porto, Portugal. International symposium on fireworks Society, 2010, pp. 21-36*

**FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.**

Predicting explosibility properties of chemicals from quantitative structure-property relationships  
*Process Safety Progress, 2010, vol. 29, n° 4, pp. 359-371 (Conference proceedings of the 2009 AIChE spring national meeting & 5<sup>th</sup> global congress on process safety – 43<sup>rd</sup> Loss prevention symposium, 26-30 April 2009, Tampa, USA)*

**JANES A., CHAINEAUX J.**

Explosion de poussières dans les lieux de travail : recensement et analyse  
*Cahiers de notes documentaires – Hygiène et sécurité du travail, 2010, n° 220, pp. 3-11*

**MERAD M.**

Aide à la décision et expertise en gestion des risques  
*Collection sciences du risque et du danger, série Références, Paris, Lavoisier, 2010, 268 p.*

**BRISSAUD F.**

Handling parameter and model uncertainties by continuous gates in fault tree analyses  
*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2010, vol. 224, n° 4, pp. 253-265*

**MERAD M., DECHY N.**

Risk governance for sustainable territories: the french case and some challenges/La governança del risc per obtenir territoris sostenibles: la metodologia francesa i alguns reptes  
*Revista catalina de seguretat pública, 2010, n° 23, pp. 53-79*

**BENSELAMA A.M., MARNE J.-P., MONNOYER F., PROUST C.**

A numerical study of the evolution of the blast wave shape in tunnels  
*Journal of Hazardous Materials, 2010, vol. 181, n° 1-3, pp. 609-616*

**BOUILLARD J., VIGNES A., DUFAUD O., PERRIN L., THOMAS D.**

Explosion risks from nanomaterials  
*Journal of Physics: Conference Series, 2009, vol. 170, n° 1, art. 012032*

**CALOGINE D., DUPLANTIER S., CHIVAS C., GUILLAUME E., LOPEZ-CUESTA J.-M., LONGUET C., MINISINI B., GENSOUS F., CHESNE L.**

The NANOFFEU project: objectives and tools  
*Journal of Physics: Conference Series, 2009, vol. 170, n° 1, art. 012034*

**2011****BRISSAUD F., BARROS A., BERENQUER C., CHARPENTIER D.**

Reliability analysis for new technology-based transmitters  
*Reliability Engineering and System Safety, 2011, vol. 96, n° 2, pp. 299-313*

**PROUST C., LEPRETTE E.**

The dynamics of vented gas explosions  
*Process Safety Progress, 2010, vol. 29, n° 3, pp. 231-235*

**BRISSAUD F., BARROS A., BERENQUER C., CHARPENTIER D.**

Capteurs intelligents: nouvelles technologies et nouvelles problématiques pour la sûreté de fonctionnement

*Kahn P., Lannoy A., Person-Silhol D., Vasseur D. (Coord.). Anticipation, innovation, perception: des défis pour la maîtrise des risques à l'horizon 2020. Lavoisier, 2010, chapitre 5*

**ABOU ASSALI A., LENNE D., DEBRAY B.**

Heterogeneity in ontological CBR systems  
*MONTANI S., JAIN L.C. (Eds.). Successful case-based reasoning applications – 1. Berlin: Springer, 2010, pp. 97-116. (Studies in computational intelligence, vol. 305)*

**BENAÏSSA W., CARSON D.**

Comparison of the results from six calorimeters in the determination of the thermokinetics of a model reaction  
*Conference proceedings of the 2011 AIChE spring meeting & 7<sup>th</sup> Global congress on process safety, 13-16 March 2011, Chicago, USA*

**BENAÏSSA W., CARSON D.**

Oxidation properties of "Solar Salt"  
*Conference proceedings of the 2011 AIChE spring meeting & 7<sup>th</sup> Global congress on process safety, 13-16 March 2011, Chicago, USA*

**JANES A., CHAINEAUX J., CARSON D., BENAÏSSA W.**

Experimental study of ignition of bulk storage by hot points  
*Conference proceedings of the 2011 AIChE spring meeting & 7<sup>th</sup> Global congress on process safety, 13-16 March 2011, Chicago, USA*

**JANES A., CHAINEAUX J., MARLAIR G., CARSON D., BENAÏSSA W., TRIBOUILLOY B.**

Experimental study of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures flammability  
*Conference proceedings of the 2011 AIChE spring meeting & 7<sup>th</sup> Global congress on process safety, 13-16 March 2011, Chicago, USA*

**PAGNON S., BONY-DANDRIEUX A., TIXIER J., DUSSERRE G., DEBRAY B., FONTAINE F.**

Sensitivity analysis of atmospheric dispersion modeling in emergency situation  
*Conference proceedings of the 2011 AIChE spring meeting & 7<sup>th</sup> Global congress on process safety, 13-16 March 2011, Chicago, USA*

**PROUST C., JAMOIS D., STUDER E.**

High pressure hydrogen fires  
*International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, n° 3, pp. 2367-2373*

VENETSANOS A. G., ADMAS P., AZKARATE I., BENGOUER A., BRETT L., CARCASSI M. N., ENGEBO A., GALLEGOS E., GAVRIKOV A. I., HANSEN O. R., HAWKSWORTH S., JORDAN T., KESSLER A., KUMAR S., MOLKOV V., NILSEN S., REINECKE E., STOCKLIN M., SCHMIDTCHEN U., TEODORCZYK A., TIGREAT D., VERSLOOT N. H. A.  
 On the use of hydrogen in confined spaces: Results from the internal project InsHyde  
*International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, n° 3, pp. 2693-2699*

REINECKE E. A., HUEBERT T., TKATSCHENKO L., KESSLER A., KUZNETSOV M., WILKINS B. A., HEDLEY D., AZKARATE I., PROUST C., ACOSTA-IBORRA B., GAVRIKOV A., VERSLOOT N., MARANGON A., TEODORCZYK A., GRAFWALLNER F.

Integration of experimental facilities: A joint effort for establishing a common knowledge base in experimental work on hydrogen safety  
*International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, n° 3, pp. 2700-2710*

BRENNAN S., BENGOUER A., CARCASSI M., CERCHIARA G., EVANS G., FRIEDRICH A., GENTILHOMME O., HOUF W., KOTCHOURKO N., KUDRIAKOV S., MAKAROV D., MOLKOV V., PAPANIKOLAOU E., PITRE C., ROYLE M., SCHEFER R., STERN G., VENETSANOS A., VESER A., WILLOUGHBY D., YANEZ J.

Hydrogen and fuel cell stationary applications: Key findings of modelling and experimental work in the HYPER project  
*International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, n° 3, pp. 2711-2720*

**FOUILLEN F., DUPLANTER S.**

Pressurization of Fixed Roof Storage Tanks Due to External Fires  
*Process Safety Progress, 2011, vol. 30, n° 1, pp. 52-61*

**FAYET G., ROTUREAU P., ADAMO C.**

Prediction of the physico-chemical properties of nitroaromatic compounds using QSPR models  
*Pachman J., Selesovsky J., Matyas R. (Eds.). Proceedings of the 14<sup>th</sup> Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials Part II (NTREM), 13-15 April 2011, Pardubice, Czech Republic. University of Pardubice, 2011, pp. 616-622*

**PRANA V., FAYET G., ROTUREAU P., ADAMO C.**

Prediction of impact sensitivity of nitro energetic compounds using QSPR approaches  
*Pachman J., Selesovsky J., Matyas R. (Eds.). Proceedings of the 14<sup>th</sup> Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials Part I (NTREM), 13-15 April 2011, Pardubice, Czech Republic. University of Pardubice, 2011, pp. 305-315*

**FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.**

Development of QSPR models on thermal stability of nitroaromatic compounds considering their decomposition mechanisms  
*Journal of Molecular Modeling [accepté pour publication]*

**LENOBLE C., DURAND C.**

Introduction of frequency in France following the AZF accident  
*Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, vol. 24, n° 3, pp. 227-236*

## Risques du sol et du sous-sol

**JANES A., MALET F., HERRENSCHMIDT-MUNOZ V.**  
Risks generated by the treatment of aerosol in the recycling of metals: How to secure the process?  
*Proceedings of the Third International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE 2011) & SECOTOX Conference, 19-24 June 2011, Skiathos, Greece*

**BRISSAUD F., SMIDTS C., BARROS A., BERENQUER C.**  
Dynamic reliability of digital-based transmitters  
*Reliability Engineering and System Safety, 2011, vol. 96, n° 7, pp. 793-813*

**LACOME J.-M., JAMOIS D., PERRETTE L. PROUST C.**  
Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area  
*International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, n° 3, pp. 2302-2312*

**VECHOT L., MINKO W., BIGOT J.-P., KAZMIERCZAK M., VICOT P.**  
Vent sizing: Analysis of the blowdown of a hybrid non tempered system  
*Journal of Hazardous Materials, 2011, vol. 191, n° 1-3, pp. 8-18*

### 2010

**GELIS C., CABRERA J., BARNICHON J.-D., CONTRUCCI I., COTE P., LEPAROUX D., MAGNIN O.**  
Caractérisation de l'EDZ par méthodes sismiques et ultrasoniques  
*Infrastructures, développement durable, et énergies: actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble. Grenoble: Grenoble-INP, 2010, tome II, pp. 811-818*

**MAISON T., LAOUAFA F., FLEUREAU J.-M., DELALAIN P.**  
Analyse au niveau microscopique du comportement hydrique d'agrégats argileux  
*Infrastructures, développement durable, et énergies: actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble. Grenoble: Grenoble-INP, 2010, tome I, pp. 295-302*

**HOR B., EMERIAULT F., CAUDRON M., AL HEIB M.**  
Analyse expérimentale de l'impact de mouvements de terrain sur le bâti de surface  
*Infrastructures, développement durable, et énergies: actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble. Grenoble: Grenoble-INP, 2010, tome I, pp. 263-270*

**DAUPLEY X., FABRIOL R., CONTRUCCI I., BERNARDIE S., CAO N.T., LEBERT F., CAUVIN L., JOUSSET P., KLEIN E., BAZARGAN B.**  
Suivi expérimental multi-paramètres de l'effondrement d'une cavité saline: site de Cerville-Buissoncourt  
*Infrastructures, développement durable, et énergies: actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble. Grenoble: Grenoble-INP, 2010, tome I, pp. 411-418*

**RENAUD V., MOREL J.**  
Calculs 3D prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs HAVL  
*Infrastructures, développement durable, et énergies: actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble. Grenoble: Grenoble-INP, 2010, tome II, pp. 883-890*

**SEMBLAT J.-F., LOKMANE N., DRIAD-LEBEAU L., BONNET G.**  
Local amplification of deep mining induced vibrations. part.2: Simulation of ground motion in a coal basin  
*Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, vol. 30, n° 10, pp. 947-957*

**LE GAL N., LAGNEAU V., CHARMOILLE A.**  
Mechanisms of gas migration in flooding post-mining context  
*Wolkersdorfer C., Freund A. (Eds.). Proceedings of the International Mine Water Association symposium "Mine water & innovative thinking" (IMWA 2010), 5-9 September 2010, Sydney, Canada, pp. 483-486*

**MAISON T., LAOUAFA F., FLEUREAU J.-M.**  
Volume changes of swelling clayey soils at microscopic scale level  
*ALONSO E., GENS A. (Eds.). Unsaturated soils: Proceedings of the 5th international conference on unsaturated soils (UNSAT 2010), 6-8 September 2010, Barcelona, Spain. London: Taylor & Francis, 2011, pp. 161-166*

**POKRYSZKA Z., CHARMOILLE A., BENTIVEGNA G.**  
Development of methods for gaseous phase geochemical monitoring on the surface and in the intermediate overburden strata of geological CO<sub>2</sub> storage sites  
*Oil & Gas science and Technology, 2010, vol. 65, n° 4, pp. 653-666*

**GAL F., LE PIERRES K., BRACH M., BRAIBANT G., BENY C., BATTANI A., TOCQUE E., BENOIT Y., JEANDEL E., POKRYSZKA Z., CHARMOILLE A., BENTIVEGNA G., PIRONON J., DE DONATO P., GARNIER C., CAILTEAU C., BARRES O., RADILLA G., BAUER A.**  
Surface gas geochemistry above the natural CO<sub>2</sub> reservoir of Montmiral (Drome, France), source tracking and gas exchange between the soil, biosphere and atmosphere  
*Oil & Gas science and Technology, 2010, vol. 65, n° 4, pp. 635-652*

**BATTANI A., DEVILLE E., FAURE J.-L., JEANDEL E., NOIREZ S., TOCQUE E., BENOIT Y., SCHMITZ J., PARLOUAR D., SARDA P., GAL F., LE PIERRES K., BRACH M., BRAIBANT G., BENY C., POKRYSZKA Z., CHARMOILLE A., BENTIVEGNA G., PIRONON J., DE DONATO P., GARNIER C., CAILTEAU C., BARRES O., RADILLA G., BAUER A.**  
Geochemical study of natural CO<sub>2</sub> emissions in the french massif central: how to predict origin, processes and evolution of CO<sub>2</sub> leakage  
*Oil & Gas science and Technology, 2010, vol. 65, n° 4, pp. 615-633*

**FABRIOL H., BECQUEY M., HUGUET F., LESCANNE M., MOURONVAL G., PIRONON J., POKRYSZKA Z., VU-HOANG D.**  
The Geocarbone-Monitoring Project: main results and recommendations for monitoring deep geological CO<sub>2</sub> storage in the Paris Basin  
*Oil & Gas science and Technology, 2010, vol. 65, n° 4, pp. 581-587*

**CAO N.T., KLEIN E., CONTRUCCI I., DAUPLEY X., BIGARRE P.**  
Large-scale salt cavern collapse: multi-parameter monitoring from precursor signs to general failure  
*Zhao J., Labiouse V., Dudt J.-P., Mathier J.-F. (Eds.). Rock mechanics in civil and environmental engineering: Proceedings of Eurock 2010, 15-18 September 2010, Lausanne, Switzerland. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 709-712*

**NADIM C.E., BIGARRE P., LAHAIE F.**  
Monitoring of ground failures in subsurface complex cavities  
*Zhao J., Labiouse V., Dudt J.-P., Mathier J.-F. (Eds.). Rock mechanics in civil and environmental engineering: Proceedings of Eurock 2010, 15-18 September 2010, Lausanne, Switzerland. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 705-708*

**BEN OUANAS A., GUNZBURGER Y., LAHAIE F., PIGUET J.P., BARNICHON J.D.**

Mechanical testing of hollow cores to determine elastic parameters of anisotropic rocks using the CSIRO HI cell  
*Zhao J., Labiouse V., Dudt J.-P., Mathier J.-F. (Eds.). Rock mechanics in civil and environmental engineering: Proceedings of Eurock 2010, 15-18 September 2010, Lausanne, Switzerland. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 103-106*

**DIDIER C.**

Impact of climate change on the stability of underground shallow cavities. The case of a tragedy in France in relation with the Seine flooding in 1910  
*Proceedings of the ISRM International Symposium 2010, 23-27 October 2010, New Delhi, India*

**BEN OUANAS A.**

Interprétation de mesures de déformation en forage en terrain anisotrope: retour d'expérience de l'utilisation de cellules CSIRO dans l'argilite de Tournemire (Aveyron)  
*Thèse de doctorat de l'INPL Nancy. Présentée et soutenue publiquement le 26 novembre 2010*

**DIDIER C., VAN DER MERWE N.**

Analyse en retour d'expérience de deux effondrements miniers dans des mines de Coalbrook (Afrique du Sud) et de Gardanne (France)  
*Revue Française de Géotechnique, 2010, n° 131-132, pp. 119-135*

**RENAUD V., MOREL J.**

Calculs 3D prédictifs pour la conception d'alvéoles de stockage de déchets radioactifs HAVL = 3D predictive calculation for the design of highly-active radioactive waste storage cells  
*Tunnels et Espace souterrain, 2010, n° 221, pp. 383-390*

**CAUDRON M., HOR B., EMERIAULT F., AL HEIB M.**

A large 3D physical model: a tool to investigate the consequences of ground movements on the surface structures  
*BREMAND F. (Ed.). EPJ Web of conferences: Book of abstracts of the 14<sup>th</sup> International conference on experimental mechanics (ICEM14), 4-9 July 2010, Poitiers. EDP Sciences, 2010, art. 22001*

## 2011

**NICOT F., DAOUADJI A., LAOUAFA F., DARVE F.**

Second-order work, kinetic energy and diffuse failure in granular materials  
*Granular Matter, 2011, vol. 13, n° 1, pp. 19-28*

**AL HEIB M., DIDIER C., MASROURI F.**

Improving short- and long-term stability of underground gypsum mine using partial and total backfill  
*Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, vol. 43, n° 4, pp. 447-461*

**LAOUAFA F., PRUNIER F., DAOUADJI A., AL GALI H., DARVE F.**

Stability in geomechanics, experimental and numerical analyses  
*International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, vol. 35, n° 2, pp. 112-139*

**PRUNIER F., LIGNON S., LAOUAFA F., DARVE F.**

Modélisation de glissements de terrains par un critère d'instabilité matérielle  
*Hicher P.-Y., Flavigny E. (Dir.). Du sol à l'ouvrage: une vision multi-échelles de la géomécanique. Paris: Lavoisier, 2010, pp. 251-275*

**RENAUD V., BALLAND C., VERDEL T.**

Numerical simulation and development of data inversion in borehole ultrasonic imaging  
*Journal of Applied Geophysics, 2011, vol. 73, n° 4, pp. 357-367*

**DAOUADJI A., DARVE F., AL GALI H., HICHER P.-Y., LAOUAFA F., LIGNON S., NICOT F., NOVA R., PINHEIRO M., PRUNIER F., SIBILLE L., WAN R.**

Diffuse failure in geomaterials: Experiments, theory and modelling  
*International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. [Accepté pour publication]*

**CONTRUCCI I., KLEIN E., CAO N. T., DAUPLY X., BIGARRE P.**

Multi-parameter monitoring of a solution mining cavity collapse: first insight of precursors  
*Comptes-rendus Géosciences, 2011, vol. 343, n° 1, pp. 1-10*

**PERY A., BROCHOT C., DESMOTS S., BOIZE M., SPARFEL L., FARDELO.**

Predicting *in vivo* gene expression in macrophages after exposure to benzo(a)pyrene based on *in vitro* assays and toxicokinetic/toxicodynamic models  
*Toxicology Letters, 2011, vol. 201, n° 1, pp. 8-14*

**KLEIN E., LOMAX A., LIZEUR A., KLINGELHOEFER F., CONTRUCCI I., BIGARRE P.**

3D acoustic and microseismic location of collapse events in complex, 3D geological structures  
*Proceedings of the 73<sup>rd</sup> EAGE conference, 23-26 May 2011, Vienna, Austria*

**KLEIN E., CONTRUCCI I., CAO N.T., BIGARRE P.**

Mining induced seismicity: monitoring of a large scale salt cavern collapse  
*Proceedings of the 73<sup>rd</sup> EAGE conference, 23-26 May 2011, Vienna, Austria*

**DIDIER C., SALMON R.**

Un modèle de calcul des hauteurs prévisibles de remontée de fontis à l'aplomb d'exploitations souterraines peu profondes  
*Revue Française de Géotechnique, 2010, n° 133, pp. 21-36*

**MERRIEN-SOUKATCHOFF V., KORINI T., THORVAL A.**

Use of an Integrated Discrete Fracture Network Code for Stochastic Stability Analyses of Fractured Rock Masses  
*Rock Mechanics and Rock Engineering. [Accepté pour publication]*

**LAFORTUNE S., POKRYSZKA Z., BENTIVEGNA G., CHADUTEAU C., AGRINIER P.**

First steps in coupling continuous carbon isotopic measurements with already proven subsurface gas monitoring methods above underground carbon dioxide storage sites  
*Energy Procedia, 2011, vol. 4, pp. 3526-3533*

**FARRET R., GOMBERT P., LAHAIE F., CHERKAOUI A., LAFORTUNE S., ROUX P.**

Design of fault trees as a practical method for risk analysis of CCS: Application to the different life stages of deep aquifer storage, combining long-term and short-term issues  
*Energy Procedia, 2011, vol. 4, pp. 4193-4198*

**GAUCHER E.C., DEFOSSEZ P.D.C., BIZI M., BONIJOLY D., DISNAR J.R., LAGGOUN-DEFARGE F., GARNIER C., FINQUENEISEL G., ZIMNY T., GRGIC D., POKRYSZKA Z., LAFORTUNE S., VIDAL GILBERT S.**

Coal laboratory characterisation for CO<sub>2</sub> geological storage  
*Energy Procedia, 2011, vol. 4, pp. 3147-3154*

**DE DONATO P., PIRONON J., STERPENICH J., LAURENT A., PIEDEVACHE M., POKRYSZKA Z., QUISEL N., BARRES O., THOMAS S., RAMPNOUX N.**

CO<sub>2</sub> flow baseline: Key factors of the geochemical monitoring program of future CO<sub>2</sub> storage at Claye-Souilly (Paris Bassin)  
*Energy Procedia, 2011, vol. 4, pp. 3147-3154*



