

A close-up, high-angle photograph of industrial machinery, likely a chemical reactor or distillation column. The image shows various metal components, pipes, and flanges, with a prominent circular view window in the foreground. The lighting is bright, creating strong highlights and shadows on the metallic surfaces.

# **RAPPORT SCIENTIFIQUE**

*2011/2012*

**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques  
Parc Technologique Alata - BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte  
Tél. : +33(0)3 44 55 66 77 – Fax : +33(0)3 44 55 66 99  
E-mail : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) – Internet : [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr)



## 2 INTRODUCTION

- 4 L'INERIS, acteur majeur de la qualité de l'air en Europe
- 6 Les partenariats de recherche à l'INERIS



## 8 NOUVELLES TECHNOLOGIES

### LIQUIDES IONIQUES

- 10 Prédiction et mesure de la chaleur de combustion

### NANOTECHNOLOGIES

- 14 **Focus** Détection des nanoparticules manufacturées sur les places de travail

### BIOGAZ

- 15 Perspectives européennes sur la sécurité : transition vers le programme Horizon 2020
- 18 Composition du biogaz issu de la méthanisation et des émissions de moteurs de valorisation

### BATTERIES LITHIUM-ION

- 21 Accompagnement à la maîtrise des risques accidentels associés aux applications innovantes

### HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS

- 24 Gestion des risques environnementaux liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche mère



## 26 SUBSTANCES CHIMIQUES

### BISPHÉNOL A ET PHTALATES

- 28 Contamination des prélèvements et exposition à l'hôpital

### RETARDATEURS DE FLAMME BROMÉS

- 30 Estimation de l'exposition dans un immeuble de bureaux. Couplage de mesures dans le sang, dans l'air et dans les poussières des bureaux

### MÉTHODES ALTERNATIVES ET OUTILS

- 32 Prédiction des propriétés physico-chimiques dangereuses des substances chimiques. Vers l'application des modèles QSPR dans un contexte réglementaire
- 35 **Focus** Prédiction des effets chroniques des substances chimiques sur la daphnie
- 36 Les effets du clotrimazole sur la stéroïdogénèse testiculaire chez le poisson zèbre
- 39 **Focus** Hydrocarbures polycycliques aromatiques: exposition, implication des macrophages humains



## 40 SITES ET TERRITOIRES

### RISQUES INDUSTRIELS

- 42 Risques technologiques majeurs et signaux faibles
- 44 Vulnérabilité des réservoirs aux explosions et aux impacts

### RISQUES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

- 46 **Focus** Inégalités environnementales : intégration des données socio-économiques
- 47 Évolution de la qualité de l'air en Europe sur dix ans. Première évaluation multimodèle
- 50 **Focus** Micro-organismes : modélisation du transport atmosphérique des aérosols biologiques couplée avec un modèle de survie
- 51 Bioanalyse des perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques
- 54 **Focus** Accompagner le développement des phytotechnologies
- 55 Utilisation des biomarqueurs pour la surveillance des rejets industriels. Cas des effluents de l'industrie pharmaceutique

### RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

- 57 Géochimie du stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Outils d'études des risques de remobilisation des métaux lourds
- 60 Évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié aux processus naturels de dissolution des roches
- 63 Évaluation de la résistance à long terme des piliers des mines de fer du bassin lorrain



## 66 ANNEXES

- 67 Programmes 190
- 68 L'INERIS, partenaire de 45 programmes européens
- 70 Programmes de recherche soutenus par l'ANR
- 71 Autres programmes
- 72 Sujets de thèses sélectionnés en 2012
- 73 Gouvernance scientifique
- 76 Les indicateurs du contrat d'objectifs 2011-2015
- 77 Publications



## EXCELLENCE SCIENTIFIQUE ET UTILITÉ SOCIALE

— L'INERIS développe une activité de recherche résolument appliquée, qui s'appuie sur des partenariats forts, levier indispensable à la réussite de sa mission au service de l'innovation. L'innovation et des sauts technologiques sont essentiels pour faire face aux défis climatiques et énergétiques. La feuille de route pour la transition écologique, issue de la Conférence environnementale qui s'est tenue les 14 et 15 septembre derniers, souligne la nécessité de relever ces défis en développant notamment les nouvelles technologies de l'énergie. Elle met l'accent sur d'autres priorités, la prévention des risques sanitaires environnementaux, risques émergents (nanomatériaux, perturbateurs endocriniens, polluants non réglementés dans l'eau, etc.), la qualité de l'air, la lutte contre les inégalités environnementales.

— Les travaux présentés dans ce rapport scientifique, montrent que les études menées à l'INERIS sont au cœur de ces chantiers prioritaires. Qu'il s'agisse des batteries au lithium, du biogaz, des nanotechnologies, du bisphénol A, des perturbateurs endocriniens ou de la recherche en toxicologie et écotoxicologie. L'un des points soulignés sur les risques, et notamment sur les risques émergents,

est l'information du public et le nécessaire partage des savoirs, élément important dans ce contexte.

— L'INERIS a mis en place depuis plusieurs années des rencontres avec des relais d'opinion de la société que sont les ONG et les associations de consommateurs pour échanger sur ses travaux. L'Institut, qui s'est engagé à répondre aux attentes sociétales, inscrit ses recherches dans l'excellence scientifique alliée à l'utilité sociale.

— La Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core) donne son avis sur les orientations des programmes de recherche et d'expertise eu égard aux attentes de la société. La Core est également consultée sur les suites à donner dans l'hypothèse d'une alerte soulevée par l'un des salariés de l'Institut : face à l'inquiétude de la population, il apparaît plus que jamais nécessaire de clarifier les règles de gouvernance qui s'attachent aux travaux de recherche et d'expertise dans le domaine des risques sanitaires et environnementaux.

— **Vincent Lafèche,**  
directeur général

INERIS is rolling out a comprehensively applied research activity hinged on strong partnerships, which is an overriding success factor in its mission at the service of innovation. Innovation and technological breakthroughs are crucial to take on climate and energy challenges. The environmental transition road map drawn up at the environmental Conference of 14 to 15 September, 2012 underscores the need to meet these challenges by developing especially new energy technologies. It equally lays emphasis on other priorities, prevention of environmental health risks, emerging risks (nanomaterials, endocrine disruptors, unregulated water pollutants...), air quality, and the fight against environmental inequalities. The findings presented in this scientific report show that the research conducted at INERIS lie at the heart of these priority projects, be it lithium batteries, biogas, nanotechnologies, bisphenol A, endocrine disruptors, toxicology and ecotoxicology research, etc. One of the salient points on risks, particularly emerging risks, is informing the general public and the need for knowledge sharing, which is a vital factor in the present dispensation. For several years now, INERIS has instituted meetings with opinion multipliers in communities, namely NGOs and consumer associations, to exchange views on these findings. Given that the Institute is committed to meeting societal expectations, its research is designed to combine scientific excellence with social utility. The Committee for the orientation of research and expertise (Core) provides advice on how to orient research and expertise programmes in the light of society expectations. The Core is equally consulted on the way forward whenever an alarm is raised by an employee of the Institute. Faced with concerns from the population, there is an urgent need, more than ever, to clarify the governance rules attached to research and expertise activities in the field of health and environmental risk management.





## REPRENDRE LA PAROLE ET REGAGNER LA CONFIANCE

— À plusieurs reprises, la communauté scientifique s'est trouvée contournée dans le cadre de débats et de décisions importantes. Sur des sujets porteurs d'enjeux sanitaires ou environnementaux sensibles, les scientifiques sont de plus en plus remis en cause, voire accusés de conflits d'intérêt, ou instrumentalisés. Scientifiques et experts doivent reprendre la parole et regagner la confiance parfois perdue, dans une société de plus en plus allergique aux risques perçus le plus souvent de manière indirecte, notamment à travers l'écho des médias.

— Dans un contexte souvent tendu, le scientifique doit savoir résister aux pressions diverses. Ainsi, la pression de la communauté scientifique elle-même et des instances d'évaluation s'est amplifiée vis-à-vis des publications avec l'avènement des outils bibliométriques modernes. D'autres pressions peuvent être dictées par des intérêts économiques, des pressions idéologiques ou politiques. Plus que jamais, le scientifique se doit donc d'adopter une démarche rigoureuse, transparente, basée sur des protocoles et des méthodes validées, auditable et reproductible par les pairs, tout en observant les principes déontologiques les plus stricts. Pour construire des processus décisionnels robustes, le scientifique ainsi pressé de

questions doit démontrer sa capacité à fournir des réponses assorties d'une évaluation objective des incertitudes.

— L'implication accrue des chercheurs en sciences sociales dans les débats relatifs aux innovations technologiques est nécessaire, mais pas suffisante. La gouvernance revêt une importance cruciale, notamment grâce au partage très en amont avec les parties prenantes des questions de recherche et d'expertise, comme l'atteste l'expérience de la Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core) menée par l'INERIS. En effet, la communauté scientifique doit se rendre compte qu'elle est attendue, et que son propre agenda, ses priorités doivent être réinterrogés à la lumière des questions mises en avant par les parties prenantes. Pour autant, le scientifique est responsable de la valeur scientifique des réponses qu'il apporte. Mais il doit aussi travailler plus que jamais pour que ses réponses soient partagées et audibles, de même que ses doutes et ses incertitudes.

— **Pierre Toulhoat**,  
directeur scientifique

On countless occasions, the scientific community has been sidelined in debates and decisions of major importance. On issues representing crucial health and environmental challenges, scientists have been increasingly impugned and even accused of conflicts of interest or being used for dubious ends. Scientists and experts must retake the leadership mantle and regain the trust they have sometimes lost in a society that is increasingly allergic to the risks very often seen in a rather indirect manner, particularly echoes from the media. In an often tense environment, the scientist must be able to withstand pressure from various quarters. In this regard, the pressure from the scientific community itself, notably rating authorities, has intensified with regard to publications, with the coming of modern bibliometric tools. Other forms of pressure may be imposed by economic interests, ideological or political demands. More than ever, the scientist must opt for a rigorous and transparent approach, based on protocols and methods validated, auditable and replicable by their peers, while observing ethical principles of the highest order. To design robust decision-making processes, the scientist thus faced with a torrent of issues, must demonstrate their ability to provide solutions accompanied with an objective appraisal of uncertainties. The increased involvement of social science researchers in technological innovation debates remains inadequate. Good governance is equally of vital importance, particularly thanks to the rather upstream exchanges with stakeholders of research and expertise issues, as shown by the experience of the Committee for the orientation of research and expertise (Core) operated by INERIS. In actual fact, the scientific community must realise that expectations are high, and that it must rethink its own agenda and priorities in the light of the questions raised by the stakeholders. But for all this, the scientist is responsible for the scientific value of the solutions put forward. Additionally, they must make sure, more than ever, that not only their responses but also their doubts and uncertainties are shared and understood.

## Contributeur



Laurence Rouil

# L'INERIS, ACTEUR MAJEUR DE LA QUALITÉ DE L'AIR EN EUROPE

La pollution atmosphérique est l'une des préoccupations environnementales parmi les plus importantes des citoyens. Des exemples marquants, tels que le « Grand Smog » de Londres de 1952, responsable de plusieurs milliers de décès, ou l'acidification des eaux scandinaves dans les années 1970, ont motivé la prise de conscience des décideurs politiques et initié la mise en œuvre de stratégies de gestion de la qualité de l'air dans les pays industrialisés. En Europe, la Commission économique pour l'Europe des Nations unies (CEE-NU) a établi, en 1979, la Convention sur le transport longue distance des polluants atmosphériques (CLRTAP), avec en ligne de mire les questions d'acidification et d'eutrophisation des écosystèmes. La Commission européenne a rapidement suivi avec un arsenal de directives sur la surveillance de la qualité de l'air et la limitation des rejets atmosphériques de nombreux secteurs économiques. L'exposition des écosystèmes et de la santé humaine à l'ozone fut

établie dès la fin des années 1990. Le protocole de Göteborg de la CEE-NU de 1999 imposa des valeurs limites d'émission par pays, afin de lutter contre l'acidification, l'eutrophisation et les niveaux d'ozone, relayées par la Commission européenne au niveau des états membres avec la directive dite « NEC » (*National Emissions Ceilings*) (2001/81/CE). La surveillance des polluants atmosphériques est aujourd'hui cadrée par la directive unifiée 2008/50/CE sur la qualité de l'air ambiant.

Ces textes sont actuellement en cours de révision pour prendre en compte des enjeux nouveaux tels que la pollution particulaire. La nécessité de considérer les interactions avec l'évolution de notre climat est maintenant une évidence, afin de privilégier des stratégies de gestion de la qualité de l'air et du réchauffement climatique les plus coût-efficaces, tout en limitant leurs éventuels antagonismes. Ces processus de révision s'appuient sur des bilans des stratégies mises en œuvre depuis près de vingt ans, afin d'optimiser les actions futures en utilisant les enseignements du passé.

Ce cadre réglementaire cache une intense activité scientifique et technique pour apporter au politique des éléments objectifs d'évaluation et d'aide à la décision. L'INERIS est investi depuis plusieurs années dans ces travaux en appui du ministère chargé de l'Écologie. Il est impliqué autant dans la mise en œuvre et la coordination de la surveillance de la qualité de l'air<sup>1</sup> que dans des travaux de recherche destinés à mieux comprendre les déterminants de la qualité de l'air et leur évolution future. Le développement et la mise en œuvre de modèles de simulation adaptés et fiables sont indispensables pour concevoir des stratégies efficaces. Dans ce domaine, l'INERIS est aujourd'hui reconnu par ses pairs européens au travers de ses nombreuses publications et de ses projets.

## De PREV'AIR aux services GMES

Le programme GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*, [www.gmes.info/](http://www.gmes.info/)), lancé par la Commission européenne dans les années 2000, a pour objectif de développer des services opérationnels de surveillance de l'environnement. L'atmosphère est concernée et, depuis 2006, une succession de projets de recherche, coordonnés par le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme

## Références

Honoré C., Rouil L., Vautard R., Beekmann M., Bessagnet B., Malherbe L., Meleux F., Dufour A., Elichegaray C., Flaud J.-M., Menut L., Martin D., Peuch V.H., Poisson N. *Predictability of regional air quality in Europe: the assessment of three years of operational forecasts and analyses over France*. 2007, Journal of Geophysical Research, Atmospheres, 113, D04301, <http://dx.doi.org/10.1029/2007JD00876>

Rouil L., Honoré C., Vautard R., Beekmann M., Bessagnet B., Malherbe L., Meleux F., Dufour A., Elichegaray C., Flaud J.-M., Menut L., Martin D., Peuch V.H., Poisson N. *PREV'AIR: an operational forecasting and mapping system for air quality in Europe*. 2009, BAMS, DOI: 10.1175/2008BAMS2390.1.

Kononov I. B., Beekmann M., Meleux F., Dutot A., Foret G. *Combining deterministic and statistical approaches for PM10 forecasting in Europe*. Atmospheric Environment, 2007, 41 (35), pp. 7577-7587.

Meleux F., Solmon F., Giorgi F. *Increase in summer European ozone amounts due to climate change*. Atmospheric Environment, 2007, 41 (35), pp. 7577-7587.

Bessagnet B., Menut L., Curci G., Hodzic A., Guillaume B., Lioussé C., Moukhtar S., Pun B., Seigneur C., Schulz M. *Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe – focus on secondary organic aerosols*. J Atmos Chem, 2009, 61 (3), pp. 175-202 10.1007/s10874-009-9129-2.

Bessagnet B., Seigneur C., Menut L. *Impact of dry deposition of semi-volatile organic compounds on secondary organic aerosols*. Atmospheric Environment, In Press, Corrected Proof, Available online, February 19, 2010, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.tmosenv.2010.01.027.

Colette A., Granier C., Hodnebrog Ø., Jakobs H., Maurizi A., Nyiri A., Rao S., Amann M., Bessagnet B., D'Angiola A., Gauss M., Heyes C., Klimont Z., Meleux F., Memmesheimer M., Mieville A., Rouil L., Russo F., Schucht S., Simpson D., Stordal F., Tampieri F., M. Vrac. *Future air quality in Europe: a multi-model assessment of projected exposure to ozone*. Atmos Chem Phys Discuss, 12, pp. 14771-14812, 2012doi:10.5194/acpd-12-14771-2012.

## Note

1. L'INERIS est membre du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA, [www.lcsqa.org](http://www.lcsqa.org)).

(CEPMMT, [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)), sont dédiés au développement de services de prévision et de cartographie de la composition de l'atmosphère.

Dès 2003, l'INERIS mettait en place, en collaboration avec Météo-France, l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL) et l'Ademe, à la demande du ministère chargé de l'Écologie, le système national de prévision et de cartographie de la qualité de l'air, PREV'AIR ([www.prevair.org](http://www.prevair.org)). PREV'AIR fut le premier système opérationnel en Europe capable de produire et de diffuser des prévisions et des cartes combinant simulations et observations des principaux polluants atmosphériques. L'INERIS est responsable du développement et de l'exploitation de la plateforme de calcul. Elle développe, en étroite partenariat avec l'IPSL, l'un des modèles de chimie-transport produisant des prévisions, CHIMERE, et mène des travaux de recherche destinés à améliorer le système, notamment dans le domaine de l'assimilation de données d'observation.

Le savoir-faire développé dans PREV'AIR a pu être valorisé dans le cadre des projets préfigurateurs à la mise en place, en 2014, des services GMES-Atmosphère. Météo-France et l'INERIS coordonnent le développement des services Qualité de l'air ([www.gmes-atmosphere.eu/services/raq/](http://www.gmes-atmosphere.eu/services/raq/)). Ils organisent les travaux de six équipes de modélisation européennes et proposent un cadre de valorisation et d'évaluation des modèles candidats pour être intégrés dans les futurs services Atmosphère.

### La recherche en appui aux décisions politiques

Le code CHIMERE fait l'objet de travaux récurrents à l'INERIS pour le mettre en œuvre afin d'évaluer des politiques de gestion. Ils concernent en particulier la modélisation des aérosols et la simulation des zones d'émission et d'exposition les plus sensibles telles que les grandes agglomérations. CHIMERE permet de simuler des niveaux de pollution aux échelles européenne à régionale avec une résolution variant de 20 à 3 km. Mais utiliser un modèle de ce type avec une résolution aussi fine est coûteux et peut s'avérer fastidieux, car les données de base (les émissions) sont rarement disponibles avec un tel raffinement. En 2009, l'INERIS a été sollicité pour intégrer le consortium du projet EC4MACS ([www.ec4macs.eu](http://www.ec4macs.eu)), coordonné par l'IIASA (International Institute for Applied System Analysis), pour développer pour la Commission européenne une méthodologie permettant de simuler avec une précision accrue par rapport à l'état de l'art les concentrations en particules, dioxyde d'azote et ozone en Europe. Ce projet a conduit l'INERIS à réaliser pour la première fois des simulations sur l'Europe entière avec une résolution spatiale de 7 km, et à évaluer les inventaires d'émissions réglementaires pour aboutir à des résultats salués par la commission et la communauté scientifique.

Dans le cadre du projet européen CityZen ([www.cityzen-project.eu/](http://www.cityzen-project.eu/)), l'INERIS a coordonné la réalisation d'une analyse des tendances de la qualité de l'air en Europe ces dix dernières années. Il a également proposé des travaux préliminaires d'évaluation des impacts réciproques de la pollution atmosphérique et du changement climatique. Anticipant les enjeux sous-jacents, l'Institut publiait dès 2007 le résultat de simulations de niveaux d'ozone attendus à la fin du siècle, obtenus en couplant CHIMERE à un modèle climatique. Ces travaux se sont poursuivis sur les particules et font toujours l'objet de

travaux de recherche menés au sein de l'Institut. Les liens avec la communauté du climat se font désormais plus étroits.

Fort de ces expériences, en 2010, l'INERIS a été intégré au centre thématique sur la pollution atmosphérique et la mitigation du climat de l'Agence européenne de l'environnement, pour ses compétences en modélisation. Il participe aux travaux d'évaluation et de prospective de l'Agence sur lesquels elle s'appuie pour proposer des orientations stratégiques. Cette position lui permet de valoriser ses travaux, et de consolider son réseau de partenaires sans lequel ses travaux de recherches ne pourraient se développer.

Autant d'exemples qui illustrent la position de l'INERIS dans le domaine de la modélisation de la qualité de l'air, désormais bien établie en Europe. Ce développement bénéficie de la compétence historique de l'Institut sur les aspects météorologiques. Son savoir-faire est reconnu dans le domaine de la mesure et il a été pionnier en proposant, en 2007, pour le Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA) et avec l'appui des Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA), la mise en place d'un réseau de mesure de la composition chimique des particules, activé en cas d'épisodes de pollution (CARA). Les données uniques ainsi obtenues ont largement aidé à l'évaluation de CHIMERE et à la compréhension des phénomènes de pollution particulière. Cette transversalité de compétences est l'un des meilleurs atouts de l'Institut, qui entend bien continuer de l'exploiter pour tenir son rang européen. ●

## Abstract

For several years, INERIS participates to a significant number of European research projects in the field of air quality that aim at providing up-to-date scientific insights to policy makers. Thanks to skills and experience developed with the development and the implementation of the PREV'AIR system, INERIS has been deeply involved in the preparatory projects dedicated to the future implementation of the GMES atmospheric services. With Météo France, INERIS is responsible for the coordination of the air quality monitoring and forecasting activities. INERIS is also a member of the EC4MACS consortium ([www.ec4macs.eu](http://www.ec4macs.eu)), a team committed by the European Commission to develop modelling tools and databases for decision-aiding in

framing future air quality legislations. Within the European project CityZen (<http://www.cityzen-project.eu/>), INERIS coordinated a trend study of air pollutant concentrations in Europe over the 10 past years. It led preliminary evaluation work related to bilateral impacts of air quality and climate change and the possible consequences to set win-win management strategies. It has also been involved in the CITEAIR project which proposed methodologies to define a consistent and homogeneous air quality index over Europe. INERIS started recently new research projects that will maintain its position in the field of air quality research.

## Les grands domaines de recherche

### Les territoires

Ce domaine regroupe l'ensemble des thématiques liées à l'interaction des activités humaines, des milieux (eau, air, sol) et du vivant.



# LES PARTENARIATS DE RECHERCHE À L'INERIS

# 45 %

Taux de succès  
2011 de  
l'INERIS pour  
les appels  
d'offres  
européens

### Notes

1. *Development and Validation of fish biomarkers for the Implementation of environmental Legislation.*
2. *Translocation of nanoparticles across biological barriers validation of cellular models using standardized approaches.*
3. *New in vitro and in vivo biological models to study endocrine disrupting chemicals in zebrafish.*
4. *Specific tools and methods for reprotoxicity.*

**A**u fur et à mesure du temps, la notoriété de l'INERIS le conduit à être plus régulièrement sollicité pour contribuer à des sujets majeurs. L'INERIS ne dispose le plus souvent ni de la taille critique ni de l'ensemble des compétences pour y répondre seul. La mise en place de partenariats dans lesquels l'Institut apporte ses compétences spécifiques au sein d'une feuille de route partagée est ainsi devenue depuis plusieurs années un mode d'action privilégié.

### Développer des partenariats diversifiés

De nombreux travaux sont menés en partenariat (projets européens, ANR, Ademe), avec des partenaires institutionnels et académiques. Certains sont éphémères le temps d'un projet, d'autres menés dans la durée. D'autres font l'objet de conventions avec des organismes hexagonaux ou européens.

Avec le monde industriel, des accords-cadres permettent de développer une stratégie de recherche concertée nécessaire pour anticiper les besoins à court et moyen terme.

Les partenariats de recherche sont stratégiques pour l'INERIS. L'utilisation partagée d'équipements techniques spécifiques ainsi que la programmation concertée optimisent les investissements et facilitent l'accès aux chercheurs. Les partenariats et réseaux sont une opportunité de rassembler une masse critique, renforçant la visibilité collective et individuelle des partenaires dans le paysage de la recherche tout en permettant d'en mieux influencer les orientations.

### Partager une feuille de route

La participation de l'INERIS aux alliances Ancre et Allenvi lui permet d'être au cœur de la coordination de l'ensemble des acteurs concernés par ces domaines de recherche, répartis entre les scientifiques des organismes de recherche, des universités et des écoles. Les réflexions menées dans les groupes de travail nourrissent les propositions de priorités transmises

aux financeurs (ANR, Europe, etc.). Pour renforcer la visibilité des acteurs et écrire une feuille de route partagée, et avant même la mise en place des alliances, l'INERIS a créé le réseau Antiope, qui réunit 50 équipes parmi les 11 partenaires (INRA, INSERM, CEA, etc.) Au sein de ce réseau, neuf projets ont été sélectionnés parmi les axes suivants :

- modélisation pour la prédiction des méthodes *in vitro*;
- champs électromagnétiques;
- biomarqueurs d'exposition prédictifs;
- caractérisation des perturbateurs endocriniens;
- toxicité, écotoxicité des nanoparticules;
- comparaison de modèles *in vivo* et *in vitro* pour la caractérisation des perturbateurs endocriniens;
- méthodes *in vitro* pour la toxicologie de la reproduction.

Un premier bilan après trois ans a permis des avancées significatives, notamment grâce au développement de nombreuses méthodes dans le cadre des projets DEVIL<sup>(1)</sup>, NANO-TRANS<sup>(2)</sup>, NEMO<sup>(3)</sup> ou STORM<sup>(4)</sup> et concrétisées par plusieurs publications marquantes. Ce réseau a joué et continue à jouer un rôle essentiel pour écrire la feuille de route nationale en toxicologie et écotoxicologie prédictive, et a permis de créer une interface opérationnelle entre les alliances Allenvi et Aviesan.

### Rassembler des compétences

Avec les biopuces, l'INERIS dispose de compétences et d'outils complémentaires pour innover dans les méthodes alternatives, pour l'évaluation des dangers des substances. En effet, l'INERIS et l'UTC (Université de technologie de Compiègne) développent ensemble des outils pour prédire la toxicité de substances chimiques dans l'organisme humain. Ce partenariat repose sur le rapprochement de compétences complémentaires : une équipe à l'INERIS capable de modéliser des processus *in vitro* et un équipement mis au point par l'UTC : des biopuces spécifiques que sont les organes bioartificiels miniaturisés. Deux programmes de recherche



### La sécurité des installations industrielles fixes ou mobiles

Étude des phénomènes dangereux à l'origine des accidents, fiabilité des moyens mis en place pour la sécurité, apport plus récent des sciences humaines et sociales (facteur organisationnel et humain), etc.



### L'accompagnement de l'innovation

Respecter la planète pour les générations futures tout en répondant aux besoins de la croissance démographique nécessite de développer de nouvelles filières énergétiques, des nanotechnologies... L'INERIS accompagne les entreprises avec des programmes de recherche qui étudient la sécurité en amont du développement.



financés par l'ANR ont permis, depuis 2007, d'initier ces développements : SYSBIOX, relatif à l'impact des substances chimiques sur le métabolisme intracellulaire du foie a débouché au dépôt d'un brevet;  $\mu$ HepaReTox étudie les échanges cellulaires du foie et des reins. De plus, le projet ToxOnChip est financé par la fondation UTC pour tester de nouvelles cellules et étendre le type de tissu. Des perspectives, d'ici cinq à dix ans, visent à construire des biopuces pour reproduire les processus toxicocinétiques du corps humain. Ce projet a permis aussi la mise en place de la chaire de modélisation mathématique à l'UTC, occupée par Frédéric Bois (INERIS).

La reconnaissance des travaux se traduit naturellement par de nouvelles collaborations de recherche, par des échanges de scientifiques et la venue de doctorants. L'unité mixte Périctox, mise en place en 2008 entre l'INERIS et l'équipe universitaire Environnement toxique périnatal (université Picardie Jules-Verne), repose sur une pluridisciplinarité qui permet de répondre à des questions complexes (physiologie, biologie moléculaire, métrologie, etc.). Reconnue depuis début 2012, l'unité mixte couvre différents domaines de recherche en santé-environnement, tels que les effets sur la santé des radiofréquences ou des nanoparticules. L'étude MécoExpo, menée par l'unité, vise à mieux évaluer l'exposition *in utero* des nouveau-nés aux pesticides. Des perspectives après validation de la méthodologie, les effets de l'exposition sur la physiologie de l'enfant pourront être étudiés.

### Établir des collaborations stratégiques

Les accords conclus avec les industriels permettent d'intervenir en amont sur les problématiques de sécurité liées aux nouvelles filières technologiques, nécessaires pour répondre aux enjeux du développement durable. Par exemple, GDF SUEZ et l'INERIS ont conclu pour une durée de cinq ans un accord de collaboration sur leurs activités de recherche. Il vise à renforcer les échanges

scientifiques et techniques dans le domaine de la sécurité industrielle liée aux nouvelles énergies: filières hydrogène; biogaz et méthanisation; captage, transport et stockage du CO<sub>2</sub>. Avec la signature de cet accord-cadre, la direction Recherche et Innovation de GDF SUEZ marque ainsi sa volonté de mobiliser les expertises de l'INERIS dans le domaine de la sécurité industrielle, pour accompagner les développements techniques autour du gaz naturel et des nouvelles filières énergétiques (CO<sub>2</sub>, hydrogène, biogaz, etc.). Cet accord permettra de renforcer les collaborations déjà fructueuses sur les sujets d'intérêt commun.

### Répondre aux attentes sociétales

La société souhaite l'arrivée de nouveaux produits et de nouvelles technologies sans être exposée à de nouveaux risques. L'INERIS s'engage à répondre aux attentes sociétales en alliant l'excellence de la recherche à l'utilité sociale. La Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (Core) rend chaque année un avis sur l'adéquation des programmes de recherche développés à l'Institut vis-à-vis des attentes sociétales. ●

### Abstract

INERIS, whose profile is improving year after year, is more and more involved in the management of major science and environmental issues. Therefore, the Institute has developed for several years various partnerships with stakeholders (academics, state and industry), in which all partners can benefit from INERIS scientific "know how" within

a shared roadmap. INERIS has committed itself to answer to social expectations combining high level research and social utility. The Committee for the orientation of research and expertise (Core) provides advice each year about the relevancy of research programmes built by the Institute with regards to the society expectations.

# 55

Nombre de doctorants préparant une thèse à l'INERIS en 2011

## LIQUIDES IONIQUES

- 10 Prédiction et mesure de la chaleur de combustion

## NANOTECHNOLOGIES

- 14 **Focus** Détection des nanoparticules manufacturées sur les places de travail

## BIOGAZ

- 15 Perspectives européennes sur la sécurité : transition vers le programme Horizon 2020
- 18 Composition du biogaz issu de la méthanisation et des émissions de moteurs de valorisation

## BATTERIES LITHIUM-ION

- 21 Accompagnement à la maîtrise des risques accidentels associés aux applications innovantes

## HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS

- 24 Gestion des risques environnementaux liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche mère





# NOUVELLES TECHNOLOGIES



## Contributeurs



Alpha-Oumar Diallo



Guy Marlair

# PRÉDICTION ET MESURE DE LA CHALEUR DE COMBUSTION DES LIQUIDES IONIQUES

**L**es liquides ioniques (LI) sont utilisés dans divers domaines, allant des applications analytiques aux processus de production ou de stockage d'énergie, à l'électrochimie, jusqu'aux sciences des polymères, en passant par les processus photochimiques ou de traitement de la biomasse.

Dans le cadre de la thèse d'Alpha-Oumar Diallo, l'INERIS, en collaboration avec l'Université de technologie de Compiègne (UTC) et l'École supérieure de chimie organique et minérale

(ESCOM), a initié des travaux sur l'établissement d'une méthodologie cohérente d'évaluation du profil de dangers physico-chimiques des liquides ioniques. Ces travaux ont notamment porté sur le développement de méthodes d'estimation de la chaleur de combustion (PCI/PCS)<sup>1</sup> représentant un premier indicateur simplifié de potentiels de dangers d'incendie d'une substance.

Pour rappel, les liquides ioniques sont constitués d'un cation organique associé à un anion organique ou inorganique et présentent une température de fusion inférieure à 100°C. À ce titre, il s'agit d'une sous-famille des sels d'onium. Le **tableau 1** reprend le type de cations et d'anions couramment rencontrés; les combinaisons cations/anions possibles sont dans l'absolu pratiquement infinies (~10<sup>18</sup>).

## Revue et développement de modèles prédictifs permettant l'accès au PCI/PCS

L'analyse de 18 modèles corrélatifs existants, reliant le pouvoir calorifique supérieur à la composition élémentaire de combustibles, a permis de faire ressortir cinq corrélations présen-



Figure 1

Photographie du calorimètre de combustion 6100.

**Tableau 2** - Pouvoirs prédictifs des cinq meilleurs modèles existants pour la prédiction des pouvoirs calorifiques des LI.

Corrélation	Formule de la chaleur de combustion	Erreur (%)	R <sup>2</sup>
Boie	$PCS = 35.17 \cdot C + 116.26 \cdot H - 11.10 \cdot O + 6.28 \cdot N + 10.47 \cdot S$	4,6	0,97
Dulong-Berthelot	$PCS = 35.14 \cdot C + 144.45 \cdot H - \frac{N+O-I}{8} + 9.30 \cdot S$	6,4	0,94
Garvin	$PCI = 36.2 \cdot C + 90.0 \cdot H - 10.6 \cdot O + 8 \cdot 0 \cdot N + 10.6 \cdot S - 2.05 \cdot Cl - 3.5 \cdot F - 0.16 \cdot Br + 0.26 \cdot I$	4,9	0,96
Gumz	$PCS = 34.03 \cdot C + 124.32 \cdot H - 9.84 \cdot O + 6.28 \cdot N + 19.09 \cdot S$	4,1	0,97
Lloyd-Davenport	$PCS = 35.78 \cdot C + 113.57 \cdot H - 8.45 \cdot O + 5.90 \cdot N + 11.19 \cdot S$	3,1	0,98

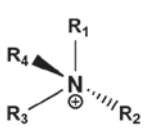

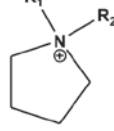
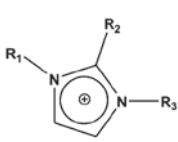
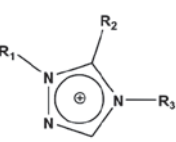

## Note

1. PCI : Pouvoir calorifique inférieur.  
PCS : Pouvoir calorifique supérieur.

N.B. : PCS et PCI en MJ/kg, teneurs massiques en éléments C, H, O, S, N, halogènes exprimées en fractions massiques.



Tableau 1 - Divers cations et anions entrant dans la composition des liquides ioniques (liste non exhaustive).

Cations			Anions inorganiques	Anions organiques
			$F^-$ , $Cl^-$ , $Br^-$ , $I^-$	$CH_3CO_2^-$ , $CH_3SO_4^-$
Ammonium	Phosphonium	Pyrrolidinium	$BF_4^-$ , $PF_6^-$ , $SbF_6^-$ , $AsF_6^-$	$C_6H_5SO_3^-$ (=OTs)
			$NO_3^-$ , $ClO_4^-$	$CF_3CO_2^-$ , $C(CF_3SO_2)_3^-$
Imidazolium	Triazolium	Pyridinium	$Al_xCl_{(3x+1)}^-$	$CF_3CO_3^-$ (=OTf)
			$Al_xEt_xCl_{(2x+1)}^-$	$N(SO_2CF_3)_2^-$ (=NTf <sub>2</sub> )
			$CuCl_2^-$ , $AuCl_4^-$ , $ZnCl_3^-$ , $SnCl_3^-$	$BR_4^-$ , $R_3BOH^-$

tant un potentiel de prédictibilité satisfaisant dans le cas des liquides ioniques, domaine d'application non envisagé au départ par les auteurs de ces modèles originaux, comme le montre le [tableau 2](#).

Par la suite, un premier modèle de type *Quantitative structure-property relationships* (QSPR) conforme aux exigences réglementaires pour la conception et l'utilisation de modèles QSPR, tel que défini par l'OCDE, a été développé, en s'inspirant des descripteurs utilisés dans les corrélations existantes (fractions massiques en éléments C, H, O, N, etc.). Ce modèle présente une corrélation très robuste ( $R^2=0.99$ ) et de faibles déviations par rapport aux valeurs expérimentales trouvées dans la littérature (3 % au maximum).

$$PCS = 34.95 C + 135.82 H - 3.37 O + 6.45 N + 2.79 Cl - 1.86$$

$$PCI = 34.95 C + 113.86 H - 3.37 O + 6.45 N + 2.79 Cl - 1.86$$

### Mesures directes de PCI/PCS réalisées à l'aide de la bombe calorimétrique

L'utilisation de la bombe calorimétrique modèle Parr 6100 Calorimeter® [figure 1](#) a permis d'obtenir des mesures ➔

## Références

- Diallo A. O., Marlair G., Len C., Fayet G. *Evaluation of heats of combustion of ionic liquids through use of existing and purpose-built models*. Ind Eng Chem Res, 2012, 51 (7), pp. 3149-3156.
- Diallo A. O., Marlair G., Len C., Morgan A.B. *Revisiting physico-chemical hazards of ionic liquids*. Sep Purif Tech, 2012, 97, pp. 228-234.
- Diallo A. O., Marlair G., Len C., Morgan A.B. *Revisiting the question: how far ionic liquids are safe to produce, store, handle and use*. 1<sup>st</sup> International Conference on ionic liquids in separation and purification technology, ILSEPT 2011, Sitges, Spain, September 4-7, 2011.
- Diallo A. O., Marlair G., Len C. *Ionic liquids targeted in the energy sector, how safe, how green are they?* SafeEnergy Workshop, ETPIS, Brussels, Belgium, March 13, 2012.
- Diallo A. O., Marlair G., Len C., Bertrand J.-P. *Fire hazard assessment of ionic liquids in biorefineries*. 8<sup>th</sup> International Conference on renewable resources and biorefineries. Toulouse, France, June 4-6, 2012.

Tableau 3 - Comparaison des valeurs mesurées/prédites du pouvoir calorifique supérieur de LI de type phosphonium.

Liquide ionique	Valeur prédite (MJ/kg) Modèle dédié	Valeur mesurée (MJ/kg) Calorimètre 6100 (MJ/kg)	Erreur VP/VM (%)
[P6,6,6,14]Cl	42,12	42,28 ± 0,08	-0,4
[P6,6,6,14][(iC8) <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> ]	42,12	42,47 ± 0,08	-0,8
[P6,6,6,14][DCA]	41,52	41,04 ± 0,08	+1,2
[Pi4,i4,i4,1][TOS]	32,37	33,49 ± 0,08	-3,3
[P4,4,4,1][MeSO <sub>3</sub> ]	29,13	30,55 ± 0,08	-4,6
[P6,6,6,14][TFSI]	28,84	29,90 ± 0,08	-3,5
[P4,4,4,2][DEP]	32,19	32,65 ± 0,08	-1,4

➔ directes de chaleur de combustion théorique (PCS) sur une série de liquides ioniques appartenant à la famille des phosphoniums dont aucun représentant ne figure dans le modèle QSPR initialement développé. Dans le cas des liquides ioniques, nous avons eu recours à l'ajout d'huile de paraffine dont nous avons au préalable mesuré le pouvoir calorifique pour faciliter l'inflammation des LI pendant le processus de combustion sous oxygène. Comme le montre le **tableau 3**, les valeurs de PCS obtenues expérimentalement sont proches de celles prédites, ce qui démontre la robustesse du modèle.

### Mesures de la chaleur de combustion réellement dégagée en condition d'incendie

Le calorimètre de Tewarson, FPA ISO 12136: 2011, a été utilisé pour caractériser de manière scientifique le comportement au feu des liquides ioniques dans des conditions d'incendie. Il donne accès à des mesures essentielles comme l'allumabilité, les débits calorifiques réellement dégagés, les concentrations et les facteurs d'émission de polluants et toxiques, l'opacité des fumées, etc. L'impact thermique provoqué par la combustion de divers liquides ioniques de la famille des imidazoliums et des phosphoniums a été analysé en termes de débit calorifique dégagé en fonction du temps (**figures 2 et 3**) et en termes d'énergie effectivement dissipée (par intégration des courbes de débits calorifiques **tableau 4**). La chaleur effectivement dégagée est bien entendu inférieure à la chaleur théorique de combustion complète, un incendie n'étant par nature pas un processus optimisé en termes de combustion. Les résultats de ces essais confirment une bonne résistance à

l'inflammation, mais une combustibilité réelle de l'ensemble des liquides ioniques testés, donnant souvent formation de résidus carbonés. Par ailleurs, le profil de débit calorifique **figure 2** en conditions de feu « bien ventilé » ainsi que les facteurs d'émissions de polluants sont propres à chaque liquide ionique, confirmant le rôle important de l'anion associé à une même famille de cation. Le **tableau 4** reprend les différentes valeurs de PCS obtenus dans les calorimètres de combustion, le PCFC® (*Pyrolysis Combustion Flow Calorimeter*) étant un calorimètre développé par la FAA permettant d'étudier le comportement au feu des matériaux à l'échelle du milligramme. La comparaison des chaleurs de combustion effectives, mesurées au calorimètre de Tewarson, et des chaleurs de combustion théoriques, également mesurée pour ces mêmes produits, fait ressortir des rendements de combustion dans les conditions de fonctionnement du calorimètre de Tewarson qui varient entre 66 et 88 % pour les phosphoniums.

### Conclusions et perspectives

Les premières publications et communications effectuées sur ces travaux ont surpris certains experts qui tablaient *a priori* sur une « innocuité » de toute cette famille de produits. Elles confirment donc l'intérêt réel de poursuivre ces travaux et ouvrent d'ores et déjà de nouvelles perspectives de collaboration pour approfondir nos recherches sur ce sujet. Les résultats acquis seront intégrés dans le processus global d'évaluation des profils de dangers physico-chimiques des liquides ioniques, développé dans le cadre de cette thèse initiée par l'INERIS en collaboration avec l'équipe Transformations intégrées de la matière renouvelable de l'UTC. ●

**Tableau 4** - Rendement de combustion des LI au calorimètre de Tewarson.

Liquide ionique	PCS mesuré ASTM D240 (MJ/kg) <sup>1</sup>	Chaleur totale dégagée en condition d'incendie		Rendement de combustion (%)
		Tewarson ISO 12136: 2011 (MJ/kg) <sup>1</sup>	PCFC ASTM D7309 (MJ/kg) <sup>2</sup>	
[P6,6,6,14]Cl	42,28	28,00	32,23	66
[P6,6,6,14][(C8) <sub>2</sub> PO <sub>2</sub> ]	42,47	29,90	33,60	70
[P6,6,6,14][DCA]	41,04	30,80	27,40	75
[Pi4,i4,i4,1][TOS]	33,49	21,30	27,98	64
[P4,4,4,1][MeSO <sub>3</sub> ]	30,55	25,50	21,77	83
[P6,6,6,14][TFSI]	29,90	20,10	27,50	67
[P4,4,4,2][DEP]	32,65	28,60	28,17	88
[EMIM][MeSO <sub>3</sub> ]		20,00		
[EMIM][EtSO <sub>4</sub> ]		19,90		
[EMIM][DCA]		25,90		
[EMIM][BF <sub>4</sub> ]		19,20		
[EMIM][Otf]		16,76		

1. Mesuré à l'INERIS. 2. Mesuré par A. B. Morgan (UDRI-USA).

Figure 2

Débits calorifiques obtenus lors de la combustion au calorimètre de Tewarson (ISO 12136), composés de la famille des imidazoliums.

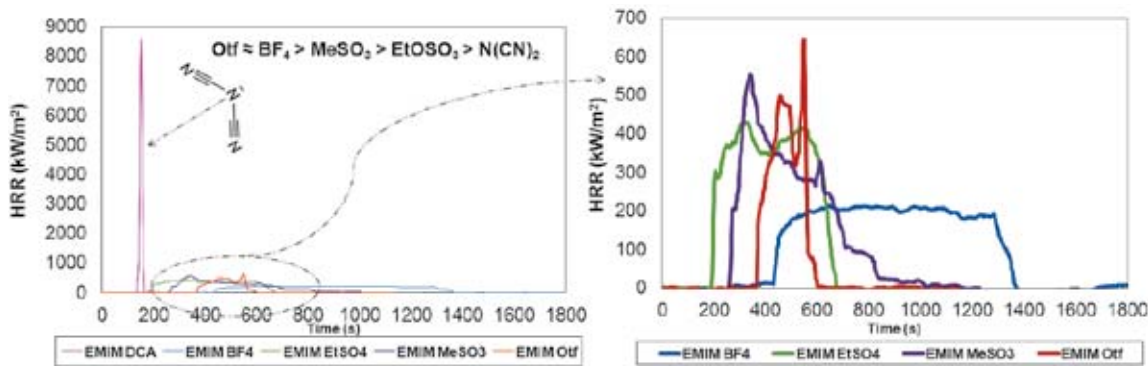
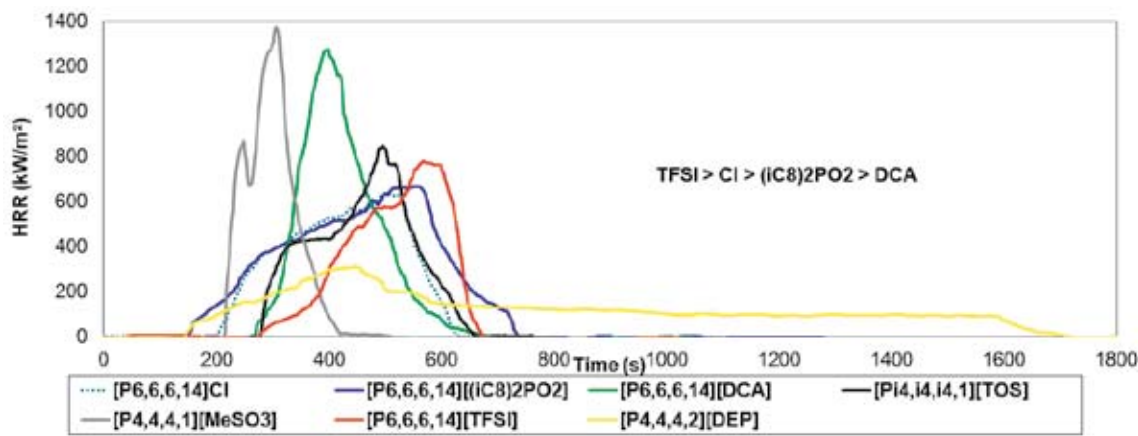


Figure 3

Débits calorifiques obtenus lors de la combustion au calorimètre de Tewarson (ISO 12136), composés de la famille des phosphoniums.



## Abstract

Ionic liquids (IL) are advanced chemicals promised according to many people to a brilliant future in a number of strategic applications that might serve greener future in chemistry and energy related technological developments. However, lack of appropriate thermodynamic data as well as somewhat misleading discourse presenting IL as inherently safe materials has led INERIS to initiate a thesis work in collaboration with the University of Compiègne and ESCOM with the objective to develop a dedicated and pertinent methodology aiming at characterizing the comprehensive

phys-chem hazards profile of such chemical from scratch. The paper here focuses on the initial work that has led to develop a first tool allowing to access to reasonable predictive values of theoretical heats of combustion of ionic liquids for which the elemental composition is known. As a result, validation of 5 preexisting correlation found in the literature for such a use was operated successfully, as well as the development of a purpose built QSPR model based on the implementation of a database of some 50 IL comprising four main groups of ionic liquids for which heats of formation or heats of combustion were available in the open literature. Experimental tools

have also been implemented and used to either: obtain additional measurements of theoretical heats of combustion of test samples by use of a bomb calorimetry following ASTM D240 protocol; or measure the effective heats of combustion in fire conditions, by use of the Tewarson apparatus (ISO 12136: 2011) with the acknowledged contribution of two industrial suppliers of IL. Results so far confirm that the combustibility potential as well as the fire behaviour must be assessed on a case by case approach. The work has opened new perspective of collaborative work serving the global objectives of our project.

# DÉTECTION DES NANOPARTICULES MANUFACTURÉES SUR LES PLACES DE TRAVAIL

## Contributeurs



Tanguy Amodeo



Christophe Dutouquet



Les nanotechnologies représentent aujourd'hui un secteur industriel en plein essor. Porteuses d'innovations dans des secteurs fondamentaux tels que ceux de l'énergie ou des matériaux, elles sont également vectrices de craintes, notamment vis-à-vis des impacts potentiels – toxicologique et environnemental –, induits par l'émission de nanoparticules. Il est donc nécessaire d'accompagner les industriels, afin de maîtriser les risques et de favoriser ainsi un développement durable. Parmi les risques, l'INERIS s'intéresse notamment à celui lié à l'exposition des personnes aux nanoparticules manufacturées, sur les places de travail. Afin de caractériser l'exposition des personnels potentiellement induite par des fuites sur les procédés de fabrication ou encore par des manipulations de poudres nanométriques, il est nécessaire de disposer d'une instrumentation adéquate permettant de détecter, *in situ* et en temps réel, des nanoparticules manufacturées.

Les outils actuellement disponibles se basent sur la mesure de la taille et de la concentration des particules et, de ce fait, permettent diffi-

lement de distinguer les nanoparticules manufacturées des nombreuses particules déjà présentes dans l'air. Ce problème peut être résolu en analysant la chimie élémentaire des particules en suspension dans l'air, indépendamment de leur taille et de leur niveau d'agrégation. L'idée est donc d'identifier les nanoparticules manufacturées grâce à leurs composants élémentaires, souvent des métaux rarement présents dans l'air à l'état naturel. Pour cela, l'INERIS a développé la technique de spectroscopie de plasma induit par laser, ou LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), qui permet d'analyser en temps réel la composition chimique élémentaire de l'air et des particules en suspension. Tout d'abord dans le cadre d'un doctorat, puis au sein d'une collaboration avec un industriel – CILAS (Compagnie industrielle des lasers) –, un prototype de terrain a été élaboré. Cet instrument, transportable, permet de mesurer la concentration en masse ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de tout type d'espèces atomiques présentes dans l'air, ainsi que celles qui composent les nanoparticules manufacturées.

L'INERIS s'est vu décerner, en octobre 2011, le Prix Technologies 2011 à l'occasion de la 8<sup>e</sup> édition des Prix de la Recherche. L'Institut a été récompensé pour ses travaux sur la technique LIBS, permettant de sécuriser les procédés de fabrication en détectant les fuites de nanoparticules manufacturées. ●



Figure 1

Prototype LIBS développé dans le cadre d'une collaboration entre l'INERIS et CILAS.



Contributeur



Olivier Salvi

## PERSPECTIVES EUROPÉENNES SUR LA SÉCURITÉ

# TRANSITION VERS LE PROGRAMME HORIZON 2020

L'année 2012 aura vu la publication des derniers appels du 7<sup>e</sup> programme-cadre de recherche et développement de l'Union européenne avant le lancement du programme **Horizon 2020**<sup>1</sup> en 2014. Ce nouveau programme permettra la mise en œuvre de l'initiative phare Union de l'innovation, élaborée en application de la stratégie européenne Europe 2020 (<http://ec.europa.eu/europe2020>). La **stratégie européenne Europe 2020** définit également les objectifs de recherche et d'innovation qui permettront de renforcer la position de l'Union européenne sur la scène économique internationale. Cette stratégie est organisée autour de quatre priorités :

- **une croissance intelligente**, basée sur l'innovation soutenue par la recherche;
- **une croissance durable**, respectant les ressources de la planète et l'environnement;
- **une croissance inclusive**, luttant contre les inégalités;
- **une gouvernance économique**, visant à plus de stabilité au sein de l'Union européenne.

La sécurité industrielle et la sécurité environnementale sont au cœur de la stratégie européenne, à la fois pour garantir que l'innovation technologique ne fera pas courir de nouveaux risques non maîtrisés, et aussi pour développer des solutions innovantes en matière de sécurité, permettant d'atteindre une croissance durable. La sécurité est ancrée dans les valeurs européennes et l'Europe se doit d'être exemplaire en favorisant des innovations propres et sûres, et pour déployer rapidement des technologies industrielles économes en énergie et en ressources.

La communauté scientifique concernée par les questions de sécurité s'est organisée pour faire valoir ses connaissances et ses expertises dans la résolution des défis sociétaux **table 1**.

**Table 1 - Les défis sociétaux de l'Union européenne.**

- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Santé, changement démographique et bien-être</li> <li>• Énergie propre, efficace et sûre</li> <li>• Transport intelligent, vert et intégré</li> <li>• Action climatique, efficacité des ressources et matières premières</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• L'Europe dans un monde de changement – une société inclusive, innovante et réfléchie</li> <li>• Sécurité de l'Europe et de ses citoyens, protégeant les libertés</li> </ul> |
|--|--|

➔ La clé du succès passe par une intégration des savoirs pluridisciplinaires dans le développement de solutions technologiques et par une utilisation des résultats des évaluations des risques dans les processus de décision qui s'opèrent au niveau de l'industrie et dans les politiques publiques. Cela nécessitera une ouverture accrue vers les domaines d'application et une capacité à convaincre de la valeur ajoutée de l'investissement en sécurité. La démarche sera d'autant plus efficace que les décideurs publics ou privés pourront utiliser des outils éprouvés.

### Les thématiques de sécurité dans les défis sociétaux

La stratégie Europe 2020 ainsi que le programme Horizon 2020 ont été élaborés selon une approche *top-down*, centrée sur la résolution de défis sociétaux sélectionnés et formalisés par le Conseil européen<sup>2</sup>. Ils structurent notamment les stratégies de recherche et définissent des objectifs communautaires clairs.

La résolution de ces défis est une priorité pour l'Union européenne et l'investissement en recherche et innovation devra permettre d'apporter des réponses concrètes avec des bénéfices pour la société européenne, notamment à travers un renforcement de la compétitivité industrielle.

L'INERIS, qui assure le secrétariat général de la Plateforme technologique européenne en sécurité industrielle (ETPIS, <http://www.industrialsafety-tp.org>), a pris en main la coordination de l'initiative SafeFuture – l'innovation sûre pour un futur durable et compétitif – qui vise à couvrir le volet sécurité dans la résolution des défis sociétaux.

L'initiative SafeFuture a aussi été développée selon une approche *top-down* focalisée sur la résolution des défis sociétaux de l'Union européenne, sur les priorités du High Level Group de l'ETPIS **table 2**, composé de leaders européens de la sécurité industrielle, et sur une analyse approfondie des besoins en matière de sécurité et gestion des risques exprimés dans les rapports de référence tels que :

- World Economic Forum – *Global Risk Report 2010*<sup>3</sup> and *Global Risk Report 2011*<sup>4</sup>;
- OECD – *Future Global Shocks*<sup>5</sup>;
- IRGC (International Risk Governance Council) – *Risk Governance Deficits*<sup>6</sup>;
- EU-OSHA – *European Survey of Enterprises on New and Emerging Risks (ESENER)*<sup>7</sup>, 2010.

L'initiative SafeFuture<sup>8</sup> est organisée autour de quatre piliers :

- **infrastructures sûres**, pour traiter : de l'extension de la durée de vie des usines, des infrastructures de transport, des centrales énergétiques, des plateformes offshore; de l'intensification des catastrophes naturelles dues au changement climatique; du design et de la surveillance pour l'exploitation à long terme des installations de stockage du dioxyde de carbone; de la protection et de la sûreté des infrastructures critiques, etc.
- **énergie sûre**, pour traiter : de la sécurité de l'utilisation de nouveaux vecteurs énergétiques pour les véhicules (FEV, piles à combustible, CNG, biogaz, biocarburants, etc.) ; de la sécurité des technologies associées aux énergies renouvelables (éoliennes, panneaux photovoltaïques et puissance solaire concentrée – *concentrating solar power (CSP)* –; de la compatibilité des infrastructures souterraines de transport



**Table 2 - Membres du High Level Group d'ETPIS.**

- |   |   |
|---|---|
| • Wolfgang Gerhardt (Chairman), BASF, Vice President and Director HSE | • Tim Tregneza, European Agency for Safety and Health at Work                                     |
| • Philippe Klein, EDF R&D, Head of Risk Management Department         | • Reto Schneider, Swiss Re, Head Emerging Risk Management   |
| • Antonio Moreno Ucelay, Iberdrola, Director HSE                      | • Oliver Polanz, Hochtief, Head of Occupational Safety Health and Environmental Protection Center |
| • Tor Ulleberg, StatOil, Vice President Technology & New Energy       | • Eusebio Gainza Lafuente, Praxis Pharma, Scientific Director                                     |

avec les nouvelles énergies; de la combinaison des infrastructures paneuropéennes et du réseau de distribution d'électricité « intelligent » (*smart high power electricity grids*);

- **produits et production sûrs**, pour traiter : du développement de l'usine du futur (*European factories of the future*), en gérant les risques émergents grâce à des solutions intégrées (systèmes de sécurité avancés, équipements de protection individuels intelligents, nouveaux modèles organisationnels pour la sécurité, ergonomie augmentée, etc.); de l'accroissement de la productivité grâce à un meilleur environnement de travail et au bien-être des travailleurs; de la sécurité des emplois verts; de l'utilisation en toute sécurité de nanomatériaux;

- **thématiques transversales**, pour résoudre les défis d'intégration, d'interaction et de gouvernance des risques, tels que les difficultés à concilier des politiques sectorielles de maîtrise des risques et d'assurer leur compatibilité (concept de transferts de risques – *Risk-risk trade-offs*), approches multirisques et interdépendance des risques dans des marchés compétitifs.

Via l'initiative SafeFuture, l'INERIS s'investit sur la définition précise des besoins et sur la préparation de réponses sous forme de projets en partenariat public-privé, lancés sous l'égide de partenariats européens de l'innovation, qui regroupent des industriels, des centres de recherche et des universités, les autorités de régulation ainsi que des organisations non gouvernementales. L'INERIS participe au partenariat de l'innovation sur les matières premières<sup>9</sup> et prépare une initiative analogue sur la maîtrise des risques émergents basée sur les résultats du programme iNTeg-Risk ([www.integrisk.eu-vri.eu/](http://www.integrisk.eu-vri.eu/)).

### Notes

- [http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/research/horizon2020/index_en.cfm)
- DS 1505/12 dated 09/07/2012, *Proposal for a council decision establishing the specific programme Implementing Horizon 2020 - The framework programme for research and innovation (2014-2020)*.
- [www3.weforum.org/docs/WEF\\_GlobalRisks\\_Report\\_2010.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2010.pdf)
- <http://riskreport.weforum.org/>
- [www.foresight-platform.eu/wp-content/uploads/2010/06/2.2-Schieb-eofForesightViennaJune14.pdf](http://www.foresight-platform.eu/wp-content/uploads/2010/06/2.2-Schieb-eofForesightViennaJune14.pdf)
- [www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC\\_rgd\\_web\\_final.pdf](http://www.irgc.org/IMG/pdf/IRGC_rgd_web_final.pdf)
- <http://osha.europa.eu/en/riskobservatory/enterprise-survey/enterprise-survey-esener>
- SafeFuture - *Safe innovation for a competitive and sustainable future*. [www.industrialsafety-tp.org/](http://www.industrialsafety-tp.org/)
- [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/index_en.htm)

### Importance d'une approche globale intégrée de gestion des risques mobilisant une expertise pluridisciplinaire

L'INERIS est sensible à la nécessité de combiner les expertises. C'est ce qui fait sa force pour résoudre des questions complexes – dans le domaine de la sécurité industrielle et de la sécurité environnementale –, posées par l'industrie ou par les pouvoirs publics et identifiées dans son contrat d'objectifs.

L'Institut regroupe des experts dans plusieurs disciplines, impliqués dans des projets européens de grande envergure et stratégiques tels que I<sup>2</sup>mine (*Innovative technologies and concepts for the intelligent deep mine of the future*, [www.i2mine.eu/](http://www.i2mine.eu/)), COSMOS (*Integrated in silico models for the prediction of human repeated dose toxicity of cosmetics to optimise safety*, [www.cosmostox.eu/](http://www.cosmostox.eu/)), GREENLAND (*Gentle remediation of trace element contaminated land*, [www.greenland-project.eu/](http://www.greenland-project.eu/)), DEMCAMER (*Catalytic membrane reactors*, [www.demcamer.org/](http://www.demcamer.org/)) ou NANOSTAIR (*Establishing a process and a platform to support standardization for nanotechnologies implementing the STAIR approach*, [www.nanostair.eu-vri.eu/](http://www.nanostair.eu-vri.eu/)).

L'Institut travaille en réseau, notamment grâce à son implication dans le GEIE EU-VRI (*European Virtual Institute for Integrated Risk Management*, [www.eu-vri.eu](http://www.eu-vri.eu)), dont il est membre fondateur. EU-VRI offre la base de partenariats public-privés, puisque ce groupement rassemble 50 compagnies réparties sur 22 pays et dont 60 % sont issus du secteur privé.

Travailler en réseau en combinant les expertises et les expériences confère à l'INERIS un avantage unique pour ressourcer les connaissances scientifiques, tout en restant attentif aux futurs challenges en matière de sécurité, qui nécessiteront des connaissances sur les procédés et les phénomènes, mais aussi sur les processus de décision dans une dynamique complexe de changement perpétuel. ●

## Abstract

The Horizon 2020 programme is aimed at implementing the Innovation Union flagship initiative of the Europe 2020 Strategy, which is organized around four priorities: smart growth; sustainable growth; inclusive growth; economic governance. Industrial and environmental safety constitute a cross-cutting field of knowledge which provides an important added value in all European industry sectors, especially with the aim to develop sustainable technologies and products. Safety, security and sustainability are considered as key factors for successful business and an inherent element of business

performance. The European Technology Platform on Industrial Safety (ETPIS) has structured the contribution from the safety community to support the Europe 2020 Strategy with the SafeFuture initiative. INERIS which acts as ETPIS general secretary plays a leading role in this initiative. SafeFuture has been developed by taking into account the top priorities expressed by ETPIS high level group gathering representatives from several industry sectors and focusing on the EU societal challenges (climate change, greening of transport, sustainable energies...). SafeFuture has been also inspired by recent reference reports describing the needs and gaps in terms of

improved safety and risk management (OECD, IRGC, EU-OSHA, WEF...). It is structured around four pillars: safe infrastructure; safe energy; safe products and production; transversal issues. Through SafeFuture, INERIS contributes to define the research roadmap and initiates projects built on public-private partnerships such as the innovation partnership on raw materials and another similar action dealing with emerging risk management (European Emerging Risks Radar, [www.integrisk.eu-vri.eu](http://www.integrisk.eu-vri.eu)). Combining knowledge from various disciplines and working in network, as INERIS does, is a key success factor for sustainability and competitive growth.

Contributeur



Isabelle Zdanevitch

## COMPOSITION DU BIOGAZ ISSU DE LA MÉTHANISATION ET DES ÉMISSIONS DE MOTEURS DE VALORISATION

**L**e biogaz produit par fermentation anaérobie des substances organiques (déchets) représente une source d'énergie alternative renouvelable. Son utilisation des déchets peut contribuer à une réduction substantielle du volume des déchets organiques et favoriser leur valorisation. Le biogaz produit peut être utilisé sur site afin de générer de l'électricité ou de la chaleur, ou être épuré pour servir de carburant ou pour être injecté dans un réseau de distribution de gaz naturel. Cependant, cette énergie étant produite à partir de déchets, son utilisation requiert de connaître sa composition, les émissions qui découlent de sa valorisation et les risques associés.

L'INERIS conduit depuis plusieurs années des études sur les risques chroniques et accidentels liés aux procédés de méthanisation des déchets, tant pour les pouvoirs publics que pour des industriels. Dans ce cadre, depuis le début des années 2000, l'Institut a étudié la composition de différents types de biogaz en vue de leur valorisation. Une étude conduite en 2002 [A] a ainsi permis de rassembler des données issues de la littérature et de les compléter par une campagne de mesures sur des biogaz bruts et sur les émissions de procédés de combustion de ces biogaz (moteurs, chaudières, torchères) sur différents types de sites de traitement de déchets : installations de stockage, méthanisation de déchets agricoles, de papeterie, etc. Cette étude a été complétée en 2007 par la recherche de données supplémentaires issues de la littérature.

Ainsi, 17 publications pertinentes ont été étudiées en détail. Elles concernaient principalement des biogaz issus de centres de stockage de déchets ménagers, mais aussi des biogaz issus de la méthanisation en digesteur de différents déchets ménagers, agricoles ou issus d'industries agroalimentaires. Des données d'analyses de biogaz résultant de la méthanisation ont également été collectées par l'INERIS auprès de sites industriels.

Le biogaz est principalement constitué de méthane et de gaz carbonique, et d'autres constituants mineurs (vapeur d'eau, hydrogène, hydrogène sulfuré, ammoniac, composés organiques volatils ou COV, etc.). Plus de 250 composés ont été identifiés dans les différents biogaz : organohalogénés, hydrocarbures aromatiques monocycliques et polycycliques, alkyles, alcools, oléfines, esters, éthers, composés soufrés, siloxanes, métaux, etc. La somme de ces composés représente généralement moins de 5 % v/v du biogaz avant traitement. Dans le cadre des travaux faisant suite au Grenelle de l'environnement et compte tenu du développement de la filière, le ministère chargé de l'Écologie a demandé à l'INERIS d'étudier plus spécifiquement la qualité des biogaz issus

### Références

- ① INERIS. *Caractérisation des biogaz*. Bibliographie, mesures sur sites, Rapport INERIS (2002). Réf. DRC-02-27158-AIRE-n°316b-JPo.
- ② INERIS. *Étude de la composition du biogaz de méthanisation agricole et des émissions en sortie de moteur de valorisation*, Rapport (2009a) DRC-09-94520-13867A.
- ③ Afsset. *Risques sanitaires du biogaz. Évaluation des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel*. Avis de l'Afsset, Rapport d'expertise collective, octobre 2008.
- ④ Naja G.-M., Alary R., Zdanevitch I. *Assessment of biogas potential hazards*. Renewable Energy 2011, 36, pp. 3445-3451.
- ⑤ INERIS. *Risques sanitaires liés à l'injection de biogaz issu de boues de STEP dans un réseau de gaz naturel – Travaux préliminaires*. Réf. DRC-09-104115-15569A (2009b).



**Photo 1**  
Digesteurs agricoles.



d'installations de méthanisation agricole et de quantifier les émissions atmosphériques des moteurs de valorisation de ces biogaz. L'étude a consisté, dans un premier temps, à réaliser une synthèse bibliographique et réglementaire, complétée par des mesures sur trois installations de capacités diffé-

rentes [B]. Elle a ensuite été complétée par des mesures sur trois sites supplémentaires, en 2010-2011 ; les caractéristiques des sites sont données en [tableau 1](#). Les principaux résultats sont reportés en [tableau 2](#). L'ensemble de ces résultats d'études a conduit l'INERIS ➡

**Tableau 1** - Caractéristiques des six sites de méthanisation agricole étudiés entre 2008 et 2011.

Production de biogaz (m <sup>3</sup> /h)	17 à 170
Puissance électrique du (des) moteur(s) (kWe)	27 à 615 (sur 2 moteurs)

**Tableau 2** - Teneurs des principaux constituants du biogaz et des émissions des moteurs, mesurés sur six sites de méthanisation agricole.

Constituants	Biogaz	Émissions des moteurs
CH <sub>4</sub> (% vol)	50,8 à 70	370 à 2 000 mg/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub> (% vol)	16,7 à 39,5	9,6 à 18,7 <sup>(3)</sup>
CO (mg/m <sup>3</sup> )	4 à 56	423 à 929
H <sub>2</sub> S (ppm)	< 15 à 740	< 15
SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	0,16 à 12,4	1,6 à 175
NH <sub>3</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	0,13 à 40,7	0,12 à 1,8
NO <sub>x</sub> (mg éq. NO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	-	226 à 4 939
Poussières (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	-	0,35 à 6,56
Dioxines (pg l. TEQ/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	1,8 à 3	2,55 à 3,95
HAP (8 éléments - µg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	< 2,0	< 0,8 à 0,99
HCl (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	0,02 à 0,06	0,04 à 0,17
HF (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup>	< 0,2	< 0,2
Somme des COV (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(2)</sup>	2 à 47	0,4 à 9
Somme des aldéhydes-cétones (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>(2)</sup>	< 2 à 40 <sup>(4)</sup>	28 à 39 <sup>(5)</sup>

1. Mesurés sur les trois premiers sites. 2. Mesurés sur les trois derniers sites. 3. La combustion se faisant en excès d'air, le complément est constitué principalement d'azote. 4. Composé majoritaire: butanone. 5. Composé majoritaire: formaldéhyde.



**Photo 2**

Réservoirs de biogaz épuré (centre de valorisation organique de Lille-Sequedin).

➔ à contribuer à l'expertise collective pilotée par l'Afsset<sup>1</sup>, en 2007-2008, sur les risques sanitaires liés à l'injection de biogaz épuré en réseau de gaz naturel. Ces travaux, centrés sur les déchets ménagers et agricoles, ont fait l'objet d'un avis et d'un rapport de l'Afsset publiés en octobre 2008 [C] et d'un article publié en 2011 [D]. Pour ce qui concerne la méthanisation des boues de station d'épuration, l'INERIS a également réalisé une collecte de données de composition du biogaz auprès des industriels du traitement de l'eau [E], suivie d'une campagne de mesures sur le biogaz brut et épuré d'une station d'épuration française. Ces données ont été fournies en 2011 à l'Anses en vue du traitement de la deuxième saisine de l'Agence sur les risques sanitaires liés à la valorisation du biogaz issu de ce type d'installations. L'ensemble de ces travaux sur la méthanisation et la connaissance approfondie, sur le terrain, de nombreuses installations de méthanisation de toutes tailles et de tous types a permis à l'INERIS d'accompagner depuis 2009 l'évolution de la réglementation des installations classées relative aux installations de méthanisation (prescriptions

générales sur les installations et émissions liées à la combustion du biogaz). Dans ce cadre, le ministère chargé de l'Écologie a sollicité l'Institut pour constituer un Observatoire du fonctionnement des installations de méthanisation. Cet observatoire devrait regrouper des retours d'expérience provenant des exploitants eux-mêmes, contribuant ainsi à vérifier le bon fonctionnement des installations existantes et à permettre le déploiement de cette filière en toute sécurité. ●

## Note

1. Actuellement Anses: Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

## Abstract

The biogas produced by anaerobic digestion of organic substances is a renewable energy source. Its production contributes to a reduction in the volume of organic waste and contributes to organic matter recycling. The biogas produced can be used to provide electricity or heat, or be purified to be injected into a distribution

network of natural gas. INERIS studied the composition of different types of biogas since the early 2000s. Bibliographical studies were complemented by measurement campaigns at different sites, in order to study the quality of the biogas and the emissions of gas engines used for producing electricity and heat. Beside the major compounds (methane, CO<sub>2</sub>), over

250 compounds have been identified and quantified. These compounds represent less than 5% of the biogas before purification. The studies on composition of biogas and engine emissions, as well as the extended knowledge of many biogas plants of all sizes were used by INERIS since 2009 to contribute to the evolution of regulations relating to anaerobic digestion plants.

## Contributeurs



Amandine Lecocq



Guy Marlair



Delphine Tigreat

## ACCOMPAGNEMENT À LA MAÎTRISE DES RISQUES ACCIDENTELS ASSOCIÉS AUX APPLICATIONS INNOVANTES DES BATTERIES AU LITHIUM-ION

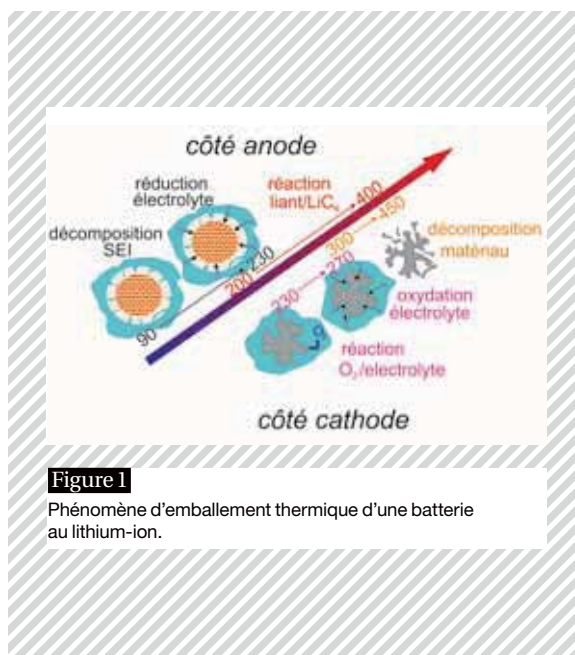


Figure 1

Phénomène d'emballement thermique d'une batterie au lithium-ion.

Dans le développement durable de nouvelles filières de stockage propres et sûres d'énergie, nécessaires à la promotion de l'électromobilité et des applications stationnaires, la prise en compte de la sécurité reste un enjeu important. En témoignent les nombreuses initiatives prises aux États-Unis, au Japon ainsi qu'en Europe, pour approfondir les connaissances permettant la maîtrise de ces risques, dans les différents contextes d'utilisation de ces batteries et sur toutes leurs chaînes de valeur. Une sécurité plus délicate à assurer est en effet la conséquence d'un potentiel de performance (densité d'énergie, puissance spécifique) notablement plus grand que celui offert par les technologies antérieures (batteries acide-plomb, cadmium-nickel...). Le phénomène dangereux atypique qu'il convient de contrôler est, dans la plupart des scénarios d'intérêt, l'emballement thermique **figure 1** potentiellement amorçable par sollicitations thermique, mécanique ou électrique abusives. Il s'agit en particulier de viser les objectifs suivants: ➡

### Références

Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G. *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*. Communication au congrès FIVE 2012 (2<sup>nd</sup> International Conference on fires in vehicles), Chicago (MI), USA, 27-28 September 2012.

Marlair G., Lisbona D. *Protection issues pertaining to large storage of new and used lithium-based batteries*. High Challenge Storage Protection Workshop, NFPA/FPRF, 27 June 2012, Paris, France.

Durso Jr F., *Lithium-ion Battery hazards*. NFPA Journal, March-April 2002, pp. 44-50.

Bertana M., Tigreat D., Marlair G., Demissy M. *Nanotechnologies in batteries, a new challenge toward safety?* The young engineers scientists symposium (YESS 2012), March 22, 2012, Berkeley, USA.

Lecocq A., Bertana M., Truchot B., Marlair G. *Fire tests on vehicles with electric and combustion engines*. International Association for Fire Safety Science Newsletter, 32, April 2012.

Ribière P., Grugeon S., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. *Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry*. Energy Environ Sci, 2012, 5, pp. 5271-5280.

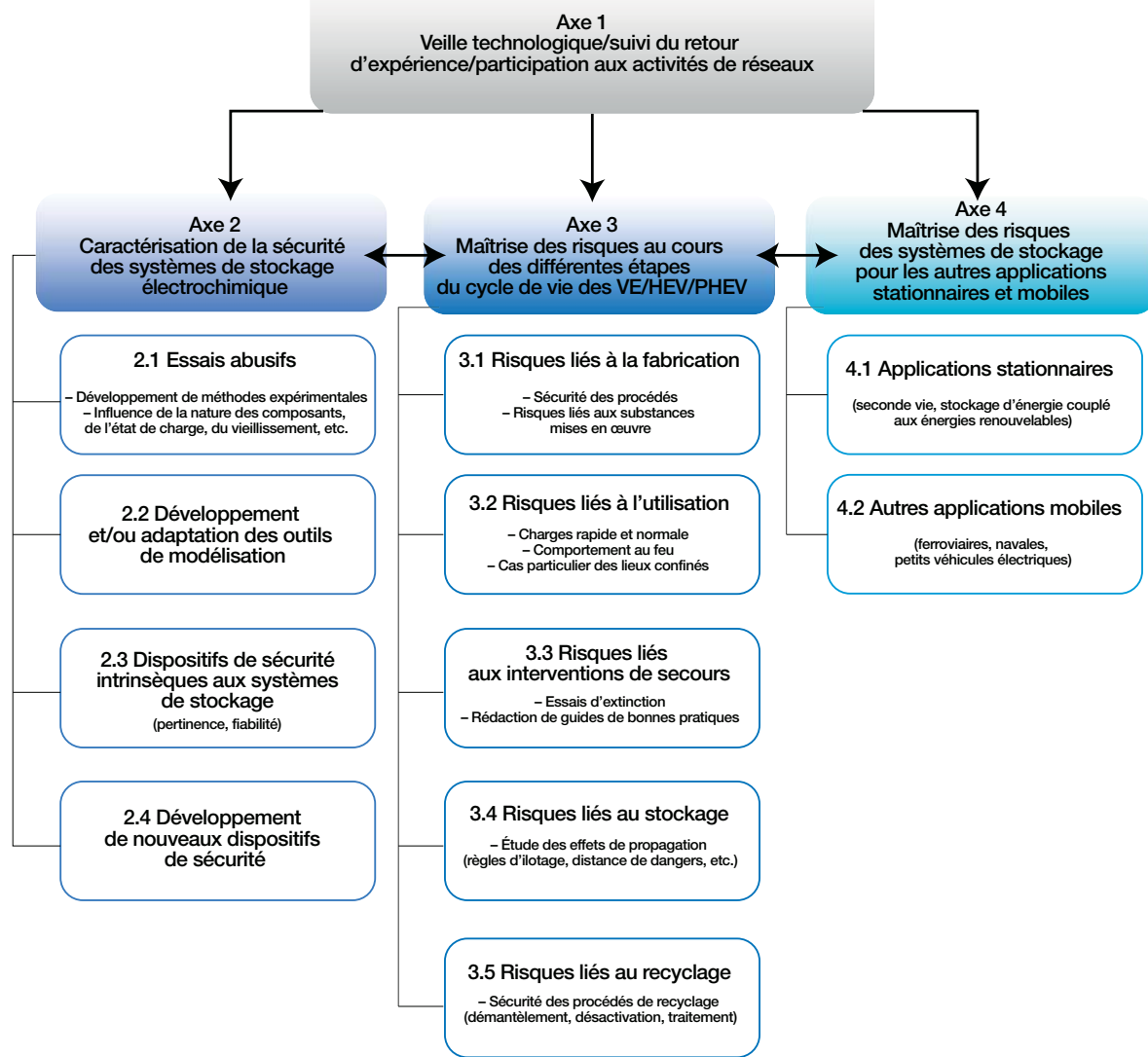
Marlair G., Demissy M. *Safety issues pertaining to rechargeable Li-based batteries: Current knowledge from literature review and abuse testing and perceived remaining topics*. Communication invitée au colloque « La sécurité des batteries à ions lithium : possibilité de risque zéro ? », Collège de France, réseau RS2E, 7 novembre 2011.

Ribière P., Grugeon S., Gachot G., Mathiron D., Morcrette M., Boyanov S., Laruelle S., Marlair G. *Safety and aging investigation toward an understanding of electrolyte degradation processes*. ABAA-4 Congress, Beijing (China), September 21-23, 2011.

Mikolajczak C., et al. *Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Exponent, prepared for the Fire Protection Research Foundation, July 2011.

Dupont L., Marlair G. *Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques. Analyse préliminaire des risques*. Rapport d'étude INERIS, juin 2011.

Ribière P., Grugeon S., Laruelle S., Morcrette M., Tarascon J.-M., Marlair G., Bertrand J.-P., Paillart A. *Lithium-ion battery: safety tests*. Proceedings of AABS Congress, Mainz (Germany), Feb. 2-5, 2010.



**Figure 2**

Logigramme de feuille de route recherche « sécurité des batteries », mise en place dans le cadre de la structuration de la recherche à l'INERIS.

- ➔ • **mieux connaître la phénoménologie** et les conséquences d'une défaillance induite au niveau d'une cellule élémentaire de batterie au Li-ion dans son environnement;
- **développer des outils** permettant de mieux qualifier ou prédire le développement des désordres internes à un module de batterie lorsqu'une cellule devient défaillante;
- **d'une manière plus globale, progresser dans la définition des mesures de prévention et de protection** à mettre en place sur toute la chaîne de valeurs de ces technologies et mieux orienter les progrès technologiques envisageables.

Acteur de cette recherche depuis quelques années déjà à l'échelle internationale (programme HELIOS, cf. [site www.helios-eu.org](http://www.helios-eu.org)), et en partenariat avec des membres du réseau RS2E<sup>1</sup>, l'INERIS vient de structurer davantage cet effort de recherche en mettant en place un axe stratégique de recherche

spécifique sur la sécurité des nouveaux systèmes de stockage d'énergie électrique où les technologies lithium constituent la majorité des systèmes en devenir **figure 2**.

Par ailleurs, depuis qu'elle est rendue opérationnelle, la plateforme STEEVE Sécurité **figure 3**, qui rassemble tout un arsenal de moyens expérimentaux dédiés à l'évaluation des risques de ces systèmes au service des acteurs du marché, renforce en même temps les moyens techniques plus polyvalents (chambre de 80 m<sup>3</sup>, calorimètre de Tewardson, galerie incendie) jusqu'ici sollicités pour ces travaux de recherche. Le calorimètre de Tewardson (ISO 12136: 2011) a en particulier été mis en œuvre en partenariat avec l'UPJV<sup>2</sup> (LRCS<sup>3</sup>) pour étudier de manière globale le comportement au feu de cellules Li-ion élémentaires de type cylindrique (18650) et de type *coffee-bag* et d'en dresser les premiers profils de risques thermique et

**Notes**

1. Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie.
2. Université de Picardie Jules-Verne.
3. Laboratoire de réactivité et de chimie des solides.





Figure 3

La plateforme d'innovation technologique STEEVE Sécurité.

chimique, dans le cadre d'une thèse intégrée au programme BatteryNanoSafe, à présent terminé. Grâce à ce programme, un axe de progrès technologique a pu être identifié, qui tient à la présence de l'élément fluor dans deux des principaux constituants de ce type de batterie, à savoir le liant de type PVDF qui assure la cohésion du matériau d'électrode positive sur le collecteur de courant en aluminium, ainsi que le sel (quasi exclusivement LiPF<sub>6</sub> aujourd'hui dans les systèmes Li-ion). En effet, comme c'est bien souvent le cas pour d'autres applications de matériaux halogénés (Cl, F), le potentiel de conversion de cet élément en toxiques halogénés associé (ici HF essentiellement) est très significatif au point de pouvoir conditionner, dans certains cas à lui tout seul, la toxicité de l'environnement. Nous avons démontré que ce potentiel pouvait avoisiner les 100 % à l'échelle de l'électrolyte à partir du bilan matière sur le fluor. Ce constat est néanmoins à pondérer pour deux raisons. Sur un plan métrologique, la mesure des composés fluorés produits en condition d'incendie reste une opération délicate et notre expérience opérationnelle nous a conduits à consolider la calibration du système de mesure utilisé (spectromètre à transformée de Fourier) pour progresser dans cette voie et fiabiliser la mesure à 100 %.

Sur le plan pratique, l'exposition aux fumées d'incendie se situe potentiellement en aval du lieu d'émission des fumées dans la zone de combustion. La dilution du composé toxique HF, formé majoritairement à partir du fluor, est considérablement aidée par la capacité de ce composé à s'absorber en chemin sur la quasi-totalité des supports physiques (métaux, verre, matériaux polymères,

particules de suie). De plus, la cinétique d'émission est potentiellement fortement conditionnée par le taux de charge de la batterie. En tout état de cause, et pour certaines applications grand public, le développement de systèmes d'électrodes et d'électrolytes, à moindre teneur en fluor, semble un axe de progrès technologique intéressant à explorer en matière de sécurité d'usage de tels systèmes.

Enfin, dans le cadre de notre participation au comité de suivi scientifique et technique des travaux lancés aux États-Unis pour le compte de la fondation de recherche de la National Fire Protection Association (NFPA), nous avons pu constater que la revue bibliographique, visant à consolider l'état de l'art sur les dangers des batteries au lithium-ion, publiée en juillet 2011, est très conforme aux conclusions de notre propre étude sur le sujet, mise en ligne sur le site Internet du ministère chargé de l'Écologie. Ce programme de travail, confié sur appel d'offres à la société américaine Exponent, fait à présent l'objet d'une seconde phase de travaux, dont le pilotage est assuré par FM Global, disposant d'installations expérimentales sans équivalent dans le domaine de l'évaluation du risque incendie et des moyens de protection. Dans ce contexte, des experts de l'INERIS iront prochainement assister aux premiers travaux expérimentaux visant à examiner la faisabilité d'une protection automatique dans le cas d'un entreposage en masse de batteries au lithium. En effet, à l'occasion du congrès portant sur les nouveaux enjeux en matière de protection dans les stockages, qui s'est récemment tenu sous l'égide de la NFPA à Paris en juin 2012, et à l'organisation duquel l'INERIS a été associé, les assureurs ont clairement reconnu à la table ronde finale que la profession manquait de données pour dimensionner les installations de protection incendie pour les batteries au lithium. Notre contribution à ces efforts de recherche se poursuit dans la logique des travaux antérieurs, notamment dans le cadre du programme régional dénommé DEGAS – financé par le conseil régional de Picardie et le Fonds européen de développement régional (FEDER) –, où nous examinons de manière plus pointue le comportement au feu des batteries à l'échelle des divers constituants (essais de combustion des solvants, seuls et en mélange constitutif des principaux électrolytes de batteries). Au niveau international, d'autres opportunités de recherches collaboratives ont d'ores et déjà été concrétisées dans le cadre de récents appels d'offres européens portant sur la thématique. ●

### Remerciements

Les projets BatteryNanoSafe et DEGAS ont bénéficié ou bénéficient de financements du conseil régional de Picardie et du FEDER.

### Abstract

Sustainable development of innovative electric energy storage systems are needed for both mobile and stationary applications. With increased energy and power densities obtained with lithium metal and ion systems, that trigger some atypical hybrid hazard in case of abuse

conditions of use, handling or storage, safety focused has been recently promoted at a world-wide level. We briefly update here how far INERIS contributes at national as well as at international level to this research effort, focusing on how this effort has been recently restructured and outlining some important results. Perspectives are also shortly given.



## Contributeurs



Christophe Didier



Mehdi Ghoreychi



Pierre Toulhoat

# GESTION DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX LIÉS À L'EXPLOITATION DES HYDROCARBURES DE ROCHE MÈRE

On appelle « gaz et huile de roche mère » (GHRM), les hydrocarbures retenus au sein de la roche où ils ont été générés. Ils se différencient des hydrocarbures ayant migré dans le temps pour s'accumuler, lorsque le contexte géologique l'a permis, au sein de « réservoirs conventionnels » constitués de roches poreuses exploitées à l'aide de techniques « classiques » (forage, puis pompage). Parmi les hydrocarbures de roche mère, les « gaz et huiles de schistes » focalisent aujourd'hui toutes les attentions. Suite au développement de technologies spécialisées (notamment forages dirigés et développement de la fracturation hydraulique),

## Notes

1. Dans les faits, le terme « schiste » présente un sens très large (toute roche susceptible de se déliter en feuillets) et il pourrait être plus juste de lui privilégier le terme anglo-saxon de *shale* qui traduit mieux l'origine sédimentaire argileuse ou marneuse des roches en question, très différentes des schistes.
2. IFP Énergies nouvelles.
3. Bureau de recherches géologiques et minières.

## Références

Didier C., Ghoreychi M., Toulhoat P. *La maîtrise des risques émergents: le cas des hydrocarbures non conventionnels*. Annales des Mines, Responsabilité & Environnement. n° 64, octobre 2011.

EPA. *Draft plan to study the potential impacts of hydraulic fracturing on drinking water resources*. EPA/600/D-11/001/ February 2011/[www.epa.gov/research](http://www.epa.gov/research), 140 p.

Howarth RW., Ingraffea A., Engelder T. *Natural Gas: should fracking stop?* Nature, 2011, 477, pp. 271-275.

Rapport BRGM-IFPEN-INERIS. *Maîtrise des impacts et risques liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche mère: enjeux, verrous et pistes de recherche*. 2011.

l'exploitation des gaz de schistes a en effet pris un essor considérable aux États-Unis durant la dernière décennie.

Si d'autres pays présentent, *a priori*, d'importantes ressources potentielles non exploitées (Chine, Mexique, Pologne et France notamment), diverses interrogations émergent sur la capacité de maîtriser les risques environnementaux en cas d'exploitation de ces ressources. Ces questions se cristallisent autour de la technique mise en œuvre pour libérer le gaz piégé dans la matrice rocheuse: la fracturation hydraulique.

## La technique de fracturation hydraulique

La technique de fracturation hydraulique consiste à fracturer une roche très compacte dont la faible perméabilité n'a pas permis la migration de toutes les substances piégées en son sein **figure 1**. Elle exige d'injecter dans le sous-sol un fluide sous des pressions suffisamment élevées pour induire la fracturation du massif rocheux. On ajoute à l'eau du sable ou des billes pour maintenir les fractures ouvertes ainsi que divers additifs chimiques pour faciliter la fracturation et l'écoulement du gaz. Afin d'accéder aux zones à fracturer, des puits verticaux sont forés, prolongés par un ou plusieurs forages horizontaux au sein de la roche mère. L'extension des fractures induites étant généralement limitée, il faut forer différents puits pour exploiter un vaste secteur géographique. Une fois la roche fracturée, le fluide de fracturation est extrait autant que possible afin d'être traité et éventuellement réutilisé. Le forage affiche un pic de production durant les premiers mois, puis une décroissance progressive durant les années suivantes. Il est alors abandonné et d'autres sont forés aux alentours pour poursuivre l'exploitation.

## Des verrous scientifiques à lever

En France, comme dans beaucoup d'autres pays, la possible exploitation des gaz et huiles de schistes est au cœur d'une vive polémique qui anime l'opinion publique. Aux possibles intérêts économiques (emplois, baisse du coût de l'énergie) et stratégiques (réduction de la dépendance énergétique) s'opposent de sérieuses interrogations environnementales et sanitaires (risque de pollution des nappes aquifères, notamment).

L'INERIS dispose sur ce sujet d'une expertise intégratrice, transversale aux différentes problématiques concernées (risques souterrains, toxicité et écotoxicité des substances chimiques, risques technologiques, installations de surface). L'Institut n'a pas vocation à se prononcer sur le bien-fondé ou non de la filière. Il constitue un acteur clé dont la mission consiste à éclairer les décideurs sur les risques et la faisabilité de leur maîtrise.

Auditionné par différentes missions scientifiques, stratégiques ou parlementaires, tant nationales qu'internationales, l'Institut a également été missionné par le ministère chargé de l'Écologie pour élaborer, en partenariat avec l'IFPEN<sup>2</sup> et le BRGM<sup>3</sup>, un rapport de synthèse présentant l'état de l'art et identifiant les principaux enjeux d'expertise et de recherche qui permettraient de lever les verrous scientifiques ou techniques qui persistent sur la problématique.

## Maîtriser les risques sur le massif rocheux

L'étanchéité des forages constitue l'un des éléments clés pour limiter le risque de fuites de contaminants vers le milieu environnant. Le retour d'expérience disponible sur les activités de stockage souterrain le confirme. Les deux éléments clés qui contribuent à l'étanchéité d'un forage sont respectivement les *casings* (tubages qui isolent le forage des formations

géologiques environnantes) et la « cimentation » (coulis injectés en périphérie extérieure des tubages pour assurer l'étanchéité de l'ouvrage). Les conditions de réalisation, de contrôle, d'exploitation et de suivi de ces éléments méritent une attention toute particulière dans le cas de recours systématique à des travaux de fracturation hydraulique. De même, la question du comportement à long terme des forages devra également être considérée avec la plus grande attention.

Le deuxième secteur d'intérêt concerne la zone d'injection au sein de laquelle se développent les fractures. Pour optimiser l'exploitation tout en limitant les risques, il convient que les fractures se développent sur des distances et des surfaces suffisamment importantes, tout en évitant qu'elles ne se propagent jusqu'à des discontinuités (failles, discordances) susceptibles d'autoriser la mise en communication des fluides de production avec des couches plus perméables. Une meilleure maîtrise du procédé passe par une amélioration de la compréhension et des capacités de prédiction des phénomènes d'initiation et de propagation des fissures ainsi que par le recours à des outils de surveillance, en particulier la technique d'écoute microsismique passive.

Enfin, une réflexion approfondie mérite d'être engagée pour mieux comprendre les conditions d'apparition de « séismes induits », non systématiques, mais régulièrement mis en évidence au Texas, en Arkansas et, récemment, dans la région de Blackpool (Grande-Bretagne).

### Maîtriser les impacts sur la ressource en eau

La grande majorité des situations accidentelles répertoriées aux États-Unis a concerné la pollution des aquifères (produits chimiques ou hydrocarbures), dont l'origine peut provenir de migrations dans le sous-sol (fuites de forages, zones faillées) ou résulter de défaillances en surface qui ont pour conséquence l'écoulement de substances vers les nappes aquifères.

L'une des priorités est donc de maîtriser l'emploi d'additifs appropriés permettant de limiter le recours à des substances dangereuses pour l'homme et les écosystèmes (notamment les substances cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques). Une analyse fine des produits envisagés par les exploitants, en termes de volume, de nocivité-toxicité et de réactivité, doit donc être entreprise. À ce titre, des réflexions en termes d'interdiction ou de substitution des substances les plus critiques sont à envisager. Pour ce faire, une transparence totale est requise sur la nature des fluides potentiellement injectés.

Dans le même ordre d'idée, une analyse prévisionnelle de la nature et des teneurs des éléments traces d'origines minérale ou organique lixiviés de la roche mère, puis mis en solution par le fluide de fracturation, doit être menée afin de définir et dimensionner les techniques de traitement des effluents les plus adaptées. Pour réduire ces nuisances, des méthodes potentiellement alternatives à la fracturation hydraulique (utilisant notamment d'autres fluides d'injection) méritent d'être considérées avec attention.

### Limiter les risques et impacts liés aux installations et usages de la surface

L'extraction d'hydrocarbures requiert le déploiement d'installations de surface destinées aux activités de forage, de collecte, de stockage, de traitement et de transport. Outre la prévention des risques inhérents à l'existence d'installations de mélange et d'injection, sous haute pression, de fluides comportant divers produits chimiques, il conviendra d'identifier l'ensemble des impacts potentiellement induits par la filière

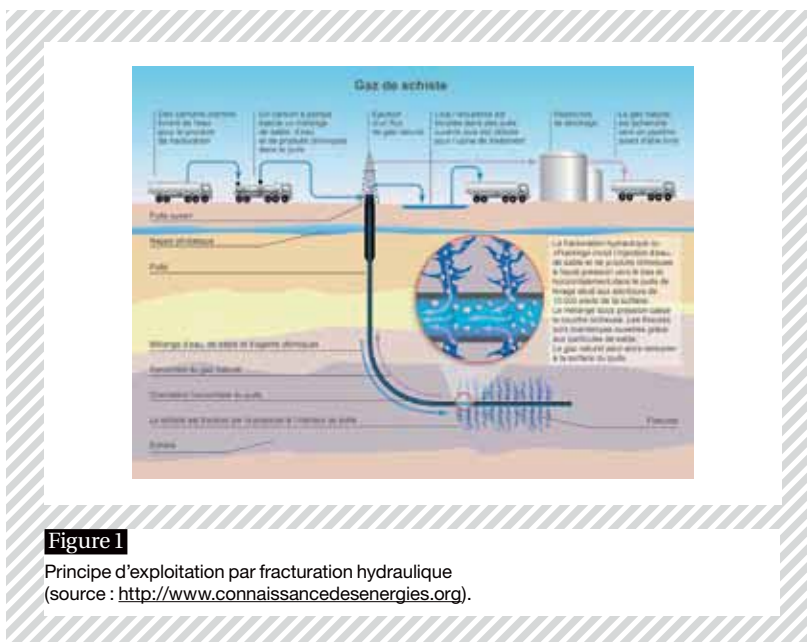


Figure 1

Principe d'exploitation par fracturation hydraulique (source : <http://www.connaissancesenergies.org>).

pour mieux maîtriser leurs effets sur le milieu environnant. Parmi eux, on citera l'impact de l'activité sur la qualité de l'air ambiant, la consommation d'eau, les nuisances sonores et olfactives, la circulation d'engins, l'impact paysager et la limitation d'usage des terrains nécessaires à l'exploitation. Ces considérations mettent en lumière une autre suggestion forte énoncée dans le rapport commun aux trois organismes : le besoin de développer un bilan environnemental global de la filière basé sur des analyses systémiques transparentes et quantifiées. Seul ce bilan global permettrait de préciser le bien-fondé économique (ou non) de l'exploitation de cette nouvelle ressource énergétique dans le contexte français. Il devrait ne pas se limiter au seul bilan carbone, mais intégrer également les conséquences sur l'usage de l'eau et des terrains de surface et les impacts à moyen ou long terme, qu'ils soient de nature environnementale ou sanitaire. ●

### Abstract

The potential extraction of shale gas generated a very lively social debate in France, illustrating the contrast between two logics: on the one hand the relevance to exploit an energy resource, available in France and, on the other hand, the serious questions related to the use of the "hydro-fracking" technique in terms of environmental and health impacts. INERIS is not intended to support or reject any potential industrial sector

but to make available to stakeholders an independent and integrative expertise concerning risk assessment and prevention. This paper presents the major scientific issues and research priorities to develop knowledge and reduce uncertainty regarding the consequences of the hydro-fracking technique. It focuses notably on the impacts and risks generated with respect to the rockmass, the water resources as well as those due to exploitation of surface facilities.

## BISPHÉNOL A ET PHTALATES

- 28** Contamination des prélèvements et exposition à l'hôpital

## RETARDATEURS DE FLAMME BROMÉS

- 30** Estimation de l'exposition dans un immeuble de bureaux. Couplage de mesures dans le sang, dans l'air et dans les poussières des bureaux

## MÉTHODES ALTERNATIVES ET OUTILS

- 32** Prédiction des propriétés physico-chimiques dangereuses des substances chimiques. Vers l'application des modèles QSPR dans un contexte réglementaire
- 35 Focus** Prédiction des effets chroniques des substances chimiques sur la daphnie
- 36** Les effets du clotrimazole sur la stéroïdogénèse testiculaire chez le poisson zèbre
- 39 Focus** Hydrocarbures polycycliques aromatiques: exposition, implication des macrophages humains







# **SUBSTANCES CHIMIQUES**



## Constitutrices



Céline Boudet



Karine Tack



Florence Zeman

# BISPHÉNOL A ET PHTALATES CONTAMINATION DES PRÉLÈVEMENTS ET EXPOSITION À L'HÔPITAL

Très couramment utilisés dans la fabrication de divers plastiques, le bisphénol A (BPA) ainsi que les phtalates sont largement répandus dans notre environnement. Le bisphénol A est un monomère utilisé plus particulièrement dans la fabrication des matières plastiques polycarbonates et des résines époxy; il entre aussi dans la composition de diverses autres matières plastiques telles que le polychlorure de vinyle (PVC). Ces matériaux sont utilisés non seulement dans la fabrication de dispositifs médicaux, de disques compacts, mais également dans la fabrication des films alimentaires et de bouteilles destinées à contenir des boissons. Les phtalates font quant à eux partie d'une famille chimique essentiellement utilisée dans l'industrie pour rendre souple et flexible certains plastiques. Ils sont présents dans de nombreux produits de consommation, par exemple dans certains emballages de produits alimentaires, dans des médicaments et des cosmétiques, dans certains matériaux de construction, peintures, jouets pour enfants ou même équipements médicaux [A]. Ces composés, phtalates et BPA, ne sont pas chimiquement liés aux plastiques dans lesquels ils sont employés et peuvent être relargués directement par le plastique par simple migration.

Plusieurs études ont montré que ces molécules, très présentes dans nos produits de consommation courante ou dans notre environnement intérieur, ont des effets sur la reproduction et sur le développement chez l'animal [B] [C]. Il existe relativement peu de données sur la relation entre une exposition aux phtalates ou BPA et des effets sur la santé. Cependant, diverses études impliquant des femmes enceintes suggèrent que certains effets comme une durée de gestation plus courte [D], un risque de fausse couche accru [E] ou un comportement néonatal altéré [F] pourraient être liés à une exposition à ces substances pendant la grossesse. De plus, il a été montré que les phtalates ainsi que le BPA peuvent pénétrer dans le placenta [G] [H]. Une exposition de courte durée *in utero*, à des niveaux élevés de ces substances pendant la différenciation sexuelle, pourrait causer des effets permanents sur le développement du système reproducteur du fœtus [I]. Il est donc particulièrement important de s'intéresser à l'évaluation de l'exposition des femmes enceintes.

## Références

- A** Berman T., Hochner-Celnikier D., Calafat A. M., Needham L. L. et al. *Phthalate exposure among pregnant women in Jerusalem, Israel: results of a pilot study*. Environ Int 2009, 35, pp. 353-357.
- B** Noriega N. C., Howdeshell K. L., Furr J., Lambright C. R., Wilson V. S., Gray, L. E. *Pubertal administration of DEHP delays puberty, suppresses testosterone production, and inhibits reproductive tract development in male Sprague-Dawley and Long-Evans rats*. Toxicol Sci, 2009, 111, pp. 163-178.
- C** Moyer B., Hixon M. L. *Reproductive effects in F1 adult females exposed in utero to moderate to high doses of mono-2-ethylhexylphthalate (MEHP)*. Reproductive Toxicology, 2012, 34 (1), pp. 43-50.
- D** Latini G., De Felice C., Presta G., Del Vecchio A., Paris I., Ruggieri F., Mazzeo P. *In utero exposure to di-(2-ethylhexyl)phthalate and duration of human pregnancy*. Environ Health Perspect, 2003, 111 (14), pp. 1783-1785.
- E** Sugiura-Ogasawara M., Ozaki Y., Sonta S-i, Makino T., Suzumori K. *Exposure to bisphenol A is associated with recurrent miscarriage*. Hum Reprod, 2005, 20 (8), pp. 2325-2329.
- F** Engel S. M., Miodovnik A., Canfield R. L., Zhu C. et al. *Prenatal phthalate exposure is associated with childhood behavior and executive functioning*. Environ Health Perspect, 2010, 118, pp. 565-571.
- G** Mose T., Mortensen G. K., Hedegaard M., et al. *Phthalate monoesters in perfusate from a dual placenta perfusion system, the placenta tissue and umbilical cord blood*. Reprod Toxicol, 2007, 23, pp. 83-91.
- H** Balakrishnan B., Henare K., Thorstensen E. B., Ponnampalam A. P., Mitchell M. D. *Transfer of bisphenol A across the human placenta*. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 2010, 202 (4), p. 7.
- I** Wittassek M., Koch H. M., Angerer J., Bruning T. *Assessing exposure to phthalates – The human biomonitoring approach*. Mol Nutr Food Res, 2010, 55, pp. 7-31.
- J** Vandentorren S., Zeman F., Morin L., Sarter H., Bidondo M-L, Oleko A., Leridon H. *Bisphenol A and phthalates contamination of urine samples by catheters in the ELFE pilot study: Implications for large-scale biomonitoring studies*. Environ Res, 2011, 111, pp. 761-764.
- K** Yan X., Calafat A., Lashley S. Smulian J., Ananth C., Barr D., et al. *Phthalates biomarker identification and exposure estimates in a population of pregnant women*. Hum Ecol Risk Assess, 2009, 15, pp. 565-578.

Les phtalates et le BPA font partie des substances étudiées dans le cadre de la cohorte ELFE (Étude longitudinale française depuis l'enfance) qui a pour objectif d'analyser le développement physique, psychologique et social de l'enfant, en prenant en compte notamment l'impact des facteurs environnementaux. Les inclusions des sujets dans la cohorte nationale se sont déroulées, en 2011, sur quatre vagues (printemps, été, automne, hiver) de 4 à 8 jours. Avant que cette étude nationale ne soit lancée, une étude pilote a ainsi été réalisée en octobre 2007 en Rhône-Alpes et Seine-Saint-Denis, sur 571 naissances, afin de valider les procédures de collecte, de stockage et d'analyses des échantillons, mais aussi pour décrire les niveaux d'imprégnation des mères aux substances émergentes comme les phtalates ou le BPA.

### Méthodes

Le recrutement de l'étude pilote a concerné toutes les naissances survenues du 1<sup>er</sup> au 4 octobre 2007 dans le département de Seine-Saint-Denis et dans la région Rhône-Alpes dans 30 maternités. Au total, 279 échantillons d'urine ont été collectés en salle de naissance. 258 dosages de bisphénol A libre et total dans les échantillons d'urine ont été réalisés à la suite d'une extraction liquide/liquide par chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse en tandem (LC/MS-MS). Afin d'évaluer l'exposition au diéthylhexyl phtalate (DEHP), son métabolite primaire – mono-2-éthyl-5-hexylphtalate (MEHP) et deux de ses métabolites secondaires – 2-éthyl-5-hydroxy-hexylphtalate (5OH-MEHP); 2-éthyl-5-oxo-hexylphtalate (5oxo-MEHP) ont été dosés dans ces 279 échantillons d'urine après hydrolyse enzymatique et analysés par chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC/MS).

### Principaux résultats

#### Analyse des niveaux retrouvés

Le BPA total et le BPA libre ont été détectés respectivement dans plus de 90 % et 74 % des échantillons urinaires. La valeur médiane des concentrations en BPA était de 2,5 µg/l, et celle du BPA libre était de 0,4 µg/l. Pour les phtalates, les trois métabolites du DEHP ont été détectés dans plus de 95 % des échantillons d'urine. Les concentrations de ces métabolites s'étendaient de 0,2 à 1 587,9 µg/l (avec une concentration médiane de 13,7 µg/l pour le MEHP; de 50,7 µg/l pour le 5OH-MEHP, de 28,3 µg/l pour le 5oxo-MEHP) [J]. Des analyses statistiques complémentaires ont permis de mettre en évidence que les concentrations urinaires en BPA et en MEHP (le métabolite primaire du DEHP) mesurées pour les accouchements par césarienne ou forceps étaient significativement plus élevées que celles retrouvées pour les accouchements naturels.

#### Relargage de BPA par les poches urinaires

Afin de mieux comprendre cette observation, des analyses supplémentaires ont donc été réalisées sur les sondes urinaires. En effet, ces dernières font partie des dispositifs médicaux pouvant contenir du BPA et sont le plus souvent utilisées lors d'un acte chirurgical comme lors d'une césarienne. Des tests sur différentes sondes urinaires ont montré un relargage du BPA au cours du temps. De plus, après une enquête auprès des sages-femmes, il est apparu que, le plus souvent, lorsque les femmes avaient accouché par une césarienne, les prélè-

vements avaient été réalisés à partir de leurs poches urinaires, ce qui confirme l'hypothèse d'une contamination par le matériel médical.

#### Exposition récente au DEHP à l'hôpital

En ce qui concerne l'exposition aux phtalates, l'hypothèse d'une exposition récente au DEHP, à l'hôpital, quelques heures avant les prélèvements urinaires probablement par le système de perfusion, comme observé dans une étude précédente [K], a été privilégiée. En effet, les femmes ayant eu un accouchement plus compliqué (césarienne ou forceps) auraient été perfusées plus longtemps que celles ayant eu un accouchement classique, ce qui se traduirait par une concentration supérieure en MEHP (métabolite primaire) et non en métabolites secondaires qui n'auraient pas eu le temps d'être formés.

### Conclusion

Les biomarqueurs de BPA et de phtalates ont été retrouvés chez plus de 90 % des sujets, ce qui confirme le caractère ubiquitaire de l'exposition à ces substances de la population générale. La distribution des concentrations montre une grande variabilité des valeurs au sein de la population étudiée, suggérant différentes sources potentielles et divers facteurs pouvant influencer ces concentrations. Les questionnaires et les mesures environnementales de l'étude ELFE devraient permettre de mieux cerner les sources d'exposition et de mieux comprendre la variabilité observée. Les problèmes de contamination ou d'exposition par des dispositifs médicaux, mis en évidence dans l'étude pilote ELFE, devront être pris en compte lors de futures études de biosurveillance, et en particulier dans l'étude nationale ELFE. ●

### Abstract

The ubiquitous use of phthalates and bisphenol A (BPA) in plastics, medical devices and food packaging materials results in a widespread general population exposure. The ELFE pilot study reports measurement of urinary concentration of phthalate metabolites and BPA in France and provides a first assessment of the exposure of French pregnant women to these compounds. The median concentrations of total and free BPA measured in urine were similar to those measured in previous studies except for the highest

concentrations. These results allowed us to identify a contamination with BPA that occurred from medical devices with urine probes when monitoring at delivery. High concentrations of primary metabolite of DEHP (Di-ethyl-hexyl phthalate), compared to other European and American studies were also observed and a very recent exposure at the hospital probably due to perfusion materials was also suspected. All these information about contamination and recent exposure will have to be taken into account for large-scale biomonitoring studies.

## Contributrices



Céline Boudet



Jessica Queron



Karine Tack



# ESTIMATION DE L'EXPOSITION AUX RETARDATEURS DE FLAMME BROMÉS DANS UN IMMEUBLE DE BUREAUX

Couplage de mesures dans le sang,  
dans l'air et dans les poussières des bureaux

Les polybromodiphényl éthers (PBDE), principaux retardateurs de flamme bromés (RFB), entrent dans la composition de nombreux produits manufacturés d'usage quotidien. Ils sont suspectés d'être des perturbateurs endocriniens et font l'objet d'interdictions ou de limitations d'usage variées au niveau international. Si les PBDE sont des substances ubiquitaires et persistantes dans l'environnement, leur devenir dans les milieux environnementaux est mal connu. L'exposition de la population générale aux PBDE reste à ce jour mal estimée, notamment en raison d'un manque de précision des méthodes d'estimation de l'exposition. L'alimentation est une voie d'exposition aux PBDE reconnue, mais de plus en plus d'études internationales mettent en évidence le rôle également important de l'exposition aux poussières de l'air intérieur, en particulier dans les immeubles de bureaux.

Dans ce contexte de connaissances lacunaires, en particulier en France, le projet proposé par l'INERIS en 2007 consistait à conduire 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 celles dans le sang de leurs occupants. Coordinateur et promoteur du projet d'étude, l'INERIS a réalisé ces travaux,

financés par l'Anses et le ministère chargé de l'Écologie, en partenariat avec Veolia Environnement Recherche et Innovation et le bureau d'études SEPIA Santé.

## Matériel et méthode

La première phase du projet a consisté en la mise au point des méthodes de prélèvement et d'analyse des PBDE pour plusieurs matrices et pour 11 congénères.

Une méthode de prélèvement de poussières déposées a été développée par l'INERIS **photo 1**. Pour les prélèvements aériens, deux approches ont été retenues: des prélèvements actifs à l'aide de préleveurs MicroVol® sur un filtre quartz, suivi d'une cartouche SUPELCO® composée de mousses en polyuréthane et d'une résine, et des prélèvements passifs à l'aide d'un échantillonneur en inox contenant une mousse en polyuréthane.

La seconde phase du projet a consisté en une campagne de mesures *in situ* réalisée en novembre 2010 parmi les employés d'un immeuble de bureaux situé en Ile-de-France : 31 volontaires (17 femmes et 14 hommes) ont participé à l'étude. Le protocole reposait sur la mise en œuvre simultanée de mesures de PBDE dans le sang et dans les bureaux des volontaires (dans l'air et les poussières déposées sur les surfaces), ainsi que sur des questionnaires d'enquête.

Après recueil individuel des consentements éclairés, les prélèvements sanguins ont été réalisés sur le lieu de travail des volontaires par une infirmière. Les participants ont également répondu à un certain nombre de questions sur leurs habitudes de transport, leur habitat et leur alimentation.

Le recueil des poussières déposées dans les bureaux des participants (24 bureaux) a été réalisé par essuyage de la surface de plaques de 100 cm<sup>2</sup> de même nature que celle des mobiliers des bureaux étudiés, disposées pour les besoins de l'étude pendant un mois; les poussières déposées ont également été recueillies par essuyage sur les armoires présentes dans les bureaux. Concernant l'air des bureaux, les prélèvements passifs ont duré 28 jours (hauteur 2 m, **photo 1**) et les prélèvements actifs se sont tenus le week-end (48 heures), dans 12 des bureaux étudiés.

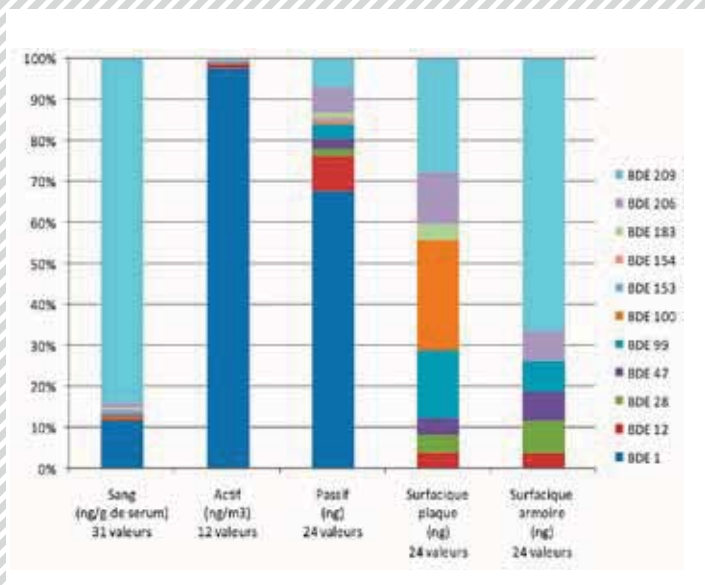


Figure 1

Répartition des congénères dans chaque matrice.

## Références

- Antignac J.-P., Cariou R. et al. *Exposure assessment of french women and their newborn to brominated flame retardants: determination of tri- to deca-polybromodiphenylethers (PBDE) in maternal adipose tissue, serum, breast milk and cord serum.* Environmental Pollution, 2009, 157(1), pp. 164-173.
- Battermann S. *Brominated flame retardants in offices in Michigan, USA.* Environment International, 2010, 36(6), pp. 548-556.
- Toms L. M. L. *Assessment of PBDEs in sample collected from indoor environments in South East Queensland, Australia.* Chemosphere, 2009, 76(2), pp. 173-178.
- Fromme H. et al. *Human exposure to PBDE as evidenced by data from a duplicate diet study, indoor air, house dust, and biomonitoring in Germany.* Environment International, 2009, 35(8), pp. 1125-1135.
- Harrad S., Hazrati S et al. *Concentrations of polychlorinated biphenyls in indoor air and polybrominated diphenyl ethers in indoor air and dust in Birmingham, UK: implications for human exposure.* Environmental Science and Technology, 2006, 40(15), pp. 4633-4638.

## Résultats et discussion

Le protocole d'étude a été bien accepté par l'ensemble des volontaires. 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 étude française ayant recherché ces substances dans le sérum [A]. Les échantillons sanguins contiennent majoritairement du BDE209, congénère principal de la formulation commerciale déca-BDE, la dernière encore autorisée en Europe au début de cette étude (interdite en 2008). Les masses de PBDE dans les poussières déposées sont comprises entre 1,2 et 19,3 ng/100 cm<sup>2</sup> (pour un 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 et entre 0,2 et 2 ng/m<sup>3</sup> pour les prélèvements passifs. Les résultats obtenus par les deux méthodes de prélèvement ne sont pas corrélés. Ceci peut être dû à la taille de particules prélevées par ces deux systèmes, aux durées de prélèvements différentes et aux différences d'activité en semaine et le week-end. Même si les études sont peu nombreuses, limitant la comparaison, les concentrations mesurées dans l'air (actif et passif) dans les bureaux investigués au cours de ce projet sont inférieures à celles mesurées dans des bureaux aux États-Unis [B] et du même ordre de grandeur que celles mesurées dans des bureaux en Australie [C]. Les concentrations dans les bureaux investigués sont globalement supérieures aux concentrations mesurées par les mêmes méthodes dans des logements en Allemagne [D], ce qui est en accord avec Harrad [E].

Par ailleurs, cette étude a permis de démontrer l'importance de mesurer les PBDE légers, très rarement étudiés, mais les incertitudes associées restent toutefois importantes.

Malgré la taille limitée de l'échantillon étudié, l'analyse statistique des résultats suggère quelques tendances, non extrapolables à l'ensemble de la population et des immeubles de bureaux. En particulier, au regard de la répartition des congénères dans chaque matrice (figure 1), il n'existe pas de corrélation significative (test de Spearman) entre les teneurs

observées. Toutefois, lorsque l'on exclut les deux composés les plus légers (BDE1 et BDE12), on observe un lien significatif entre les concentrations totales en PBDE dans l'air (prélèvements actifs) et dans le sang.

## Conclusion et perspectives

Ce projet a montré la faisabilité d'une campagne de mesures environnementales et sanguines chez des employés de bureaux. Au regard des résultats de cette étude exploratoire, il apparaît pertinent d'orienter le protocole vers d'autres sources d'exposition que les bureaux, notamment les transports ou l'alimentation. Enfin, l'utilisation des PBDE étant progressivement abandonnée, des études visant certains retardateurs de flammes bromés de remplacement pourraient être envisagées. ●

## Abstract

Polybromodiphenyl ethers are a family of 209 congeners widely used as brominated flame retardants in consumer products. They have the potential to be released into the environment and are suspected to be associated with endocrine disruption. PBDE are ubiquitous and persistent in environment, but the population exposure is not well known. The aim of this project was to compare measurements of PBDEs in dust and air from offices and in the blood of their occupants and to explain PBDE levels with declared exposures. The first step was to develop and optimize some sampling and analysis methods for

blood, air and dust. Eleven congeners were studied. In the second step, about thirty volunteers and their own office were included in the study. PBDEs concentrations in blood ranged from 0,2-12,5 ng/g serum (mean is 2 ng/g serum), the major congener is BDE209. For most congeners, values are in the range of those found in European studies. The project does not reveal any significant relationship between concentrations in the air and the dust deposited in the investigated offices and blood levels of their occupants. Some relationships could be further investigated in a larger group using most specific tools and focusing on novel flame retardants.



## Contributeurs



Guillaume Fayet



Patricia Rotureau

# PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DANGEREUSES DES SUBSTANCES CHIMIQUES

Vers l'application des modèles QSPR  
dans un contexte réglementaire

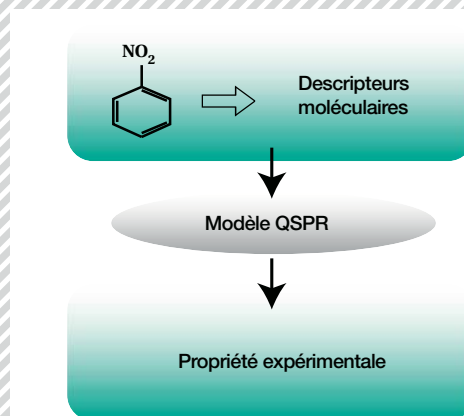


Figure 1

Principe d'une méthode QSPR.

INERIS est reconnu au plan international dans le domaine de l'évaluation de l'explosibilité et de l'inflammabilité des substances chimiques (risques d'explosion et d'incendie). Dans ce domaine, l'expertise repose essentiellement sur la réalisation d'essais selon des référentiels réglementaires.

Or, l'approche par modélisation moléculaire a connu ces dernières années un essor important lié à l'accès à des ordinateurs toujours plus puissants. Ainsi, elle peut dans certains cas se substituer à l'expérience ou aider à identifier les substances les plus à risque qu'il est indispensable de tester. Aussi, depuis plusieurs années, l'INERIS travaille au développement de méthodes prédictives telles que les méthodes QSAR/QSPR (*Quantitative Structure-Activity/Property Relationship*) pour l'évaluation des propriétés physico-chimiques dangereuses des substances chimiques [A]. Ces méthodes sont très développées et très utilisées dans la recherche pharmaceutique ou biologique ainsi que pour l'évaluation des risques toxicologiques et pour l'environnement (écotoxicité, etc.).

Dès 2007, le programme de recherche REPLACE (Recherche sur les propriétés et l'activité de composés explosifs, 2007-2010)

## Références

A Rotureau P., Fayet G., Marlair, G., Michot C., Joubert L., Adamo C. *Évaluation de l'explosibilité des substances chimiques. Des approches expérimentales classiques à la prédiction par la chimie quantique et les méthodes statistiques QSPR*. Actualité Chimique, 2010, 337, p. 51.

B Fayet G., Rotureau P., Joubert L., Adamo C., *Development of a QSPR model for predicting thermal stabilities of nitroaromatic compounds taking into account their decomposition mechanism*. J. Mol Model, 2011, 17, p. 2443.

C Fayet G., Del Rio A., Rotureau P., Joubert L., Adamo C., *Predicting the thermal stability of nitroaromatic compounds using chemoinformatic tools*. Mol Inf, 2011, 30, p. 623.

D Gaussian 09. Gaussian Inc., Pittsburg, PA, USA, 2009.

E *Guidance document on the validation of (quantitative) structure-activity relationships [(Q)SAR] models*. OECD, 2007.

F Papa E., Kovarich S., Gramatica P. *Development, validation and inspection of the applicability domain of QSPR models for physicochemical properties of polybrominated diphenyl ethers*. QSAR Comb Sci, 2009, 28, p. 790.

G Dearden J. C., Cronin M. T. D., Kaiser K. L. E. *How to not develop a quantitative structure-activity or structure-property relationship (QSAR/QSPR)*. SAR QSAR Environ Res, 2009, 20, p. 241.

H Fayet G., Rotureau P., Prana V., Adamo C. *Global and local QSPR models to predict the impact sensitivity of nitro compounds*. Process Saf Prog, accepté.

I Kamlet M.J. *The relationship of impact sensitivity with structure of organic high explosives*.

J. *Polynitroaliphatic explosives*. 6<sup>th</sup> Symposium International on Detonation, Coronado, CA, 1976, p. 69.

K Wang R., Jiang J., Pan, Y., Kao H., Cui Y. *Prediction of impact sensitivity of nitro energetic compounds by neural network based on electrotopological-state indices*. J Hazard Mater, 2009, 166, p. 155.

L Prana V., Fayet G., Rotureau P., Adamo C. *Development of validated QSPR models for impact sensitivity of nitroaliphatic compounds*. J Hazard Mater, accepté.

M QSAR Toolbox: [www.qsartoolbox.org](http://www.qsartoolbox.org).

N (Q)SAR Model Reporting Format Inventory: [qsar.db.jrc.it/qmrf/](http://qsar.db.jrc.it/qmrf/).

O Projet PREDIMOL: [www.ineris.fr/predimol](http://www.ineris.fr/predimol)

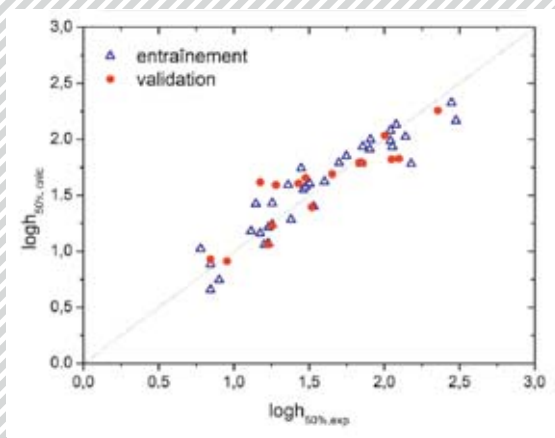


Figure 2

Corrélation entre les valeurs de sensibilité à l'impact expérimentales et calculées par le modèle (Eq. 1).

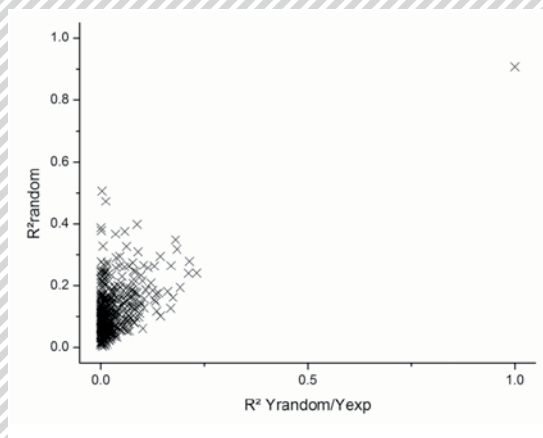


Figure 3

Résultats du test de Y-scrambling représentant la valeur des coefficients  $R^2_{\text{random}}$ , en fonction de la corrélation entre les valeurs Y expérimentales et redistribuées aléatoirement ( $R^2_{\text{Yrandom/Yexp}}$ ).

a initié le développement de premiers modèles QSPR fiables pour la chaleur de décomposition des composés nitroaromatiques [B] [C]. Fort de ce succès, le développement de modèles QSPR est désormais poursuivi pour d'autres propriétés physico-chimiques dangereuses (notamment pour la réglementation REACh) et d'autres familles de composés chimiques selon une méthode robuste permettant d'envisager leur utilisation dans un contexte réglementaire.

### Relations quantitatives structures-propriétés (QSPR)

Les méthodes QSPR consistent à relier de manière quantitative une propriété expérimentale à la structure moléculaire d'une substance, comme illustré en figure 1. Afin de décrire cette structure moléculaire, des descripteurs de plusieurs types peuvent être employés: constitutionnels (par exemple, nombre de groupements, atomes), topologiques (basés sur la connectivité des atomes dans la molécule), géométriques (caractérisant la géométrie 3D de la molécule) ou quantiques (regroupant les informations énergétiques, électroniques et de réactivité). Ces derniers peuvent être obtenus par des méthodes de chimie quantique telle que la Théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) à l'aide du logiciel Gaussian 09 [D].

Il s'agit de mettre en place une équation mathématique (ou un algorithme) entre la propriété macroscopique à prédire et une série de descripteurs à l'échelle moléculaire. Pour ce faire, différents outils de traitement de données peuvent être employés: algorithmes génétiques, réseaux de neurones ou régressions multilinéaires.

Pour utiliser les données prédites par ces modèles QSAR/QSPR à des fins réglementaires, l'OCDE a mis en place en 2004 une série de cinq principes de validation auxquels doivent répondre les modèles [E]:

- une définition précise de la propriété prédite par le modèle, incluant le protocole et les conditions expérimentales;
- une équation mathématique (ou un algorithme) sans équivoque (reproductible), incluant la définition des différents paramètres employés ainsi que les méthodes de calcul éventuellement utilisées pour les obtenir;

- un domaine d'applicabilité défini, permettant de déterminer pour quelles molécules les prédictions sont fiables;
- des mesures appropriées des performances du modèle en termes de corrélation et de prédiction, incluant donc la mesure de son pouvoir prédictif pour un jeu de molécules de validation;
- si possible, une interprétation des mécanismes moléculaires mis en jeu au travers des descripteurs employés et de la structure du modèle.

Les performances des modèles sont évaluées sur la base de différents critères statistiques [F] [G]. La qualité d'ajustement du modèle est vérifiée par la corrélation entre les valeurs calculées et expérimentales de son jeu d'entraînement. La validation interne du modèle est réalisée à l'aide d'une méthode de validation croisée (*cross-validation method*) qui permet d'évaluer sa robustesse. Une méthode dite de « Y-randomisation » est également réalisée afin de s'assurer que le modèle n'a pas été obtenu par chance. Enfin, l'évaluation de son pouvoir prédictif est réalisée sur un jeu de données externes (jeu de validation), non employées pour le développement du modèle.

### Prediction de la sensibilité à l'impact des nitroaliphatiques

Dans le cadre des travaux menés par l'INERIS, des modèles QSPR ont été développés pour prédire la sensibilité à l'impact de différentes substances explosives nitrées (nitroaromatiques, nitramines et nitroaliphatiques) avec de bonnes performances [H].

La sensibilité à l'impact ( $h_{50\%}$ ) est une propriété importante car elle caractérise la tendance du matériau à engendrer une décomposition (potentiellement explosive) sous l'effet d'un impact. Pour cette propriété, des modèles QSPR ont déjà été développés par le passé, mais aucun ne répond à l'intégralité des principes OCDE (pas de validation externe dans les modèles de Kamlet [I], une mauvaise robustesse et un domaine d'applicabilité non défini pour ceux de Wang [J]). Des modèles multilinéaires ont donc été développés à l'INERIS pour prédire la sensibilité à l'impact de nitroaliphatiques (à partir d'une base de données de 50 composés) en ➤

➔ répondant à tous les principes OCDE [K]. À titre d'exemple, en considérant 66 descripteurs constitutionnels, un modèle quantitatif représenté par une équation multilinéaire à trois descripteurs (Eq. 1) a été obtenu :

$$\log h_{50\%} = -2,53 n_{N_{\text{atom}}} + 0,07 n_{\text{single}} - 0,25 n_{\text{NO}_2} + 1,94$$

où  $n_{N_{\text{atom}}}$  est le nombre relatif d'atomes d'azote,  $n_{\text{single}}$  le nombre de liaisons simples, et  $n_{\text{NO}_2}$  le nombre de groupements  $\text{NO}_2$ . D'un point de vue chimique, la présence du groupement  $\text{NO}_2$  était attendue, puisqu'il est connu que le mécanisme principal impliqué dans la décomposition des composés nitroaliphatiques est la dissociation de la liaison C- $\text{NO}_2$ .

Ce modèle est caractérisé par une bonne corrélation ( $R^2=0,88$ ), comme le montre la **figure 2**. Il est robuste ( $Q^2_{\text{L00}}=0,85$ ) et présente un pouvoir prédictif important ( $R^2_{\text{ext}}=0,81$ ), en particulier dans son domaine d'applicabilité ( $R^2_{\text{in}}=0,78$ ). La méthode de Y-scrambling a également validé le modèle, puisque les coefficients  $R^2$  obtenus après redistribution aléatoire des valeurs expérimentales sont faibles (avec une valeur moyenne  $R^2_{\text{ys}}=0,09$ ) comme indiqué sur la **figure 3**.

Ce modèle permet donc de prédire la valeur de la sensibilité à l'impact de composés nitroaliphatiques par la seule connaissance de trois descripteurs constitutionnels, qui sont facilement calculés à partir de la structure 2D des molécules.

Ce modèle QSPR est, à notre connaissance, le premier modèle répondant aux exigences d'une utilisation dans un cadre réglementaire (cinq principes OCDE) pour prédire la sensibilité à l'impact de composés nitroaliphatiques. En effet, il a été validé avec des méthodes de validation interne (pour caractériser la robustesse) et externe (caractérisant la prédictivité) et son domaine d'applicabilité a été clairement défini.

### Mise à disposition et acceptabilité des modèles QSPR

Une fois validés, les modèles peuvent être utilisés pour prédire la propriété étudiée pour des substances chimiques de structure moléculaire « proche ». Ils peuvent aider notamment à la prédiction de la propriété pour des substances chimiques encore non synthétisées (optimisation de procédés ou substitution de substances, par exemple). Dans certains cas, les modèles peuvent également permettre la compréhension des mécanismes mis en jeu dans la propriété étudiée.

L'utilisation des modèles QSPR pour prédire les propriétés des substances chimiques est même recommandée dans le cadre de la nouvelle réglementation REACH pour peu qu'ils répondent aux exigences des principes OCDE. Des modèles validés sont ainsi disponibles dans :

- la **QSAR Toolbox** [L] (de l'OCDE et de l'ECHA), une boîte-outil accessible gratuitement, connue et utilisée largement par les industriels et les instances réglementaires. Elle est principalement dédiée à la toxicité des substances, qui regroupe différentes méthodes alternatives (*read across* et modèles QSPR/QSPR). Néanmoins, la version 2.1 propose un module dédié à la prédiction des propriétés physico-chimiques (y compris celles d'explosibilité, comme montré en **figure 4**), même si aucun modèle lié aux propriétés physico-chimiques dangereuses n'y figure jusqu'à présent.

- une **base de modèles QSPR/QSPR** mise en place par le JRC (*Joint Research Center*) [M]. Les modèles intégrés y sont validés selon un certain nombre de critères définis dans un fichier QMRF (*QSAR Model Reporting Format*), fichier très complet assurant la transparence des modèles développés et leurs performances (nécessaire également pour l'intégration des modèles dans la QSAR Toolbox).

Les démarches nécessaires à l'acceptation des nouveaux

modèles QSPR développés par l'INERIS dans la QSAR Toolbox ont été initiées et le modèle précédemment présenté (Eq. 1) a reçu un avis favorable pour une intégration prochaine au sein de l'outil.

Le succès de ces premiers travaux a mené à la mise en place du projet ANR PREDIMOL [N] (PREDiction des propriétés physico-chimiques des produits par modélisation MOLéculaire) piloté par l'INERIS pour la période 2010-2013 au sein duquel de nouveaux modèles pour la prédiction des propriétés physico-chimiques requises par REACH sont en développement pour les peroxydes organiques et les amines. ●

### Collaboration

Chimie ParisTech – Équipe de modélisation des systèmes complexes.



**Figure 4**  
Aperçu de la QSAR Toolbox de l'OCDE et de l'ECHA.

### Abstract

New theoretical methodologies were developed to access robust QSPR models to predict the properties of explosibility of chemicals. Several models dedicated to the prediction of explosibility properties (thermal stability and sensitivity to impact) of nitro compounds were derived following the requirements of OECD for acceptance within the regulatory

framework of chemicals (e.g. REACH). To allow their use by industrials and by regulatory instances, they will be integrated into the OECD/ECHA QSAR Toolbox and the JRC QSAR database. Current researches, in the PREDIMOL project, are dedicated to the development of new models for other hazardous physico-chemical properties and other families of compounds (organic peroxides and amines).

# PRÉDICTION DES EFFETS CHRONIQUES DES SUBSTANCES CHIMIQUES SUR LA DAPHNIE



La daphnie *Daphnia magna* est un crustacé classiquement utilisé pour les tests d'écotoxicité. En particulier, les tests aigus (de courte durée, 48 heures, se focalisant sur la survie) et les tests chroniques (de durée plus longue, 21 jours, avec un suivi d'effets sublétaux, sur la reproduction notamment) avec cet organisme sont demandés dans des contextes réglementaires comme celui de REACH (pour les substances produites ou importées à plus de 100 tonnes par an en particulier). Le test chronique étant beaucoup plus coûteux que le test aigu, un modèle mathématique, capable de relier les effets aigus, la structure chimique des substances et les effets chroniques de façon pertinente, serait particulièrement utile pour réduire les coûts, le temps et l'utilisation d'invertébrés dans le cadre de l'évaluation du risque écotoxicologique.

Nous avons élaboré notre modèle sur la base des données mises à disposition par le ministère japonais de l'Environnement (<http://www.env.go.jp/chemi/sesaku/02e.pdf>) sur son site Internet. Nous avons pu disposer des EC50 (concentration d'exposition donnant lieu à 50 % d'effet) à 48 heures et à 21 jours pour 244 substances. Nous n'avons retenu que les données pour des composés organiques, qui sont plus pertinents que les inorganiques pour établir des relations entre structure et activité.

Le jeu de données a été séparé en un jeu d'apprentissage pour estimer les paramètres du modèle et un jeu de validation pour valider la pertinence du modèle. Les paramètres physico-chimiques tels que la solubilité aqueuse et le coefficient de partage entre l'octanol et l'eau (log P) ont été calculés à l'aide d'un logiciel libre (ALOGPS 2.1). Ce même coefficient de partage, tenant compte de l'ionisation pour les substances ionisables (log D), a été calculé à l'aide du logiciel en ligne SPARC. La classification chimique a été effectuée à l'aide de l'outil de profilage ECOSAR, disponible dans la boîte à outils OCDE.

La mise en relation entre les EC50 aigus et chroniques a tout d'abord permis de mettre en évidence une classe chimique particulière, les anilines, pour lesquelles les ratios entre les effets sur la survie à 48 heures et les effets sur la reproduction à 21 jours sont bien supérieurs à ceux observés pour les autres classes chimiques, ce qui souligne un mode d'action particulier.

Une fois les anilines retirées des jeux d'apprentissage et de validation (151 substances pour l'apprentissage et 62 pour la validation), une relation linéaire a pu être mise en évidence **figure 1**. Elle rend bien compte de la relation entre les EC50 aigus et chroniques du jeu d'apprentissage (coefficient de corrélation de 0.89) et du jeu de validation (coefficient de corrélation de 0.82) en satisfaisant les critères de validité établis par Golbraikh et al. (2003).

## Contributeurs



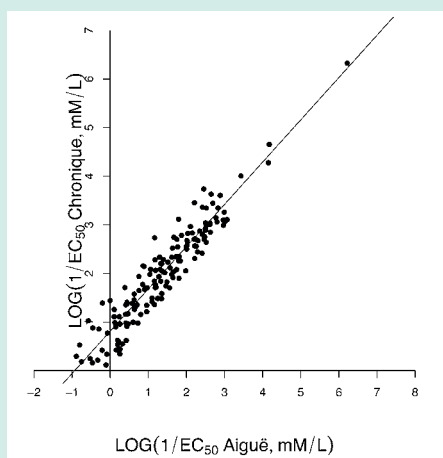
Enrico Mombelli



Alexandre Pery

Nous avons pu établir un domaine d'application de notre modèle, en le limitant aux composés organiques, en dehors des anilines et des amines aromatiques qui peuvent s'hydrolyser en anilines. Notre modèle est applicable à des substances dont le log P est compris entre 0.4 et 5.9, et dont le log D (pour les substances ionisables) est compris entre -5.3 et 5.7.

En moyenne, l'erreur sur le logarithme de la prédiction dans le jeu de validation était de 0,28, et il n'a dépassé 1 que dans moins de 4 % des cas. Notre modèle fournit donc une prédiction de bonne qualité, qui peut s'avérer suffisante dans de nombreux cas et ne pas nécessiter la réalisation du test chronique si l'information aiguë est disponible. ●



**Figure 1**

Régression par la méthode des moindres carrés permettant de prédire la toxicité chronique en fonction de la toxicité aiguë.



## Contributeurs



Damien Baudiffier



François Brion



Nathalie Hinfray



Jean-Marc Porcher

# LES EFFETS DU CLOTRIMAZOLE SUR LA STÉROÏDOGENÈSE TESTICULAIRE CHEZ LE POISSON ZÈBRE

Il est aujourd'hui clairement admis que des composés chimiques, d'origine naturelle ou de synthèse, présents dans les milieux aquatiques sont capables de perturber l'endocrinologie et l'homéostasie des organismes. Ces substances, appelées perturbateurs endocriniens (PE), représentent un large éventail de contaminants de l'environnement, qui interfèrent avec le système endocrinien *via* de multiples modes d'action. Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux ont permis de montrer que ces produits chimiques peuvent agir comme des agonistes des récepteurs des hormones stéroïdiennes et induire des effets biologiques similaires à ceux des hormones endogènes. C'est le cas de nombreux produits chimiques comme, par exemple, les alkylphénols ou le bisphénol A, qui miment l'action des œstrogènes et induisent des effets féminisants. Toutefois, d'autres mécanismes peuvent rendre compte de la perturbation endocrinienne chez les organismes aquatiques. En particulier, on sait que les PE peuvent agir sur les cytochromes P450 impliqués dans la stéroïdogénèse. La stéroïdogénèse est le processus responsable de la biosynthèse des hormones stéroïdiennes telles que les œstrogènes et les androgènes, qui jouent un rôle

## Références

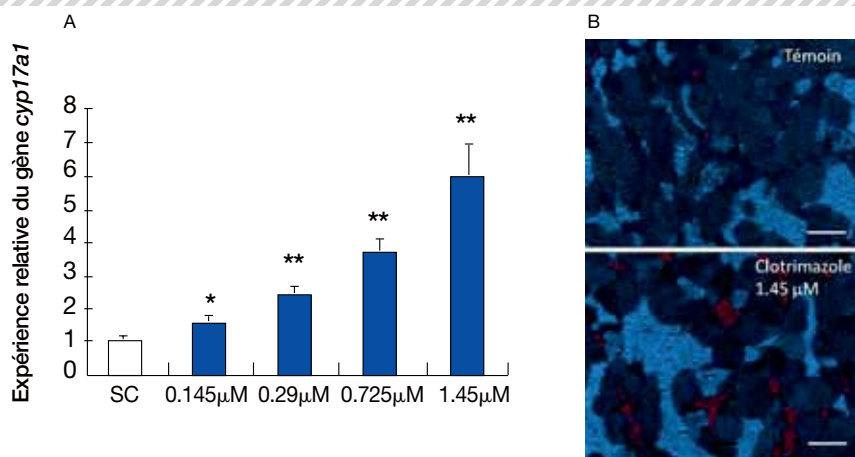
④ Hinfray N., Porcher J. M., Brion F. *Inhibition of rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) P450 aromatase activities in brain and ovarian microsomes by various environmental substances*. Comparative Biochemistry and Physiology C, 2006, 144 (3), pp. 252-262.

④ Leal M. C., de Waal P. P., García-López A., Chen S. X., Bogerd J., Schulz R.W. *Zebrafish primary testis tissue culture: an approach to study testis function ex vivo*. General and Comparative Endocrinology, 2009, 162(2), pp. 134-138.

④ Schulz R. W., de França L. R., Lareyre J.-J., Le Gac F., Chiarini-García H., Nobrega R. H., Miura T. *Spermatogenesis in fish*. General and Comparative Endocrinology, 2010, 165 (3), pp. 390-411.

Baudiffier D., Hinfray N., Vosges M., Creusot N., Chadili E., Porcher J. M., Schulz R. W., Brion F. *A critical role of follicle-stimulating hormone (Fsh) in mediating the effect of clotrimazole on testicular steroidogenesis in adult zebrafish*. Toxicology, 2012, 298 (1-3), pp. 30-39.

Hinfray N., Baudiffier D., Leal M. C., Porcher J. M., Aït-Aïssa S., Le Gac F., Schulz R. W., Brion F. *Characterization of testicular expression of P450 17 $\alpha$ -hydroxylase, 17,20-lyase in zebrafish and its perturbation by the pharmaceutical fungicide clotrimazole*. General and Comparative Endocrinology, 2011, 174 (3), pp. 309-317.



**Figure 1**

Induction concentration-dépendante de l'expression testiculaire du gène *cyp17a1* (A) et de la protéine P450c17 dans les cellules de Leydig (B) de poisson zèbre après sept jours d'exposition au clotrimazole.

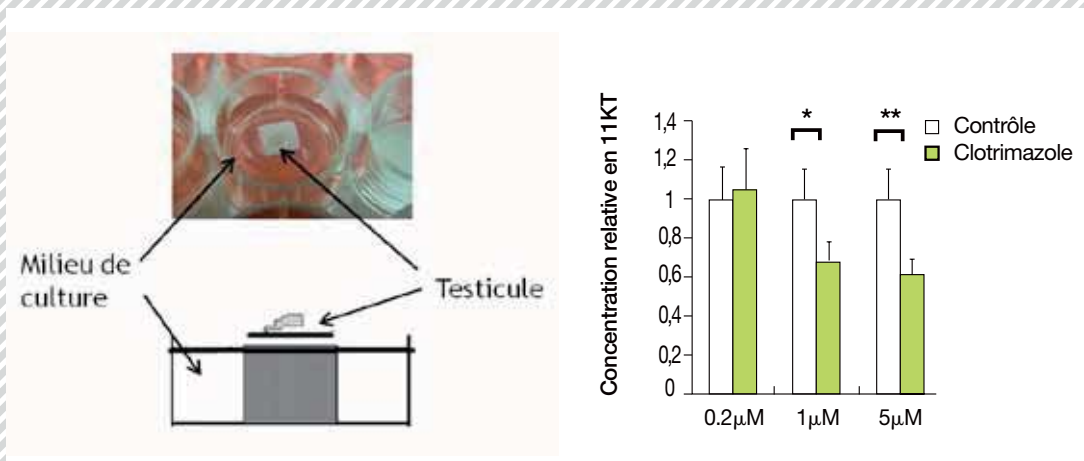
prépondérant dans le développement et la reproduction. Parmi les substances chimiques connues pour agir sur les cytochromes P450, impliqués dans la biosynthèse hormonale, figurent les azoles [A]. Cette famille de molécules regroupe des composés qui sont utilisés dans diverses applications comme agents antifongiques en agriculture, en médecine humaine et vétérinaire. Bien que l'occurrence environnementale de ces composés soit peu renseignée, des études récentes montrent que des azoles tels que le propiconazole, le tebuconazole, le prochloraz ou encore le clotrimazole sont présents dans les effluents de station d'épuration ainsi que dans les eaux de surface. Cependant, les mécanismes et effets *in vivo* de ces composés sur le système endocrinien et la reproduction des poissons sont peu renseignés. Dans ce contexte, nous nous sommes spécifiquement intéressés aux effets du clotrimazole, une substance pharmaceutique utilisée dans le traitement des mycoses vaginales, sur la stéroïdogénèse testiculaire et la biosynthèse d'androgènes. Pour ce faire, une série d'expérimentations combinant des modèles *in vivo* et *in vitro* a été menée chez une espèce modèle largement utilisée en toxicologie et en écotoxicologie, le poisson zèbre (*Danio rerio*).

*In vivo*, l'exposition de poissons mâles au clotrimazole induit une augmentation concentration-dépendante de l'expression de gènes et de protéines de la stéroïdogénèse testiculaire **figure 1**. Il s'agit des gènes *cyp17a1* et *cyp11c1*, codant respectivement pour le cytochrome P450c17  $\alpha$ -hydroxylase 17,20 lyase et le P450 11  $\beta$ -hydroxylase qui sont directement impliqués dans la synthèse de 11 kéto-testostérone (11KT), un puissant androgène 11-oxygéné chez les poissons. Au niveau cellulaire, l'induction de ces P450 est localisée dans les cellules de Leydig, des cellules interstitielles qui supportent la synthèse hormonale dans les testicules. Afin de déterminer si le clotrimazole agit directement sur la gonade pour réguler la stéroïdogénèse, nous avons utilisé un modèle d'explants de testicules de poissons zèbres. Il s'agit d'un modèle développé par Rüdiger Schulz à l'université d'Utrecht (Pays-Bas), qui consiste à cultiver *in vitro* des testicules pour étudier la stéroïdogénèse et la spermatogénèse en dehors de toutes régulations extragonadiques [B]. Dans notre étude, ce modèle a été utilisé pour exposer *in vitro*

les testicules à des concentrations croissantes de clotrimazole. Après une semaine de culture, nous avons montré que, contrairement aux expositions *in vivo*, le clotrimazole n'affecte pas l'expression des gènes de la stéroïdogénèse. Par contre, il inhibe la synthèse d'androgène **figure 2**. Cette faculté de perturber la synthèse d'androgène *in vitro* n'est pas restreinte au clotrimazole, mais s'observe aussi pour d'autres composés azolés comme le propiconazole, le fenbuconazole ou le kétoconazole.

Les différences observées entre les expériences *in vivo* et *in vitro* suggèrent que le clotrimazole n'agit pas directement sur les testicules pour réguler la transcription et la synthèse des gènes et protéines de la stéroïdogénèse. Toutefois, il agit directement sur les testicules pour perturber la synthèse d'androgène.

*In vivo*, l'induction des gènes de la stéroïdogénèse est interprétée comme une réponse compensatoire aux inhibitions de la synthèse d'androgènes et impliquerait des régulations au niveau hypophysaire. Chez les vertébrés, la stéroïdogénèse gonadique est sous le contrôle de l'axe hypothalamo-hypophysaire. Les hormones pituitaires LH (hormone lutéinisante) et FSH (hormone folliculo-stimulante) régulent la stéroïdogénèse et la gamétogénèse en interagissant avec leur récepteur gonadique. Pour étudier les effets du clotrimazole sur l'axe hypophyse-gonade, les expressions d'un ensemble de gènes cibles ont été mesurées suite à des expositions *in vivo*. Au niveau hypophysaire, le clotrimazole induit l'expression du gène codant pour la sous-unité bêta de FSH, qui est connu pour réguler positivement la stéroïdogénèse chez les poissons [C]. Au niveau testiculaire, l'expression du récepteur de la FSH (FSHR) est induite et est significativement corrélée à l'expression des gènes de la stéroïdogénèse. De même, le gène *igf3* codant pour un facteur de croissance, qui s'exprime spécifiquement dans les cellules de Sertoli et qui est régulé par la FSH, est induit. L'ensemble de ces données montrent que la voie de signalisation FSH/FSHR est impliquée dans les altérations testiculaires induites par le clotrimazole. Outre ces modifications moléculaires et cellulaires, l'exposition au clotrimazole induit également des modifications tissulaires. En effet, ➤



**Figure 2**

Culture d'explant de testicule de poisson zèbre et effet du clotrimazole sur les concentrations en androgène (11 KT) mesurées dans le milieu de culture après six jours.

➔ une prolifération des cellules de Leydig dans l'espace interstitiel du testicule, s'accompagnant d'une augmentation du rapport gonado-somatique, a été observée. Cette typologie de réponse histologique et tissulaire n'est pas restreinte au clotrimazole, mais a été observée avec d'autres composés azolés à usage pharmaceutique.

En conclusion, nos travaux ont permis de montrer que le clotrimazole était capable d'agir sur le système endocrinien en altérant la stéroïdogenèse gonadique et la biosynthèse hormonale, selon un mécanisme original faisant intervenir des perturbations au niveau hypophysaire. Nous montrons l'intérêt d'une démarche expérimentale combinant des modèles *in vitro* sur culture d'explants de testicules, et *in vivo* sur des organismes entiers et la mesure d'un ensemble de gènes fonctionnels de l'axe hypophyse-gonade, pour caractériser le mode d'action et les effets perturbateurs endocriniens du clotrimazole. Cette approche pourrait être étendue à d'autres composés azolés qui contaminent le milieu aquatique ainsi qu'à d'autres substances chimiques, en vue de caractériser leur potentiel PE. ●

#### Remerciements

Programme PI90NEMO du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

#### Collaborations

Rüdiger Schulz, université d'Utrecht, Pays-Bas; Alexis Fostier, INRA-LPGP, Rennes.

## Abstract

Clotrimazole (CLO) is a pharmaceutical fungicide that has been recently detected in aquatic environment but little is known about its endocrine disrupting potency in fish.

*In vivo* exposures of male zebrafish to CLO led to inductions of steroidogenic gene and protein expressions. Using zebrafish testicular explant culture, no effect of CLO was observed on transcript levels of steroidogenic enzymes but it inhibited

11 ketotestosterone (11-KT) release in the medium. It suggests that CLO does not act directly on testis. Induction of these genes could be interpreted as a compensatory biological response to inhibition of cytochrome P-450 dependent steroidogenic enzymes.

To support this hypothesis, a network of functional genes of the pituitary-gonad axis was used. We showed that CLO induce a cascade of molecular events in pituitary and testes. Transcript levels of genes encoding for folliculo-stimulating hormone (FSH),

testicular FSH receptor and steroidogenic enzymes were induced. These molecular events are consistent with the involvement of FSH in inducing steroidogenic gene expressions to compensate the inhibitory action of CLO on 11-KT synthesis. Our study highlights the relevance of studying a network of genes of the pituitary-gonad axis to investigate the mode of action of compounds acting as inhibitor of P450-steroidogenic enzymes.

# HYDROCARBURES POLYCYCLIQUES AROMATIQUES: EXPOSITION, IMPLICATION DES MACROPHAGES HUMAINS



La lutte contre la pollution environnementale est une préoccupation majeure des pays industrialisés. Parmi les contaminants de l'environnement, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) tels que le benzo(a)pyrène (BaP), très répandus et présentant des effets délétères pour la santé humaine, font l'objet d'une attention particulière. Ils sont produits par la combustion incomplète de composés organiques. L'homme est exposé *via* l'ingestion de viande de barbecue, par inhalation d'air contaminé et de fumée de cigarette. Ces HAP exercent une toxicité pléiotropique, notamment des effets cancérogènes. Bien que l'on connaisse le mécanisme moléculaire de cette toxicité (*via* le récepteur cytoplasmique aux hydrocarbures), les différentes cibles moléculaires des HAP, l'influence des conditions d'exposition et des facteurs de susceptibilité individuelle sur leur toxicité restent mal connues, notamment au niveau des cellules humaines. Parmi les différents types cellulaires affectés par le BaP, le macrophage humain constitue une cible notable pertinente des hydrocarbures. Le transcriptome des macrophages humains en culture primaire a été analysé afin de mieux caractériser les cibles moléculaires macrophagiques du BaP, en lien avec ses effets toxiques. Ces travaux ont permis de caractériser de nouveaux gènes régulés par les HAP, d'identifier des mécanismes moléculaires intervenant dans ces régulations et leur implication potentielle dans les divers effets toxiques [A] [B] [C]. Une analyse plus fine de la régulation par les HAP des cibles géniques

précédemment identifiées a été effectuée, concernant notamment l'influence d'éventuelles variations interindividuelles de réponse, d'un mode d'exposition *in vivo* ou de la nature du HAP utilisé. Les données obtenues montrent une réponse robuste des cibles étudiées en réponse au BaP, observé *in vitro* dans des macrophages humains issus de différents donneurs et *in vivo* chez le rat. L'induction de l'expression des cibles géniques apparaît cependant spécifique à certains HAP, suggérant la faisabilité de les développer comme biomarqueurs pour évaluer l'exposition à une catégorie de HAP. La détermination de la signature génique des macrophages humains normaux exposés au BaP permet d'aborder la réponse moléculaire aux HAP et de disposer de données quantitatives reliées à l'expression des gènes, susceptibles d'être modélisables par des outils mathématiques [D]. Les gènes surexprimés sont donc des biomarqueurs prédictifs prometteurs, utilisables en épidémiologie moléculaire et contribueraient à une meilleure évaluation des risques. Les marqueurs (interleukine 1 $\beta$  (IL-1 $\beta$ ) et cytochrome P450 1B1) induits par le BaP à la fois en réponse

Constitutrice



Sophie Desmots

à des expositions *in vitro* et *in vivo* et présentant de faibles variations interindividuelles d'expression à l'état basal pourraient ainsi représenter des cibles intéressantes pour des études de suivi de sujets exposés aux HAP. Ces marqueurs géniques permettraient de discriminer la réponse à différents types d'HAP, suivant le mécanisme d'action *via* le profil d'expression des gènes. Enfin, ils pourraient à terme être utiles pour intégrer l'ensemble de l'exposition aux HAP, notamment aux mélanges, ce qui correspond à la situation habituelle d'exposition à ces contaminants organiques. ●

## Références

- ④ Pinel-Marie M.L., Sparfel L., Desmots S. et Fardel O. Aryl hydrocarbon receptor-dependent induction of the NADPH oxidase subunit NCF1/p47<sup>phox</sup> expression leading to priming of human macrophage oxidative burst. *Free Radical Biology and Medicine*, 2009, 47, pp. 825-834.
- ⑤ Sparfel L., Pinel-Marie M.L., Boize M., Koscielny S., Desmots S., Pery A.

- et Fardel O. *Transcriptional signature of human macrophages exposed to the environmental contaminant benzo(a)pyrene*. *Toxicology Sciences*, 2010, 114, pp. 247-259.
- ⑥ Pinel-Marie M.L., Louarn L., Desmots S., Fardel O. et Sparfel L. Aryl hydrocarbon receptor-dependent induction of the I $\alpha$  receptor Fc $\alpha$  by the environmental contaminant benzo(a)pyrene in human

- macrophages. *Toxicology* 2011, 290, pp. 89-95.
- ⑦ Pery A., Brochet C., Desmots S., Boize M., Sparfel L. et Fardel O. 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, 201, pp. 8-14.

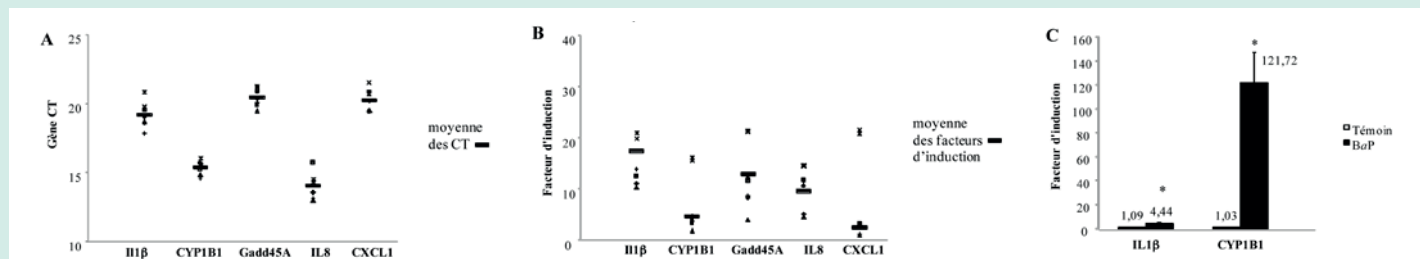


Figure 1

Analyse par PCR quantitative de l'expression des gènes IL1 $\beta$ , CYP1B1, Gadd45A, IL8 et CXCL1 (A), de l'induction de leur expression par le BaP (B) dans les macrophages humains en culture primaire (A, B) et de l'induction de l'expression des gènes IL1 $\beta$  et CYP1B1 dans les macrophages alvéolaires de rats exposés au BaP (C). Les macrophages humains provenant de sept donneurs différents ont été traités ou non par 2  $\mu$ M de BaP pendant 24 heures (A, B). Quatre rats ont été exposés ou non par voie intratrachéale à la dose de 3 mg/kg de BaP; 24 heures après l'instillation, les macrophages alvéolaires sont collectés (C). L'expression des ARNm mesurée par les CT (*Threshold Cycle*) et l'expression relative des ARNm des gènes par rapport aux conditions témoins ont été analysées par PCR quantitative à l'aide d'amorces spécifiques des gènes IL1 $\beta$ , CYP1B1, Gadd45A, IL8 et CXCL1 et du 18S (gène de référence)\*, p < 0.05 (test t de Student), différence significative par rapport aux conditions témoins.



## RISQUES INDUSTRIELS

- 42 Risques technologiques majeurs et signaux faibles
- 44 Vulnérabilité des réservoirs aux explosions et aux impacts

## RISQUES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

- 46 **Focus** Inégalités environnementales : intégration des données socio-économiques
- 47 Évolution de la qualité de l'air en Europe sur dix ans. Première évaluation multimodèle
- 50 **Focus** Micro-organismes : modélisation du transport atmosphérique des aérosols biologiques couplée avec un modèle de survie
- 51 Bioanalyse des perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques
- 54 **Focus** Accompagner le développement des phytotechnologies
- 55 Utilisation des biomarqueurs pour la surveillance des rejets industriels. Cas des effluents de l'industrie pharmaceutique

## RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

- 57 Géochimie du stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Outils d'études des risques de remobilisation des métaux lourds
- 60 Évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié aux processus naturels de dissolution des roches
- 63 Évaluation de la résistance à long terme des piliers des mines de fer du bassin lorrain



A photograph of a pond with lily pads and reeds. The water is calm, reflecting the sky and the surrounding vegetation. The reeds are tall and thin, some with small flowers. The lily pads are green and some are yellowed. The text "SITES ET TERRITOIRES" is overlaid in the center in a bold, white, sans-serif font.

# SITES ET TERRITOIRES



## Contributeurs



Ève Guillaume



Jean-Christophe Le Coze

# RISQUES TECHNOLOGIQUES MAJEURS ET SIGNAUX FAIBLES

La plupart des accidents technologiques majeurs sont toujours précédés de signes avant-coureurs. C'est ce qu'affirmait le sociologue Barry Turner dès les années 1970 [A]. En étudiant un grand nombre de rapports d'accidents, il a en effet montré que ces accidents étaient précédés d'une « période d'incubation » au cours de laquelle des signaux étaient présents. Selon lui, un accident n'arrive pas soudainement; il a une histoire, se développe dans le temps, en d'autres termes, il « couve ». Cette métaphore médicale (« l'incubation ») fait écho à la notion de latence utilisée plus tard par le psychologue James Reason [B]. Dans un système complexe (comme le sont souvent les organisations gérant une activité à risque – pétrochimie, transport, nucléaire), les causes des accidents sont présentes bien avant que ces derniers ne surviennent. Le système renferme des « erreurs » dites latentes, dont les effets ne sont pas immédiatement visibles, mais qui peuvent favoriser des situations dangereuses, voire un accident majeur.

Les travaux de Barry Turner et James Reason nous conduisent au travail conséquent de Diane Vaughan [C]. Cette sociologue définit les signaux faibles comme des « informations ambiguës qui ne représentent pas des menaces claires et directes sur la sûreté/sécurité ». Les signaux faibles (incubation, latence) se caractérisent ainsi par la difficulté de détection et de traitement. Pourtant, Barry Turner considère que les notions de signaux et de période d'incubation restent fondamentales pour la sécurité industrielle. Détecter les informations pertinentes en amont de l'accident permet en principe d'anticiper

l'événement et non de le « subir ». Réussir ce défi est ambitieux, mais il a pour objectif d'améliorer les pratiques de retour d'expérience dont la principale faiblesse réside dans le fait qu'il reste encore largement réactif.

## Enjeu industriel

L'un des enjeux actuels des entreprises gérant une activité à risque est d'anticiper, le plus en amont possible, ce que nous pouvons appeler des « dérives ». Les études approfondies des accidents des navettes Challenger en 1986 [C] et Columbia en 2003 [D] ont apporté une vision très détaillée de la période d'incubation de Turner. Diane Vaughan a interprété ces cas comme des exemples de normalisation de la déviance [table 1] au cours de laquelle l'organisation de la NASA s'éloigne progressivement d'un fonctionnement sûr, en interprétant successivement les informations non pas comme des signaux d'alerte, mais comme des normes de fonctionnement.

La problématique des signaux relève d'une triple difficulté:

- **des signaux d'alerte existent**, couvent avant l'accident, mais ils restent difficiles à détecter;
- **leur sens n'est pas clair** et le lien avec l'accident n'est pas évident;
- **ces signaux s'accroissent** et deviennent une nouvelle norme de travail.

## Axe de travail de l'INERIS et thèse sur les signaux faibles

En principe, tous les accidents récents peuvent être l'objet d'investigations qui explorent la piste du traitement des signaux par l'entreprise, comme l'explosion de la raffinerie BP à Texas City (2005), le crash de l'AF 447 (Rio-Paris, 2009), l'accident de la plateforme Deep Water Horizon (2010) ou encore la catastrophe nucléaire de Fukushima Daïchi (2011). Cette notion de signaux faibles fait partie des arrière-plans théoriques et méthodologiques de l'INERIS pour traiter, dans ses programmes de recherche, de l'investigation des accidents (*a posteriori*) à l'évaluation (*a priori*) des risques technologiques [E] [F]. Pour alimenter ces réflexions, l'INERIS avec le département R&D d'EDF, a ainsi participé à l'encadrement d'une thèse réalisée par Ève Guillaume (2011), en partenariat avec le laboratoire Safety Science Group de l'université technologique de Delft (Pays-Bas). Ce travail de recherche a été financé par la FonCSI, entre 2005 et 2011.

En immersion totale sur deux sites industriels (pétrochimie et sidérurgie), Ève Guillaume a réalisé une investigation de type sociologique (réalisation d'entretiens, d'observations *in situ* et étude de la documentation). Elle a étudié quatre scénarios d'accidents survenus sur les deux sites et le fonctionnement normal, à savoir le management des risques industriels. Les résultats de cette thèse ouvrent sur un certain nombre de constats qui prolongent, illustrent et approfondissent certains des thèmes identifiés par les auteurs précités (Barry Turner et Diane Vaughan). Elle définit les signaux faibles comme des données dont le sens n'est pas interprété comme des informations pertinentes pour prévenir la survenue d'un accident. Ce sont pourtant des informations importantes dans le sens où elles sont récurrentes, latentes, et révèlent des causes organisationnelles des accidents.

Ève Guillaume a identifié trois catégories de signaux faibles:

- **des signaux faibles de type défaillances** techniques latentes répétées;
- **des signaux faibles de type problèmes** de coordination dans le travail;
- **des signaux faibles de type sous-estimation** des risques.

Table 1

## Étape de la normalisation de la déviance [C].

1. Des signaux informent d'un possible problème.
2. Les comportements des éléments techniques qui dévient des critères de sécurité sont analysés comme des signaux de dangers réels.
3. Une enquête sur les preuves de ces comportements est menée.
4. Après discussions, le comportement déviant du joint – qui est à l'origine technologique de l'accident – a souvent été « normalisé », définissant ainsi une nouvelle norme de travail.
5. Le risque devient ainsi acceptable, en accord avec la nouvelle norme.

Table 2

## Typologie informationnelle de Turner [A].

1. L'information est complètement inconnue.
2. L'information est connue mais non complètement comprise.
3. L'information est connue par quelqu'un, mais n'est pas croisée au bon moment avec d'autres informations qui ont le potentiel de changer les représentations (l'information peut être répartie entre plusieurs organisations ou départements au sein de l'organisation; elle peut être masquée par une masse d'autres informations; des informations sont retenues volontairement).
4. L'information était disponible mais ne pouvait pas être traitée parce qu'elle n'a pas sa place dans les représentations, dans les modes actuels de vision du monde.

Ces signaux sont faibles, car, dans chaque cas étudié, ils n'ont pas été détectés et traités comme des signaux permettant de prévenir l'accident, alors que leur lien avec l'événement s'est révélé, après coup, évident. Rejoignant, mais aussi illustrant concrètement la catégorisation informationnelle de Barry Turner (table 2), Ève Guillaume propose d'expliquer pourquoi les deux sites investigués sont dans l'impossibilité de traiter ces signaux. Le premier filtre est lié à la fragmentation des systèmes de remontée d'information; peu de liens sont faits entre les multiples bases de données existantes, ce qui ne permet pas de donner du sens à ces dernières. Le deuxième filtre concerne le traitement des données connues. Les sites investigués privilégient et traitent les données précodées dans les outils de détection et de traitement des informations (audits, visites de terrain, etc.), car elles sont connues, au détriment des données peu ou mal connues parce que ne rentrant pas dans les catégories de précodage des outils. Le troisième filtre renvoie au fait que le domaine de la sûreté/sécurité peut être largement pris en charge par des procédures formelles de gestion des données et rester déconnecté de l'activité opérationnelle. En privilégiant la forme au fond, les deux sites investigués n'utilisent pas le potentiel des données émergeant du cœur de l'activité pour les interpréter comme de réelles connaissances sur leur activité, et plus précisément sur leurs risques.

Ce travail de thèse [G] montre ainsi que les signaux faibles ne sont pas des catégories absolues, mais bien relatives aux contextes de traitement de l'information, au sein d'une organisation particulière [H]. Ces constats et interprétations permettent d'orienter les entreprises vers des solutions concrètes pour la gestion des risques, mais ils permettent également de prendre en compte cette dimension dans l'évaluation de la sécurité industrielle. En prenant conscience des limites du fonctionnement de leur système de retour d'expérience, les entreprises à risque peuvent envisager d'améliorer leurs pratiques, comme décloisonner les systèmes ou encore approfondir les analyses d'incidents pour y introduire les connaissances du domaine des facteurs humains et organisationnels. ●

## Références

- A Turner B. *Man-made disasters. The failure of foresight*. Wykeham, London, 1978.
- B Reason J. *L'erreur humaine. Le travail humain*, Presses Universitaires de France, 1993.
- C Vaughan D., *The challenger launch decision: risky technology, culture and deviance at NASA*. University of Chicago Press, Chicago, 1996.
- D Vaughan D., *History as cause. Chapter 8. Columbia accident investigation board. Report Vol. 1*, Government Printing Office, Washington DC, August 2003.
- E Le Coze J.-C. *Are organisations too complex to be introduced in technical risk assessment and current safety auditing?* Safety science, 2005, 43, pp. 613-638.
- F Le Coze J.-C., *An example of an organisational investigation in a French dynamite factory*, Safety Science, 2010, 48, pp. 80-90.
- G Guillaume È. *La prise en compte des signaux faibles d'accidents dans le retour d'expérience*, Safety Science Group. Université technologique de Delft (Pays-Bas), 2011.
- H Weick K. *Sensemaking in organizations*, London: Sage, 1995.

## Abstract

The topic of "weak signals" in safety research is based on the idea that information about pending disasters exist in organisations beforehand. First Barry Turner, a sociologist, established the notion of "incubation period" in the 70's. According to his model, before an accident, some clues are potentially available but are mainly ignored by people of the organisation (a factory for instance). Twenty years later after Turner's sociological contribution, in the 90's, another sociologist, Diane Vaughan, developed this time the notion of weak signals. Weak signals are ambiguous and their direct link with safety cannot be asserted. They make sense for all only in

retrospect. INERIS research maintains a strong interest in this concept as it can be used in both investigations following accidents and in the development of safety assessment methodologies including social sciences. INERIS launched a research in association with TU Delft, EDF R&D and financed by FonCSI in order to explore this topic. Between 2005 and 2011, a PhD student, Ève Guillaume, conducted a qualitative research in two industrial sites in France in order to understand how these organizations dealt with their weak signals. The thesis clarifies some definition issues in relation to weak signals and describes different layers of factors impeding information flows within companies.



## Contributeurs



Gaëtan Prod'homme



Mathieu Reimeringer

# VULNÉRABILITÉ DES RÉSERVOIRS AUX EXPLOSIONS ET AUX IMPACTS

L'effet domino est inhérent à la sécurité et à la sûreté des sites industriels à risque. L'une des définitions peut être: « Action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement, qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène. » - Arrêté du 29 septembre 2005.

Historiquement, les plus grandes catastrophes industrielles ont été initiées par un événement primaire de faible ampleur qui s'est amplifié par réaction en chaîne, dite effet domino, jusqu'à atteindre des conséquences dramatiques pour l'homme d'une part, puis pour l'environnement naturel et industriel d'autre part. On recense de nombreux accidents dans le monde, dont les conséquences dévastatrices sont dues aux effets dominos faisant suite à une explosion initiale (Feyzin, La Mède, Buncefield, Texas City, Skikda, etc.).

Ces accidents majeurs, associés à de nombreux autres événements tels que l'explosion de l'usine AZF, en 2001, ont conduit les législateurs européens et français à réviser le cadre réglementaire. En France, la loi du 30 juillet 2003, transposée sous la forme de l'arrêté du 29 septembre 2005, impose aux industries, soumises à autorisation, une évaluation quantifiée des risques en termes de probabilité, de cinétique, d'intensité et de gravité. Ainsi, un risque peut être évalué, maîtrisé et enfin accepté. L'analyse de risque doit prendre en compte, pour chaque équipement sensible, les agressions externes pouvant entraîner sa rupture et notamment l'onde de surpression



Figure 1

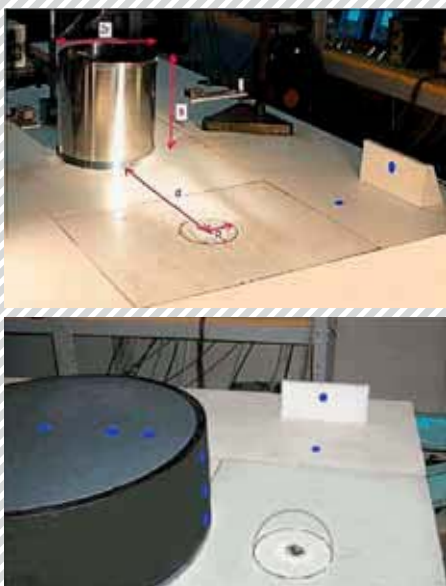
Schéma d'une explosion sur un site industriel.

Figure 2 (ci-contre)

Photographies de la table d'explosion des essais en laboratoire (PRISME - Bourges).

externe. Ainsi, l'objectif du projet VULCAIN est de développer des outils simples et fiables pour l'analyse de la vulnérabilité des réservoirs aux explosions externes. L'étude comprend deux volets majeurs, une partie de modélisation théorique et une partie expérimentale à échelle réduite.

En se basant sur l'observation post-accidentelle d'événements majeurs sur des sites à risque, on remarque que les dégâts de surpression affectant les réservoirs « sensibles », c'est-à-dire de contenance importante, sont majoritairement attribués au flambage circonférentiel de coque mince. Devant la complexité du problème mécanique, la prise en compte des effets de l'explosion sur les réservoirs atmosphériques est souvent limitée à un seuil de surpression admissible indépendant de tout paramètre physique. Des travaux plus récents distinguent plusieurs degrés d'endommagement mécanique et plusieurs cinétiques de perte de confinement. Cette discrétisation des dégâts observés permet de déterminer des valeurs seuils de surpressions maximales admissibles en lien avec une conséquence déterminée. Ces valeurs ont été confortées par des travaux statistiques débouchant sur une quantification des probabilités d'effet domino. Ces méthodologies, issues du retour d'expérience post-accidentel, ont l'avantage d'être applicables de façon systématique pour une analyse de risque sur un site industriel possédant de nombreuses sources potentielles d'explosion directe comme indirecte. Toutefois, le domaine de fiabilité de ces méthodes statistiques est lié au nombre limité d'accidents étudiés et de structures impactées. Il semble complexe de couvrir l'ensemble des scénarios potentiels d'effet domino sans intégrer à la méthodologie les paramètres physiques du réservoir. Afin d'intégrer l'aspect dynamique du comportement des réservoirs à la surpression dans un outil simple, certains auteurs se sont orientés sur des diagrammes pression-impulsion d'endommagement, basés sur une série de simulations éléments finis non linéaires transitoires. Cette approche poussée possède plusieurs inconvénients limitant sa généralisation, notamment celui d'être très coûteux en temps de calcul. Afin d'insérer le comportement physique des réservoirs aux ondes de surpression dans un outil simple d'analyse, il est proposé un modèle de comportement des coques minces en flambage circonfé-



rentiel, dû à une pression dynamique externe. En se basant sur la théorie des coques de Kirchhoff-Love, modifiée par Donnell, une résolution modale des équations de mouvement du flambage élastique circonférentiel dynamique d'une coque mince imparfaite est proposée. La résolution numérique des équations de mouvement permet d'obtenir le déplacement latéral de la coque en fonction des imperfections initiales de la géométrie. La détermination de l'endommagement est fondée sur une amplification critique des défauts géométriques initiaux associée à la limite d'élasticité du matériau considéré. Ce modèle permet de construire des diagrammes d'endommagement en fonction de la pression maximale et de l'impulsion caractérisant une onde de pression. Cette méthodologie, basée sur un modèle physique, est par la suite comparée à des résultats d'essais de résistance de maquettes de réservoirs à l'onde de pression issue d'une détonation à l'échelle du laboratoire. L'objectif des essais à échelle réduite réalisés est double. Dans un premier temps, il s'agit de mesurer l'évolution spatio-temporelle des pressions incidentes et réfléchies sur un cylindre rigide, afin d'obtenir une répartition temporelle et géométrique des efforts appliqués au réservoir subissant une onde de choc issue de la détonation d'un mélange gazeux. Dans un second temps, il s'agit d'étudier la réponse mécanique des réservoirs métalliques sous cette action en termes

de déformée et de contraintes. Trois réservoirs types, présentant un élanement différent, ont été choisis comme représentatifs des bacs atmosphériques et des gazomètres rencontrés sur les sites industriels pétrochimiques.

Le passage de l'échelle réelle à l'échelle réduite repose, pour l'onde de souffle, sur la similitude de Hopkinson. Pour la structure, on montre que la réalisation d'une maquette dans le même matériau, présentant un rapport  $k$  d'homothétie avec la structure réelle, sollicitée par un chargement de même intensité que le chargement réel mais de durée à l'échelle  $k$ , permettra d'assurer la similitude des périodes de vibration du cylindre, des charges critiques de flambage et des contraintes à l'encastrement. L'exploitation des résultats des essais en laboratoire a aussi aidé à développer un modèle de répartition des surpressions dues à une explosion d'origine gazeuse sur un cylindre. Par ailleurs, les essais sur les maquettes déformables permettent de valider un modèle de comportement des réservoirs en flambement élastique. Ce modèle favorise une identification correcte des modes de déformation et du comportement du réservoir jusqu'à plastification.

Les outils employés et la méthodologie développée dans le projet VULCAIN viennent s'ajouter aux outils existants de modélisation et de gestion du risque. En validant des modèles physiques par le biais de l'expérimentation à l'échelle d'un laboratoire, les travaux ont finalement permis de développer des outils fiables d'évaluation de la vulnérabilité des réservoirs aux accidents majeurs. Ces outils, intégrant les paramètres physiques des réservoirs, doivent permettre une évaluation plus fine des effets dominos lors de la quantification des risques pour la réalisation d'études de dangers. Par ailleurs, ils participent au développement de l'expertise sur les accidents majeurs, expertise nécessaire à la gestion responsable des risques industriels. ●

## Références

Noret E., Prod'homme G., Yalamas T., Reimeringer M., Hanus J.-L., Duong D.-H. *Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012 16, 9, pp. 998-1022.

Duong D.H., Hanus J.-L., Bouazaoui L., Pennetier O., Moriceau J., Prod'homme G., Reimeringer M. *Response of a tank under blast loading - part I: experimental characterisation of blast loading arising from a gas explosion*. European Journal

of Environmental and Civil Engineering, 2012 (a), 16, 9, pp. 1023-1041.

Duong D.H., Hanus J.-L., Bouazaoui L., Régat X., Prod'homme G., Noret E., Yalamas T., Reimeringer M., Bailly P., Pennetier O. *Response of a tank under blast loading - part II: experimental structural response and simplified analytical approach*. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2012 (b) 16, 9, pp. 1042-1057.

## Abstract

The occurrence of a chain reaction from blast on atmospheric storage tanks in oil and chemical facilities is difficult to predict. Current French practice for Seveso facilities assumes domino effects occur when the computed overpressure exceeds 200 mbar: a value determined from

accident data. This could lead to conservative or dangerous assessments. To assess the validity of simple analytical models as design tools and to check the conformity of numerical simulations, small scale experimental studies were carried out to establish a benchmark. The first study presents blast test results performed on rigid instrumented

cylinders to quantify the pressure space time loading distribution. A second study was performed on flexible cylinders at a reduced scale to quantify the structural response. Based on experience of the most recent accidents in France a simplified semi-analytical model based on Donnell's equations and critical imperfection amplification thresholds was used to provide

damage predictions. Numerical results show good agreement with the experimental data. Finally, reliable tools to predict atmospheric oil tank blast resistance have been developed. Some damage diagrams in the form of pressure impulse curves and safety recommendations for stakeholders are proposed to reduce domino effect risk.

# INÉGALITÉS ENVIRONNEMENTALES: INTÉGRATION DES DONNÉES SOCIO-ÉCONOMIQUES

## Contributeurs



Céline Boudet



Julien Caudeville



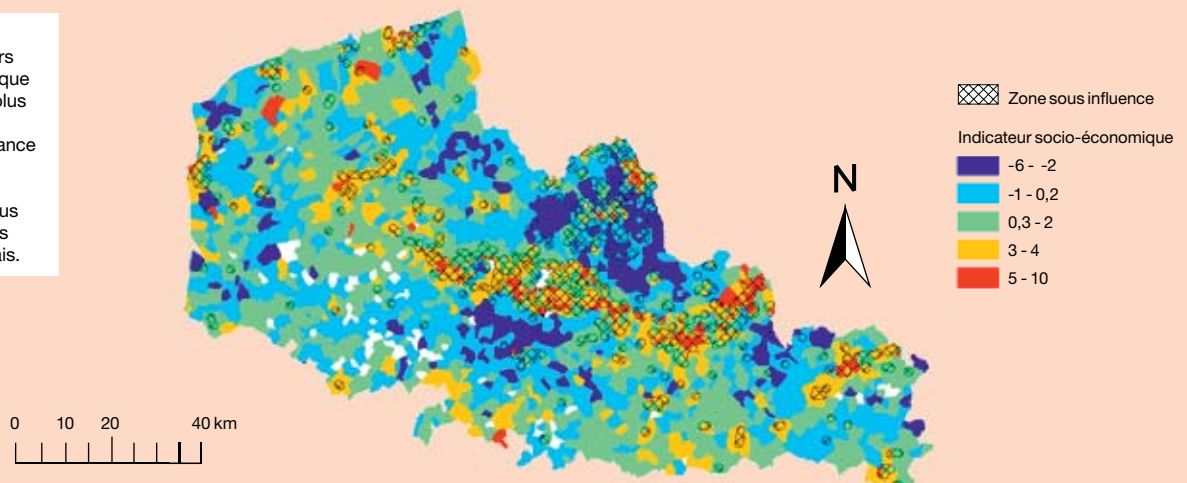
PLAINE (PLaforme intégrée pour l'Analyse des INégalités d'Exposition environnementale) a vocation à constituer un outil d'aide à la décision à différentes échelles territoriales pour identifier, hiérarchiser et gérer les situations « d'inégalités environnementales », dans lesquelles des populations sont surexposées à des risques de pollution.

Les travaux préliminaires de recherche ont permis de confirmer la possibilité de construire une plateforme capable d'évaluer et de représenter, *via* un outil automatisé flexible et adaptable, les expositions dans un espace géographique, grâce à l'intégration de données de nature différente. La plateforme permet également de quantifier sur des échelles fines les relations entre exposition et défaveur sociale. Un premier développement méthodologique a permis de croiser l'exposition des populations aux particules atmosphériques avec les indicateurs socio-économiques classiques (Townsend et Cartairs). Ces travaux sont intégrés à ceux de l'OMS sur les indicateurs d'inégalité environnementale et figurent dans le rapport *Examples of national practices in analysis and presentation of environmental health inequalities*.

En collaboration avec l'université de Nanterre et l'École des hautes études en santé publique (EHESP), des indicateurs « distance à la source » aux sites potentiellement dangereux de la base BASIAS (inventaire historique des sites industriels et activités de service) sont actuellement développés pour être croisés avec de nouveaux types d'indicateurs de défaveur, plus robustes aux échelles régionales, construits initialement par l'INSERM **figure 1**. Ils intègrent quatre variables du recensement de l'Insee: le revenu des ménages, le taux de chômage, la part des diplômés et la part d'ouvriers dans la population active. Ces travaux permettront ainsi d'étudier les liens entre la distribution géographique de facteurs de risque environnemental et la situation socio-économique des populations exposées. ●

**Figure 1**

Spatialisation des indicateurs de défaveur socio-économique (plus l'indicateur est élevé, plus les populations sont désavantagées) et de « distance à la source » des sites potentiellement dangereux de la base BASIAS (zone sous influence de 1 km autour des sites) en Nord-Pas-de-Calais.



## Contributeurs



Bertrand Bessagnet



Augustin Colette

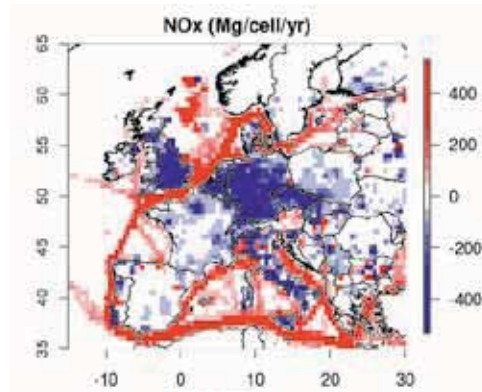


Figure 1

Tendance (bleu : décroissant) annuelle moyenne des émissions de  $\text{NO}_x$  (en mg par maille de  $50 \times 50$  km et par année) rapportée officiellement entre 1998 et 2007. Source : [A].

## ÉVOLUTION DE LA QUALITÉ DE L'AIR EN EUROPE SUR DIX ANS

### PREMIÈRE ÉVALUATION MULTIMODÈLE

Dans une logique d'appui aux décideurs dans l'évaluation de l'efficacité des politiques environnementales, l'INERIS s'intéresse aux tendances historiques de la qualité de l'air. Par la mise en œuvre d'objectifs ambitieux de réduction des émissions de polluants anthropiques, celles-ci ont baissé significativement depuis vingt ans. Il est donc légitime de chercher à quantifier l'efficacité de telles réductions en termes de réduction des concentrations atmosphériques de polluants et de l'exposition des populations.

À l'échelle de l'Europe, les émissions d'oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ) issues d'activités humaines ont été presque divisées par deux depuis 1990 [B]. L'exposition aux effets néfastes du  $\text{NO}_2$  pour la santé a donc été réduite, mais paradoxalement,

l'impact sur les polluants secondaires tels que l'ozone est moins clair. Le principal facteur limitant l'efficacité des mesures de gestion de la qualité de l'air est la variabilité météorologique. Les niveaux de pollution observés pendant une année donnée dépendent des substances émises (soit les polluants ciblés, soit leurs précurseurs), mais aussi de la météorologie correspondante qui peut faciliter – ou non – l'occurrence d'épisodes de pollution intenses. La variabilité météorologique interannuelle masque la réelle tendance à long terme, qui peut être attribuée aux mesures de gestion.

Cette sensibilité de la qualité de l'air aux facteurs extérieurs justifie la mise en œuvre de moyens innovants pour proposer une quantification robuste de l'efficacité des mesures de gestion. C'est pourquoi l'INERIS s'est impliqué dans le projet de recherche CityZen du 7<sup>e</sup> Programme-cadre de recherche et développement de la Commission européenne. Ce projet, porté par l'Institut météorologique norvégien et faisant intervenir 16 organismes européens, avait, parmi ses objectifs, de mieux comprendre l'évolution passée de la qualité de l'air dans les zones les plus polluées d'Europe. Cette initiative représentait ainsi une occasion unique de conduire une évaluation multimodèle des tendances historiques de qualité de l'air. L'INERIS a porté la responsabilité de cette thématique au sein du projet.

Nous présenterons ici brièvement les principaux éléments mis au jour dans le cadre du projet CityZen concernant les tendances rapportées dans les inventaires d'émission officiels, et les tendances en concentrations atmosphériques observées et modélisées.

### Références

[A] Colette A., Granier C., Hodnebrog, O., Jakobs H., Maurizi A., Nyiri A., Bessagnet B., D'Angiola A., D'Isidoro M., Gauss M., Meleux F., Memmesheimer M., Mieville A., Rouil L., Russo F., Solberg S., Stordal F., Tampieri F. *Air quality trends in Europe over*

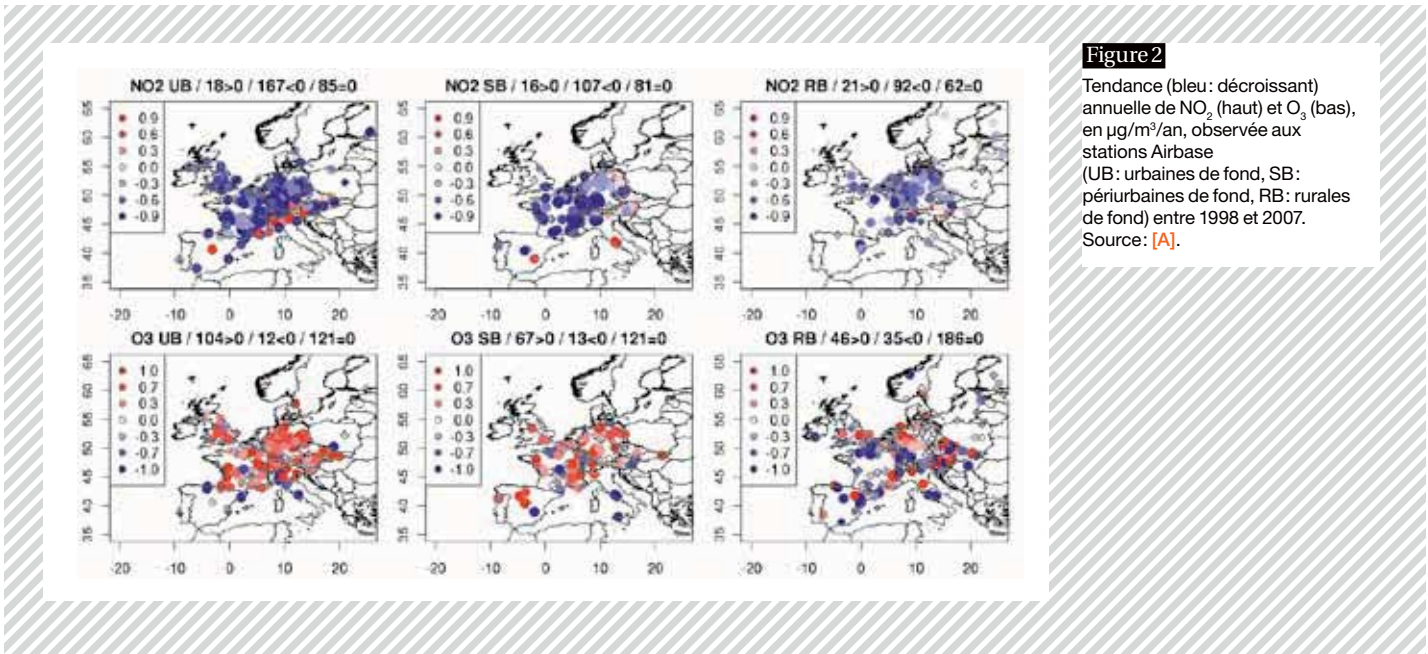
*the past decade: a first multi-model assessment.* Atmos. Chem Phys, 2011, 11, pp. 11657-11678.

[B] EEA. *Air quality in Europe. 2011 Report.* European Environmental Agency, Copenhagen, 12/2011.

### Tendances des émissions anthropiques

Les émissions de la plupart des polluants et précurseurs ont baissé significativement ces dernières années. Sur la période 1998-2007 couverte par le projet CityZen, la diminution des émissions a été principalement localisée sur les surfaces continentales **figure 1**, alors que l'augmentation du trafic maritime a conduit à une augmentation sur les principaux rails de fret. Des différences notables sont ➡





➔ aussi à souligner entre les différents pays européens. Alors que l'Allemagne, le Royaume-Uni et le Benelux ont vu leurs émissions baisser fortement à travers l'ensemble du pays, la baisse des émissions est plus limitée en France ou en Espagne, jusqu'à devenir une augmentation nette en Autriche, alors qu'en Italie, c'est une tendance avec de forts contrastes géographiques qui est rapportée.

### Tendances des concentrations observées

La baisse des émissions de NO<sub>x</sub> se traduit dans les observations par une baisse des concentrations de NO<sub>2</sub>, visible sur les mesures *in situ* des réseaux réglementaires de surveillance, qui fournissent leurs données à la base centrale AirBase de l'Agence européenne de l'environnement. La **figure 2** présente une cartographie de ces tendances, avec des points colorés en rouge lorsque celle-ci est significativement croissante du point de vue statistique. Ainsi, 8 % des stations seulement présentent une tendance de NO<sub>2</sub> significativement croissante. Il est aussi possible de noter dès à présent certaines différences entre l'évolution des émissions rapportées et les tendances des concentrations observées (par exemple en Autriche où l'augmentation est moins évidente que dans les émissions). Ces différences peuvent être attribuées soit à un défaut des inventaires d'émissions, soit à des facteurs externes tels qu'une pénalité climatique ou le transport de polluants à longue distance. Les tendances d'ozone (dont les NO<sub>x</sub> constituent l'un des précurseurs essentiels) présentent en revanche une pente positive, en particulier sur les zones urbaines. Ce comportement s'explique parfaitement par le régime chimique saturé en NO<sub>x</sub> qui prédomine dans les villes européennes où une baisse de NO<sub>x</sub> est suivie avant tout d'une baisse de l'efficacité du processus de titration nocturne de l'ozone (processus de destruction de l'ozone par les oxydes d'azote). Cette analyse est confirmée par la différence de comportement entre les types de station : en milieu rural, les tendances positives d'O<sub>3</sub> sont beaucoup plus rares, et principalement observées dans le bassin de la Ruhr – où la

notion même de station rurale ne revêt pas la même signification qu'ailleurs en Europe. On peut toutefois noter que, si la fraction de sites où l'ozone moyen annuel augmente significativement est de 31 %, ce chiffre baisse à 18 % lorsque l'on considère les maxima journaliers d'ozone. Cependant, la proportion de sites où l'ozone décroît significativement demeure minoritaire.

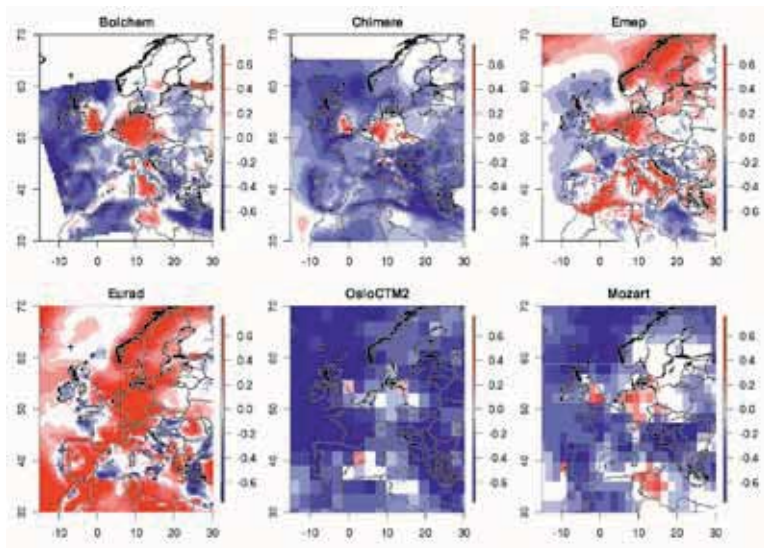
### Tendances modélisées

Les modèles numériques de qualité de l'air permettent d'identifier les principaux facteurs régissant les tendances observées et, en particulier, de comprendre si la variabilité interannuelle de la météorologie domine ou non la régulation des émissions anthropiques. En partant du postulat que les modèles sont capables de reproduire les tendances observées, il devient possible de les utiliser pour effectuer des études dites « de sensibilité », où l'on fait varier les paramètres indépendamment pour identifier les facteurs dominants.

Les modèles de qualité de l'air sont des outils numériques proposant une résolution conjointe :

- **des équations de mécanique des fluides** régissant le transport des espèces traces dans l'atmosphère ;
- **du système chimique** que ces espèces constituent.

En partant de champs météorologiques prescrits (vent, humidité, température, insolation, etc.) et d'émissions de polluants primaires, ces modèles sont en mesure de fournir une discrétisation spatiale et temporelle de la composition de l'atmosphère. Le modèle CHIMERE, développé par l'INERIS et l'IPSL/CNRS, est l'un de ces outils. Il est utilisé par plusieurs équipes en Europe à des fins de prévision opérationnelle, d'analyse de scénarios, ou de recherche. Il existe d'autres outils de ce type et l'un des principaux avantages des projets internationaux comme CityZen réside dans la mise en œuvre d'un ensemble de modèles afin de réduire les incertitudes liées aux outils choisis. Grâce à son expérience passée dans la conduite d'exercices d'intercomparaison de modèles, l'INERIS a pris la responsabilité de

**Figure 3**

Tendance (bleu: décroissant) annuelle d'ozone ( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{an}$ ) sur la période 1998-2007 simulée par les six modèles de qualité de l'air (BOLCHEM, CHIMERE, EMEP, EURAD, OsloCTM2, MOZART) impliqués dans le projet CityZEN. Source : [A].

coordonner cette première tentative de reconstruction de tendances décennales de qualité de l'air à l'échelle européenne. Il impliquait quatre modèles d'échelle régionale (résolution: 50 km) et deux modèles d'échelle globale (résolution 200 à 300 km).

Les tendances moyennes sur dix ans des concentrations annuelles d'ozone calculées par les six équipes européennes de CityZen sont représentées sur la [figure 3](#). La plupart des modèles s'accordent sur une tendance globalement négative à l'échelle européenne avec des zones où l'ozone moyen annuel augmente, en particulier dans les régions dominées par un régime saturé en  $\text{NO}_x$  (Benelux, Allemagne, sud-est du Royaume-Uni), où l'effet de titration mentionné plus haut domine. En comparant avec les observations [figure 2](#), il ressort que les modèles sont plus représentatifs des stations rurales, ce qui est naturel au vu de la résolution des simulations décennales. Seuls deux modèles présentent un diagnostic légèrement différent: Eurad propose une tendance à l'augmentation dominante tandis qu'OsloCTM2 capture moins bien les transformations chimiques du fait de sa faible résolution spatiale.

Dans l'ensemble, les modèles représentent bien les tendances observées. Le signe de l'évolution de l'ozone est correct à 63 % des stations périurbaines et rurales en moyenne pour les quatre modèles régionaux. De fortes disparités dans les performances des modèles sont obtenues selon les pays, avec des tendances mieux évaluées en Allemagne (signe correct à 90 % des stations) qu'en France (signe correct à 50 % des stations). En étudiant une période de dix ans, il est raisonnable d'attribuer ces disparités aux inventaires d'émissions, car les performances suivent précisément les frontières nationales. Nous pouvons donc conclure que, dans l'inventaire d'émissions utilisé ici, la décroissance des émissions de  $\text{NO}_x$  a été sous-estimée en certaines zones, et notamment en France [A]. Il faut toutefois noter qu'une mise à jour de la période post-2000 a été effectuée récemment dans les émissions officielles rapportées par la France, par rapport à la version, datant de 2009, utilisée ici.

Grâce à l'utilisation d'un ensemble de modèles, nous avons aussi pu tester la sensibilité à la variabilité météorologique. En reproduisant la simulation décennale tout en gardant les émissions anthropiques constantes, il a ainsi été possible de démontrer que l'amplitude des variations interannuelles excédait la tendance à long terme. Si une réponse aux variations des émissions de précurseurs est bien visible sur les tendances d'ozone, l'amplitude de cette réponse demeure faible sur les dix dernières années, notamment par rapport aux efforts consentis pour réduire les émissions. Les variations météorologiques sont bien susceptibles de masquer les efforts fournis sur la baisse des émissions, ce qui argue en faveur d'une évaluation plus précise de la pénalité climatique qui pèse sur la qualité de l'air des années à venir. ●

## Abstract

In order to assess the efficiency of air quality mitigation measures, an investigation of the decadal evolution of air quality over Europe was performed in the framework of the European research project CityZen. Significant downward trends of anthropogenic emissions were reported over the past decade, and these efforts lead to a decrease of  $\text{NO}_2$  levels observed at background sites throughout Europe. On the contrary, the ozone trend is insignificant or increasing at most sites (as a result of less efficient  $\text{NO}_x$  titration). To identify the factors influencing this trend, INERIS

coordinated an ambitious decadal numerical experiment involving six modelling teams implementing a variety of state-of-the-art models. The models were found to capture well the decreasing trend of  $\text{NO}_2$  on average over Europe despite degraded performances in selected countries attributed to shortcomings in the emission inventories. A complementary experiment using constant emissions over the past decade demonstrated that the lack of significant ozone trend can be largely attributed to the large interannual variability that exceeds the trend that would be attributed to mitigation measures.

# MICRO-ORGANISMES : MODÉLISATION DU TRANSPORT ATMOSPHÉRIQUE DES AÉROSOLS BIOLOGIQUES COUPLÉE AVEC UN MODÈLE DE SURVIE

## Contributeurs



Bertrand Bessagnet



Éric Tarnaud



Frédéric Tognet



L'épidémie de légionellose survenue à proximité de Lens pendant l'hiver 2003-2004 est à l'origine d'une étude exploratoire confiée à l'INERIS, qui traite de la diffusion dans l'atmosphère d'un panache contenant des micro-organismes et de l'identification de leur source. Dans le cadre de cette étude, l'INERIS s'est investi dans l'analyse et le développement des modèles de dispersion pour ces applications particulières ainsi que dans leur évaluation. L'objectif est d'améliorer la gestion des crises sanitaires associées aux légionelles, en développant une stratégie de recherche de l'aérosol bactérien, selon une double approche numérique et expérimentale. Il s'agit donc, en cas d'épidémie, de mettre en œuvre une chaîne de modélisation adaptée et d'identifier rapidement une zone géographique potentiellement contaminée. Ce thème a été élargi à l'étude de la dispersion des bioaérosols

en général. La démarche consiste à améliorer la connaissance de la dynamique des légionelles diffusées par les tours aéroréfrigérantes (TAR), en fiabilisant les modèles existants, avec l'implémentation de nouvelles paramétrisations décrivant au mieux les processus physiques et biologiques régissant la dispersion des micro-organismes et les constituants en eau d'un panache. Un module décrivant les conditions de survie et de cultivabilité des légionelles a ainsi été développé et couplé aux modèles de dispersion de type gaussiens, lagrangiens ou eulériens. Chaque modèle pouvant être sollicité, en fonction notamment de l'urgence de la situation et du temps disponible pour réaliser l'étude de dispersion. La validation de la chaîne de modélisation a été effectuée sur le cas de Lens. Une comparaison qualitative des sorties de modèles a été réalisée permettant de diagnostiquer que les aérosols pouvaient survivre dans l'air sans la présence d'eau liquide et donc se disperser sur des distances relativement importantes.

Une campagne de dispersion financée par l'Anses et menée avec le CSTB et le CEB en juin 2009 à partir d'un brumisateur ensemencé par des spores de *bacillus globigii* a permis de comparer quantitativement des concentrations mesurées à 50 m, 100 m, 200 m et 300 m de la source aux concentrations modélisées. Les concentrations obtenues sont du même ordre de grandeur pour la modélisation et les échantillonneurs **figures 1 et 2**. Cette vérification a confirmé la pertinence des développements réalisés. L'INERIS est donc doté de nouveaux modèles numériques d'aide à la décision pour la gestion de crises liées à la dispersion de micro-organismes de type légionelle. ●

## Références

Tognet F., Turmeau C., Ha T. L., Tarnaud E., Rouil L., Bessagnet B., Robine E., Morel Y. et al. *Numerical modelling of microorganisms dispersion in urban area: Application to legionella*. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO14), October 2-6, 2011, Kos, Greece, pp. 746-750.

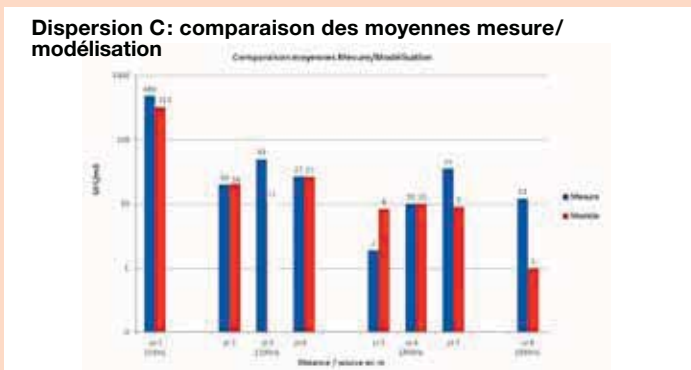
Thurmeau C., Tognet F., Tarnaud E., Ha T. L., Rouil L., *Modélisation numérique de la dispersion de micro-organismes en environnement périurbain*. ASFERA (Association française d'études et de recherche sur les aérosols), 2011.

Ha T. L., Robine E., Tarnaud E., Tognet F., Thurmeau C., Morel Y., Rouil L., *Detecting airborne microorganisms*

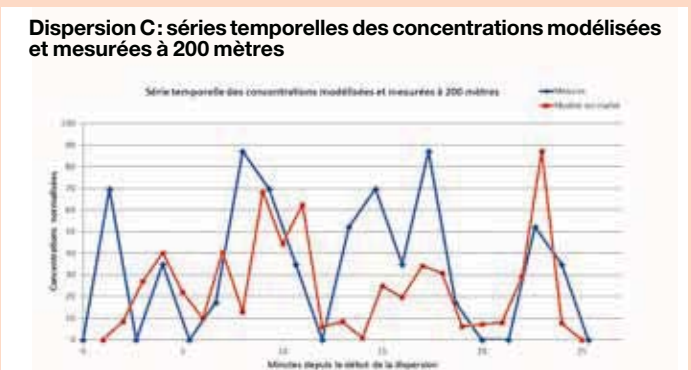
*by experimental and numerical tools: application to the spreading of Legionella pneumophila from cooling towers*, European Aerosols Conference, 2009.

Tarnaud E., Ha T. L., Robine E., Tognet F., Turmeau C., Morel Y., Rouil L., *Correlating numerical tools and experimental measurements for airborne microorganisms concentrations: application to the spreading of legionella pneumophila from cooling towers*, 7<sup>th</sup> International conference Legionella 2009, 13-17 October 2009, Paris.

Tognet F., Rouil L., Tarnaud E., *Dispersion des micro-organismes: modélisation de cas concrets et retour d'expérience*, Colloque national « Microbiologie des aérosols » (MicrobAERO 2009), 6-8 octobre 2009, Narbonne.



**Figure 1**  
Moyennes temporelles normalisées au point 2.



**Figure 2**  
Séries temporelles à 200 m normalisées par les maxima de concentrations.



## Contributeurs



Sélim Aït-Aïssa



Nicolas Creusot



Jean-Marc Porcher

# BIOANALYSE DES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS DANS LES MILIEUX AQUATIQUES

## Références

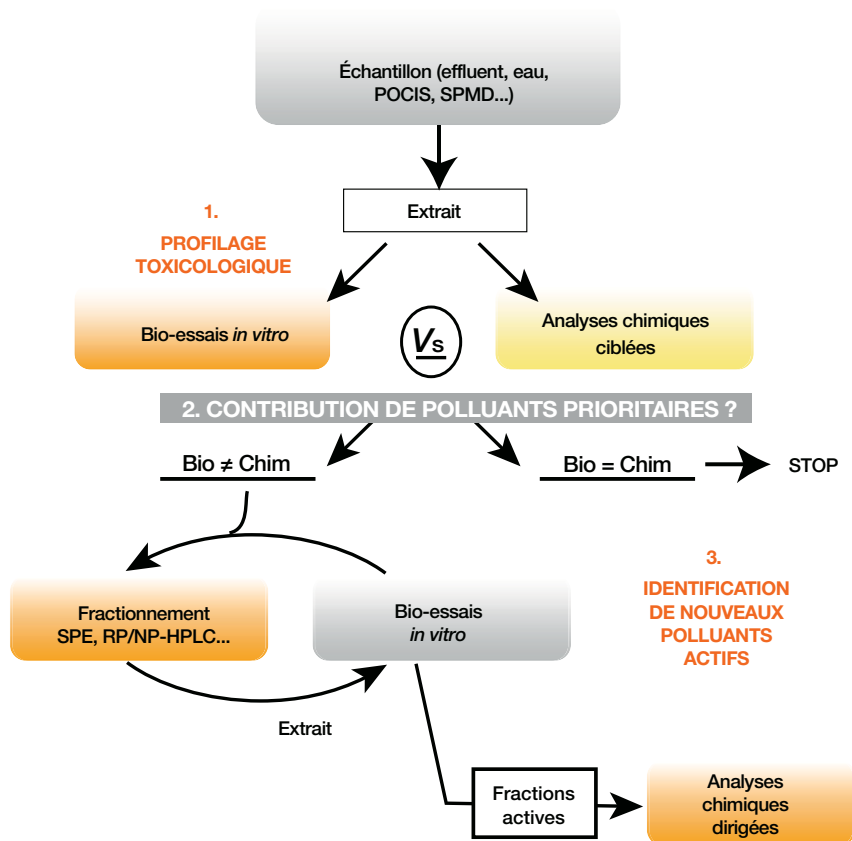
- ④ Aït-Aïssa S. *Outils bioanalytiques in vitro : principe et apports pour la surveillance des contaminants organiques dans le milieu aquatique*. INERIS, 2009, Convention-cadre INERIS-Onema 2008, Verneuil-en-Halatte, p. 26.
- ⑤ Aït-Aïssa S., Creusot N. *Veille relative aux avancées scientifiques et techniques des approches EDA pour la surveillance des substances émergentes*. INERIS, 2011, Convention-cadre INERIS-Onema 2010, Verneuil-en-Halatte, p. 10.
- ⑥ Creusot N. *Contribution de l'approche effect directed analysis à l'identification de perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques*. 2011, université Bordeaux I, Bordeaux, p. 268.
- ⑦ Creusot N., Kinani S., Balaguer P., Tapie N., LeMenach K., Maillot-Maréchal E., Porcher J. M., Budzinski H., Aït-Aïssa S. *Evaluation of an hPXR reporter gene assay for the detection of aquatic emerging pollutants: screening of chemicals and application to water samples*. Anal Bioanal Chem, 2010, 396, pp. 569-583.
- ⑧ Kinani S., Bouchonnet S., Creusot N., Bourcier S., Balaguer P., Porcher J. M., Aït-Aïssa S. *Bioanalytical characterisation of multiple endocrine- and dioxin-like activities in sediments from reference and impacted small rivers*. 2010, Environmental Pollution, 158, pp. 74-83.
- ⑨ Bellet V., Hernandez-Raquet G., Dagnino S., Seree L., Pardon P., Bancon-Montiny C., Fenet H., Creusot N., Aït-Aïssa S., Cavailles V., Budzinski H., Antignac J.-P., Balaguer P. *Occurrence of androgens in sewage treatment plants influents is associated with antagonist activities on other steroid receptors*. Water Research, 2012, 46, pp. 1912-1922.
- ⑩ Chang H., Wan Y., Hu J. Y. *Determination and source apportionment of five classes of steroid hormones in urban rivers*. Environmental Science & Technology, 2009, 43, pp. 7691-7698.
- ⑪ Kugathas S., Williams R. J., Sumpter J. P. *Prediction of environmental concentrations of glucocorticoids: the river Thames, UK, as an example*. Environment International, 2012, 40, pp. 15-23.
- ⑫ Brion F., Le Page Y., Piccini B., Cardoso O., Tong S.K., Chung B.C. and Kah O. *Screening estrogenic activities of chemicals or mixtures in vivo using transgenic (cyp19a1b-GFP) Zebrafish embryos*. Plos One, 2012, 7, p. 10.
- ⑬ Sanchez W., Sremski W., Piccini B., Palluel O., Maillot-Maréchal E., Betouille S., Jaffal A., Aït-Aïssa S., Brion F., Thybaud E., Hinfray N., Porcher J. M. *Adverse effects in wild fish living downstream from pharmaceutical manufacture discharges*. Environment International, 2011, 37, pp. 1342-1348.

Les systèmes aquatiques sont aujourd'hui contaminés par une multitude de polluants organiques, qui contribuent à l'altération de l'état chimique et écologique des écosystèmes. Actuellement, la surveillance de la qualité chimique des eaux est principalement réalisée au travers d'analyses chimiques ciblant des composés définis comme prioritaires ou pertinents (par exemple, liste des substances prioritaires – Directive-cadre sur l'eau, 2000/60/CE). Néanmoins, du fait de la grande diversité des familles de contaminants présents et des multiples transformations qu'ils subissent dans le milieu, ces analyses ciblées ne donnent qu'une image partielle de la contamination, et donc du danger (éco)toxique associé. D'autres approches, dites bioanalytiques, sont aujourd'hui disponibles et opérationnelles pour répondre aux enjeux de la surveillance de l'état chimique des eaux (effluents, rivières, etc.). En effet, l'utilisation de bioessais *in vitro* et *in vivo*, basés sur le mécanisme d'action moléculaire des substances, permet une détection sensible et pertinente du point de vue (éco)toxicologique de polluants actifs au sein de matrices environnementales (c'est-à-dire le profilage toxicologique). La combinaison de ces bioessais à des méthodes physico-chimiques d'analyse au sein de stratégies intégrées (notamment analyses dirigées par l'effet ou *Effect Directed Analysis* – EDA) permet l'identification chimique des contaminants effectivement responsables de l'activité biologique mesurée **figure 1**. L'ensemble fournit *in fine* un diagnostic intégré de la qualité chimique renseignant sur l'identité et sur le mode d'action des composés. Dans un contexte de surveillance, ces approches tendent à s'imposer comme la base de nouvelles stratégies qui permettent de caractériser l'occurrence et les effets (éco)toxicologiques des polluants chimiques [A][B].

### Détermination de profils d'activités des perturbateurs endocriniens dans des matrices environnementales

Dans le cadre de nos programmes de recherche, nous avons développé cette démarche pour la détection et l'identification de polluants perturbateurs endocriniens (PE) dans ➤





**Figure 1**  
 Démarche bioanalytique combinant outils cellulaires *in vitro* et analyses physico-chimiques pour caractériser et identifier des molécules d'intérêt (éco)toxicologique au sein de mélanges environnementaux complexes.

➔ diverses matrices de l'environnement aquatique [C] [D] [E]. Une majorité de PE environnementaux agissent en se fixant à des récepteurs intracellulaires, tels que les récepteurs des hormones stéroïdes (œstrogènes, androgènes, glucocorticoïdes) ou des xénobiotiques (AhR, PXR), et en modulant l'expression des gènes cibles de ces récepteurs. L'emploi de bioessais cellulaires exprimant un gène rapporteur couplé à ces différents récepteurs permet une détection rapide et spécifique de ces substances. À l'aide d'une batterie de bioessais *in vitro*, nous avons ainsi pu dresser des profils d'activités PE dans diverses matrices du milieu aquatique. Le **tableau 1** présente des exemples d'activités mesurées dans divers effluents urbains, industriels ou hospitaliers.

Ces études ont révélé la présence dans ces effluents de composés stéroïdiens autres que les œstrogènes classiquement retrouvés dans ce type d'échantillons. Elles illustrent l'intérêt de ce type de criblage biologique pour caractériser différents échantillons du point de vue qualitatif (détermination de profils d'activités) et quantitatif (détermination de toxiques équivalents ou TEQ), en préalable à l'analyse chimique plus coûteuse à mettre en œuvre. Récemment, une étude portant sur la caractérisation (bio-)analytique d'un effluent d'une station d'épuration montpelliéraine a confirmé l'occurrence de composés stéroïdiens multiples [F]. En plus des hormones œstrogéniques, cette étude a permis d'identifier plusieurs stéroïdes dans l'effluent, comme des androgènes (testostérone, dihydrotestostérone et épiandrosterone, par exemple), des

corticoïdes ou encore la prégnenolone, précurseur des hormones stéroïdes chez l'homme, qui contribuait significativement à l'activité antiminéralocorticoïde mesurée *in vitro* dans l'effluent. Ces données, obtenues sur des sites français, corroborent celles d'autres études récentes menées à l'étranger [G] [H]. En revanche, les effets de ces substances sur les organismes aquatiques restent encore peu renseignés. Nous avons néanmoins pu corrélérer l'occurrence *in situ* de corticoïdes (glucocorticoïdes, progestatifs) avec des altérations de la reproduction de poissons de rivière en aval d'un site industriel [I]. De plus, nous avons pu montrer au laboratoire que différents androgènes et progestatifs peuvent moduler l'expression de l'activité aromatasase dans le cerveau de larves de poisson zèbre [J]. L'ensemble de ces travaux montre que l'approche bioanalytique permet de mettre en évidence la présence de composés d'intérêt (éco)toxicologique non identifiés *a priori* dans les listes prioritaires. La caractérisation de l'occurrence et des effets de stéroïdes environnementaux non œstrogéniques, qu'ils soient d'origine naturelle ou synthétique (par exemple, pharmaceutique), s'impose comme une perspective majeure de recherche sur les perturbateurs endocriniens dans l'environnement. ●

#### Collaborations

P. Balaguer (INSERM U896, Montpellier); H. Budzinski (CNRS EPOC-LPTC, université de Bordeaux).

Tableau 1 - Activités des perturbateurs endocriniens mesurées par une batterie de tests *in vitro* dans différents types d'effluents.

Effluents	Activité œstrogénique (ng E2-eq/L)	Activité androgénique (ng DHT-eq/L)	Activité glucocorticoïde (µg DEX-eq/L)	Activité HAP-like (ng BaP-eq/L)
A (urbain)	1,6	6,4	n.d.	45
B (urbain)	1,3	14,9	n.d.	86
C (urbain)	0,9	11,4	n.d.	93
D (urbain)	87,9	445,9	n.d.	4533
E (urbain)	0,7	n.d.	n.d.	144
F (urbain)	4,6	6,9	n.d.	97
G (urbain)	2,4	n.d.	1,2	n.d.
H (urbain)	3,2	n.d.	0.18	231
I (indust./urbain)	8,2	14,1	n.d.	245
J (industriel)	0,4	n.d.	137,7	n.m.
K (hospitalier)	45,8	n.d.	~1,0	300
LD	0,03	0,5	0,02	2

n.d. : non détecté ;

LD : limite de détection ;

n.m. : non mesuré ;

E2-eq : équivalents estradiol ;

DHT-eq : équivalents dihydrotestostérone ;

DEX-eq : équivalents dexaméthasone ;

Bap-eq : équivalents benzo(a)pyrène.

## Abstract

Mechanism-based *in vitro* and *in vivo* bioassays are increasingly used as part of integrated bio-analytical strategies, for the monitoring of both classical and emerging chemical contaminants in the aquatic environment. Here, we describe such an approach based on the combination of *in vitro* screening biological tools and physico-chemical methods and used to detect and identify endocrine disruptive chemicals (EDCs) in different environmental matrices such as effluents, sediment or surface

waters. The developed approach is exemplified by the determination of steroid and xenobiotic activities profiles in various wastewater effluents and the further chemical identification of active compounds using bioassay-directed analysis. Eventually, the complementary use of innovative *in vivo* screening assays using zebrafish provide further useful information on the biological impact of active contaminants or samples, hence improving significantly chemical hazard assessment of analyzed samples.

# ACCOMPAGNER LE DÉVELOPPEMENT DES PHYTOTECHNOLOGIES

## Contributeurs



Valérie Bert



Martine Ramel



Rodolphe Gaucher



Depuis plusieurs années, l'INERIS mène des projets scientifiques basés sur des expérimentations en vraie grandeur pour évaluer les performances des phytotechnologies [A] [B].

Parmi les projets en cours, PHYTOSED échelle 1, initié en 2011, étudie l'efficacité et la pérennité de la phytostabilisation aidée, couplée à une valorisation énergétique de la biomasse. La phytostabilisation aidée est une technique fondée sur l'utilisation conjointe de plantes et d'amendement, pour réduire la disponibilité des éléments traces (ET). Ce projet vise à accroître les connaissances sur les transferts des ET entre les différents compartiments environnementaux et à acquérir des données technico-économiques sur la filière mise en œuvre. Les connaissances acquises dans le cadre des projets précédents

ont permis le passage à l'échelle d'un terrain de dépôt de sédiments pollués par les ET [A]. Ce projet financé par l'ADEME et Voies navigables de France (VNF) met en œuvre, sur un hectare, une combinaison de plantes herbacées (*D. cespitosa* variété « Barcampisia ») et de ligneux à croissance rapide (*Salix* variétés « Inger » et « Tordis ») avec un amendement minéral basique. Les premiers résultats montrent le succès de l'établissement de la canche avec un recouvrement au sol proche de 100 %, et celui de la plantation de saules **photo 1**. GREENLAND est un projet européen (FP7, KBBE-2010-4, 266124; <http://www.greenland-project.eu/>) dans lequel l'INERIS assure le pilotage des travaux relatifs aux filières de valorisation de la biomasse végétale produite sur des sites pollués par les ET dans le cadre des phytotechnologies. Des essais avec des procédés innovants (par exemple, la solvolysse) et classiques (comme la combustion et la méthanisation) ont été conduits avec des végétaux herbacés et ligneux contenant des quantités variées d'ET [C] [D]. L'objectif de ces essais est notamment de renseigner sur l'impact éventuel des ET sur le fonctionnement et la performance des procédés et le devenir de ces contaminants tout au long de la filière de valorisation. Les essais de combustion réalisés sur de la biomasse cultivée dans le cadre d'une expérimentation de phytoextraction sur sol contaminé montrent que le zinc (Zn) et le cadmium (Cd) se retrouvent majoritairement dans la phase particulaire des fumées et donc qu'un système de filtration efficace permettrait de retenir l'essentiel des émissions. ●

## Références

<sup>A</sup> Bert V., Lors Ch., Ponge J.-F., Caron L., Biaz A., Dazy M., Masfaraud J.-F. *Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: a field study focusing on plants, springtails, and bacteria*. Environ Pollut, 2012, 169, pp. 1-11.

<sup>B</sup> Mench M., Lepp N., Bert V., Schwitzguébel J.-P., Schröder P., Gawronski S., Vangronsveld J., *Successes and limitations of phytotechnologies at field scale. Outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. Journal Soils Sediments*, 2010, 10, pp. 1039-1070.

<sup>C</sup> Bert V., Delplanque M., Del Gratta F., Gaucher R., Collet S. *Study of the potential valorization of metal*

*contaminated Salix via phytoextraction by combustion. ICOBTE, 11<sup>th</sup> International Conference on the biogeochemistry of trace elements*, July 3-7, 2011, Florence (Italy).

<sup>D</sup> Bert V., Collet S., Delgratta F., Schnuriger B., Dimitriou J., Herzig R., Vangronsveld J., Mench M., Loppinet-Serani A., Lemaître P., Sarrail G., Pierz A., Siebielec G., Galazka R., Puschenreiter M. *Valorisation of plant biomass harvested at trace element-contaminated sites managed by gentle (phyto) remediation options. 2012, Short platform presentation and poster. 9<sup>th</sup> International Phytotechnology Society (IPS), Hasselt (Belgium), September 2012, pp. 11-14.*

### Photo 1

Plantation de saules et d'herbacées sur un hectare d'un terrain de dépôt de sédiments pollués par les éléments traces, après incorporation préalable d'un amendement minéral basique (phytostabilisation aidée).



## Contributeurs



Jean-Marc Porcher



Wilfried Sanchez

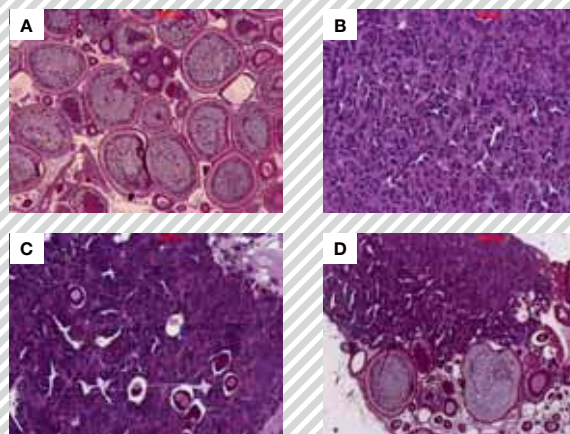


Figure 1

Coupes histologiques de gonades de goujons échantillonnés en amont (A: ovaire et B: testicule) et en aval (C et D) d'un rejet industriel. C et D correspondent aux gonades d'individus intersexués ; des cellules de la lignée spermatique et ovocytaire sont présentes au sein du même organe.

## UTILISATION DES BIOMARQUEURS POUR LA SURVEILLANCE DES REJETS INDUSTRIELS

### Cas des effluents de l'industrie pharmaceutique

Les biomarqueurs peuvent se définir comme un paramètre mesurable au niveau infra-individuel dont l'altération révèle un risque pour les organismes, voire un risque de non-maintien des populations dans leur milieu [A]. Il s'agit d'outils utilisables pour la surveillance de la qualité des milieux aquatiques, qui permettent d'intégrer les effets globaux des stress environnementaux sur les organismes, tout en considérant les interactions avec les facteurs biotiques et abiotiques. De nombreux travaux ont d'ailleurs mis en avant la pertinence du déploiement des biomarqueurs dans le cadre des programmes de surveillance de la directive-cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE) pour contribuer à l'atteinte du bon état des masses d'eau [B] [C] [D]. Ces indicateurs biologiques restent toutefois peu utilisés dans un contexte réglementaire. De récents travaux menés par l'INERIS, en collaboration avec l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA) et le laboratoire Interaction animal environnement de l'université de Reims (IEA), ont mis en lumière l'intérêt de ces outils dans le cadre d'un contentieux environnemental lié à un rejet industriel.

### Références

- ④ Sanchez W. *Utilisation des biomarqueurs pour la surveillance des milieux aquatiques : vers un changement de paradigme dans les programmes de surveillance*. Habilitation à diriger la recherche, Université de Reims Champagne-Ardenne, juin 2012, 102 p. + annexes.
- ⑤ 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.
- ⑥ Sanchez W., Bado-Nilles A., Porcher J.-M. *Biomarqueurs chez le poisson : un outil d'intérêt pour le contrôle d'enquête*. La Houille Blanche, 2012, 2, pp. 49-54.
- ⑦ Sanchez W., Burgeot T., Perceval O. *Perspectives from the French workshop on the development and validation of biomarkers and bioassays for the monitoring of aquatic environments*. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 19 (4), p. 1345.
- ⑧ Brion F., Nilsen B.M., Eidem J.K., Goksoyr A., Porcher J.-M. *Development and validation of an enzyme-linked immunosorbent assay to measure vitellogenin in the zebrafish (Danio rerio)*. Environmental Toxicology and Chemistry, 2002, 28 (8), pp. 1699-1708.
- ⑨ Sanchez W., Sremski W., Piccini B., Palluel O., Maillot-Maréchal E., Betoulle S., Jaffal A., Ait-Aissa S., Thybaud E., Brion F., Hinfray N., Porcher J.-M. *Adverse effects in wild fish living downstream from pharmaceutical manufacture discharges*. Environment International, 2011, 37, pp. 1342-1348.
- ⑩ Gilbert N. *Drug waste harms fish*. Nature, 2011, 476, p. 265.

### Étude de cas autour du rejet d'une usine pharmaceutique

En 2008, des pêcheurs rapportaient l'existence de goujons (*Gobio gobio*) présentant un gonflement de l'abdomen associé à une hypertrophie des gonades dans une zone soumise à des rejets d'origine urbaine (deux stations d'épuration de 8 100 et 1 800 équivalents-habitant) et recevant également les effluents d'une industrie produisant des principes actifs médicamenteux. Afin de déterminer les causes de ces anomalies morphologiques, des prélèvements de goujons ont été réalisés par pêche électrique au cours de l'automne 2008 et 2009 sur trois sites, dont deux sont situés en aval des effluents urbains et industriels. En raison de la possible implication de polluants perturbateurs endocriniens dans les effets observés, des paramètres liés à la fonction de reproduction ont été mesurés sur chaque poisson :

- La vitellogénine (VTG), qui est une protéine œstrogéno-régulée, naturellement présente chez les poissons femelles et



➔ induite chez les mâles et les juvéniles exposés à des œstrogènes [E], a été mesurée dans le sang des poissons afin de caractériser une éventuelle exposition à des contaminants œstrogéniques.

• Une analyse histologique du tissu gonadique a été effectuée afin de confirmer le sexe des poissons et de mettre en évidence des perturbations du tissu reproducteur. Le premier type de perturbation examinée est la présence d'intersexe, c'est-à-dire de cellules femelles dans des gonades mâles ou inversement. D'autres anomalies comme les fibroses ou les nécroses sont également recherchées.

• L'indice gonado-somatique qui traduit la proportion de gonades dans le poisson a également été calculé afin de mettre en évidence une atteinte au niveau de l'organe reproducteur. Des biomarqueurs liés à la métabolisation des polluants organiques (activités catalytiques des cytochromes P450 1A et 3A et de la glutathion-S-transférase), et reflétant l'exposition à différentes familles de contaminants, ont aussi été mesurés tout comme l'activité de l'acétylcholinestérase (AChE) qui est un indicateur d'effets neurotoxiques.

Les goujons échantillonnés en aval des rejets se caractérisent par une induction significative de la VTG et une importante intersexualité gonadique (figure 1) par rapport aux poissons provenant du site amont. Ce résultat confirme l'implication de polluants perturbateurs endocriniens dans les effets observés. De plus, l'analyse du sexe-ratio des populations de goujons rencontrées sur les sites d'étude montre un déséquilibre de ce paramètre avec, sur les sites en aval des rejets, une diminution du nombre de goujons femelles au profit des individus intersexués (figure 2). Ce profil de réponse apparaît comme atypique. En effet, peu d'études scientifiques décrivent la masculinisation des populations sauvages, alors que la féminisation est plus couramment observée, notamment en aval des stations d'épuration urbaines. Les réponses observées semblent toutefois cohérentes avec la nature du rejet industriel provenant d'une installation impliquée dans la production de substances à activité hormonale, dont les effets masculinisants sont décrits au travers d'études réalisées en laboratoire [F]. La réponse des enzymes de biotransformation et de l'AChE révèle que le cours d'eau subit aussi différentes pressions d'origine urbaine et agricole sur l'ensemble de son linéaire.

Dans cette étude, la mise en œuvre d'une batterie de biomarqueurs a permis de mettre en évidence l'existence d'un phénomène de perturbation endocrinienne chez les poissons échantillonnés en aval de rejets urbains, mais aussi industriels. Elle a également permis de montrer que sur le cours d'eau étudié, les poissons étaient également soumis à une exposition à des polluants organiques, dont l'origine est indépendante des rejets étudiés. Afin d'évaluer une éventuelle conséquence de ces perturbations de la fonction de reproduction au niveau du peuplement piscicole, une étude populationnelle a été réalisée en parallèle sur les trois sites étudiés. Les résultats obtenus mettaient alors en évidence une diminution significative de la densité de poissons entre l'amont et l'aval de la zone d'étude, cette dernière passant de 301 à 74 individus pour 938 m<sup>2</sup>.

Cette étude montre que les biomarqueurs sont des outils opérationnels permettant de déterminer l'origine de perturbations morphologiques et de perturbations des peuplements piscicoles observées en aval d'un rejet industriel. Ces indicateurs biologiques pourraient alors trouver leur place dans le cadre du contrôle d'enquête de la DCE ou du suivi des installations classées. Les résultats obtenus confirment également les conclusions de travaux réalisés dans différents pays [G],

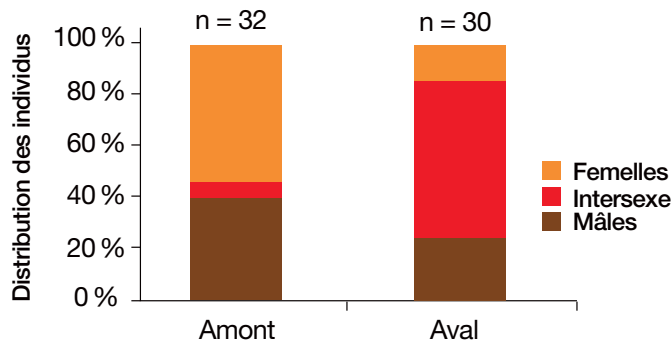


Figure 2

Analyse du sexe-ratio de la population de goujon (*Gobio gobio*) échantillonnés en 2008 et 2009 à l'amont et à l'aval d'un rejet industriel. Les effectifs représentent le nombre de poissons analysés au cours de deux années.

montrant que les rejets des usines impliquées dans la synthèse et la formation des médicaments contiennent des substances actives capables d'induire des effets néfastes pour la santé des organismes et le maintien de la biodiversité. Des travaux complémentaires sont actuellement en cours afin d'évaluer si l'établissement sélectionné pour cette première étude est un cas isolé ou s'il s'agit d'une généralité non démontrée et que des effets sur la faune aquatique méritent d'être mieux surveillés en aval d'une majorité d'établissements de l'industrie pharmaceutique. ●

## Abstract

Biomarkers are described as relevant parameters to assess the effects of aquatic ecosystems in wild fish species and could be used in environmental monitoring activities. In the present study, a set of biochemical and histological indicators was measured in wild gudgeon collected upstream and downstream of urban and pharmaceutical manufacture effluents. These individual end-points were associated to fish assemblage characterisation. Responses of these biomarkers revealed contamination of investigated stream by a mixture of pollutants. Fish from sampled sites downstream of the industrial effluent

exhibited also strong signs of endocrine disruption including vitellogenin induction, intersex and male-biased sex-ratio. These individual effects were associated to a decrease of density and a lack of sensitive fish species. This evidence supports the hypothesis that pharmaceutical compounds discharged in stream are involved in recorded endocrine disruption effects and fish population disturbances and threaten disappearance of resident fish species. Overall, this study gives argument for the utilisation of an effect-based monitoring approach to assess impacts of pharmaceutical manufacture discharges on wild fish populations.

## Contributeurs



Philippe Gombert



Jean Rillard

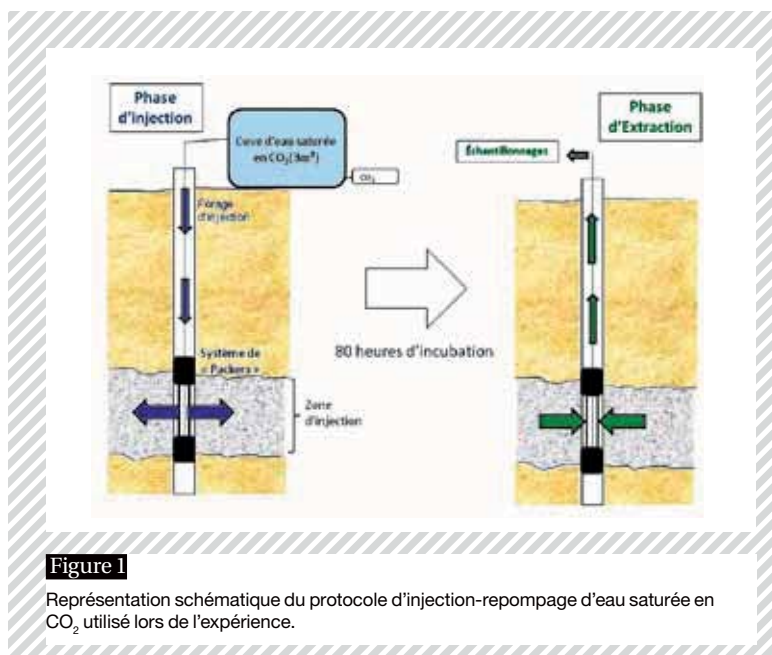


Figure 1

Représentation schématique du protocole d'injection-repompage d'eau saturée en  $\text{CO}_2$  utilisé lors de l'expérience.

## GÉOCHIMIE DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU $\text{CO}_2$

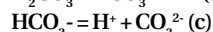
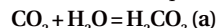
### OUTILS D'ÉTUDES DES RISQUES DE REMOBILISATION DES MÉTAUX LOURDS

Le stockage géologique du  $\text{CO}_2$  est l'une des solutions envisagées pour limiter l'accumulation de ce gaz à effet de serre dans l'atmosphère. La technique consiste à capter le  $\text{CO}_2$  auprès des sources d'émissions concentrées (centrales thermiques, chaufferies, cimenteries, etc.), à le transporter, puis à l'injecter dans des roches réservoirs profondes où il devra rester isolé de la surface pendant plusieurs milliers d'années. Les sites de stockage ciblés sont principalement des « aquifères salins profonds », qui sont des réservoirs d'eau profonde à forte salinité (ou « saumure »), non utilisable pour l'eau potable, ainsi que d'anciens réservoirs d'hydrocarbures épuisés ou encore des couches de charbon, du fait de leur grande capacité d'absorption du  $\text{CO}_2$ . Dans le cas des aquifères salins profonds, option étudiée ici, le stockage de  $\text{CO}_2$  s'effectue à la fois par un piégeage mécanique au sein du réservoir étanche, mais également par interactions physico-chimiques entre l'eau en place et la roche réservoir. Ces interactions  $\text{CO}_2$ -eau-roche piègent du  $\text{CO}_2$  par dissolution et par précipitation de nouveaux minéraux. Ces processus sont dépendants de nombreux paramètres intrinsèques du réservoir profond tels que la pression, la température, la porosité, la perméabilité, la composition minéralogique de la roche réservoir, la composition chimique de l'eau, etc.

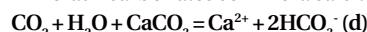
Dans ce contexte, l'INERIS étudie les risques liés à cette technologie émergente [A] [B].

#### Géochimie du système $\text{CO}_2$ -eau-roche

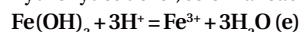
La dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau engendre une acidification du milieu par production d'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$  selon les réactions chimiques (a), (b) et (c).



L'acidification du milieu, qui résulte de la dissolution du  $\text{CO}_2$ , engendre la dissolution de certains minéraux, notamment les minéraux carbonatés comme la calcite selon la réaction (d).



Ce type de réaction – qui peut se produire avec d'autres minéraux carbonatés comme la dolomite (Ca, Mg), la sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ) [C], la cérusite (Pb), etc. – est à l'origine de la libération de nombreux éléments chimiques dans la phase aqueuse du réservoir. Cette dissolution pourra également concerner d'autres minéraux contenant des métaux, par exemple des hydroxydes de fer, selon la réaction (e).



Les hydroxydes de fer et d'autres minéraux, comme les argiles et les minéraux sulfurés, peuvent contenir des métaux lourds potentiellement toxiques (As, Pb, Zn, Cu, U, etc.). Leur dissolution pourra donc engendrer une libération de ces éléments dans l'eau du réservoir [D] [E].

En effet, des expériences antérieures ont montré que l'injection de  $\text{CO}_2$  en aquifère salin profond pouvait engendrer de fortes augmentations en métaux dissous tels que le fer (Fe) et le manganèse (Mn) dans la saumure profonde [F]. De plus, l'analyse des analogues naturels que sont les eaux profondes naturellement riches en  $\text{CO}_2$  (sources hydrothermales) montre la présence de concentrations significatives en métaux [G] [H]. Cette mise en solution de métaux dans l'eau profonde peut engendrer un risque en cas de migration de cette eau en dehors du réservoir de stockage : il s'agit donc d'un risque potentiel à long terme pour la ressource en eau souterraine. ▶



Photo 1

Filtration et conditionnement *in situ* des échantillons sous azote.



Photo 2

Mise en place de la colonne d'injection dans le forage.

## Références

- ④ Poirot N., Thoraval A., Gombert P. *Synthèse de l'état des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO<sub>2</sub>*. Rapport INERIS DRS-08-95145-11842A, 2008.
- 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, n° 213, mai-juin 2009, pp. 142-153.
- ⑥ Bénézet P., Golubev S., Dandurand J.-L., Schott J. *Détermination du produit de solubilité de la sidérite (FeCO<sub>3</sub>) et de sa cinétique de dissolution en fonction de la température et de la pression de CO<sub>2</sub>*. Séminaire « Captage et stockage du CO<sub>2</sub> », 12-13 décembre 2007, Pau, pp. 18-19.
- ⑦ Knauss K. G., Johnson J. W., Steefel C. *Evaluation of the impact of CO<sub>2</sub> co-contaminant gas, aqueous fluid and reservoir rock interactions on the geologic sequestration of CO<sub>2</sub>*. Chemical Geology, 2005, vol. 217, 3-4, pp. 339-350.
- ⑧ Wang F., Jaffe R. *Dissolution of a mineral phase in potable aquifers due to CO<sub>2</sub> releases from deep formations, effect of dissolution kinetics*. Energy conversion and management, 2004, 45, pp. 2833-2844.
- ⑨ Kharaka Y. K., Cole D. R., Hovorka S. D., Gunter W. D., Knauss K. G., Freifeld B. M. *Gas-water-rock interactions in Frio Formation following CO<sub>2</sub> injection: Implications for the storage of greenhouse gases in sedimentary basins*. Geology, 2006, 34, pp. 577-580.
- ⑩ GIEC. *Piégeage et stockage du dioxyde de carbone. Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique*. Rapport spécial du GIEC, 2005, 66 p.
- ⑪ Rillard J. *Les fluides hydrothermaux continentaux comme analogues naturels de fuite de fluides profonds riches en CO<sub>2</sub>: synthèse bibliographique*. Rapport INERIS DRS-10-100887-09969A, 2010.
- ⑫ Rillard J., Toulhoat P., Gombert P. *Enseignements tirés de l'étude des éléments traces dans les sources carbogazeuses pour le stockage géologique du CO<sub>2</sub>*. Résumés de la 23<sup>e</sup> Réunion des sciences de la Terre, Bordeaux, 25-29 octobre 2010, pp. 247-248.
- ⑬ Rillard J., Gombert P., Zuddas P. *Impact of CO<sub>2</sub> injection on groundwater chemistry and trace elements behavior: results from a field experiment*. European Mineralogy Conference, septembre 2012, Francfort (Allemagne).
- ⑭ Little M. G., Jackson R. B. *Potential impacts of leakage from deep CO<sub>2</sub> geosequestration on overlying freshwater aquifers*. Environmental Science and Technology, 2010, 44 (23) pp. 9225-9232.

## Notes

1. Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry.
2. Inductively coupled plasma atomic mass spectrometry.

➔ Dans ce contexte, l'étude du comportement des métaux dans les processus d'interactions CO<sub>2</sub>-eau-roche apparaît primordiale pour envisager le stockage géologique du CO<sub>2</sub> comme une solution viable à long terme [1] [2].

## Protocole, matériel et méthode

Afin d'étudier le comportement des métaux intervenant dans ces processus d'interactions, une expérience d'injection d'eau saturée en CO<sub>2</sub> a été effectuée dans un aquifère contenu dans des terrains naturellement riches en métaux (Fe, Mn, Zn, As, Mo, Ba, U, etc.). L'expérience a consisté à injecter 3 m<sup>3</sup> d'eau saturée en CO<sub>2</sub> dans un forage à 56 mètres de profondeur. La solution injectée a été laissée en contact avec le milieu pendant quatre-vingts heures, puis a été pompée pendant soixante-douze heures **figure 1** et **photo 2**. Une analyse physico-chimique précise des eaux avant et après injection a été effectuée afin d'analyser et de quantifier les perturbations engendrées par l'injection d'eau saturée en CO<sub>2</sub>. À noter que la phase de repompage a été poursuivie jusqu'à ce que l'eau pompée soit revenue à sa composition chimique initiale, afin de récupérer l'intégralité de la perturbation générée par l'injection du mélange eau-CO<sub>2</sub>. Un suivi en continu des paramètres physico-chimiques (pH, température, redox, oxygène dissous) a été réalisé pendant les phases d'injections et de repompage. Des mesures de Fe<sup>2+</sup> par spectrophotométrie et des dosages à l'acide de la capacité tampon des eaux (alcalinité) ont également été effectués directement sur le terrain. Enfin, des échantillons ont été pris à intervalles réguliers pour des analyses ultérieures d'éléments traces suivant un protocole de filtration et d'acidification sous azote dans le but d'éviter toute mise en contact des échantillons avec l'atmosphère ou toutes autres pollutions externes **photo 1**.

Ces échantillons ont ensuite fait l'objet de trois séries d'analyses effectuées au laboratoire RESA (Ressources analytiques) de la Direction des risques chroniques de l'INERIS : par chromatographie ionique pour les cations et anions majeurs (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>), par ICPAES<sup>1</sup> pour les mesures de Si, Fe, Mn et U et, enfin, par ICPMS<sup>2</sup> pour les mesures de Al, Zn, Pb, Cu, As, B, Ba, Mo, Sr.

**Tableau 1** - Synthèse des principaux facteurs d'enrichissement mesurés lors de l'expérience d'injection du mélange eau-CO<sub>2</sub> en aquifère.

		Facteurs d'enrichissement après injection de CO <sub>2</sub>
Éléments majeurs	Mg	× 1,5
	Ca	× 1,5
	Si	× 1,5
Éléments traces métalliques	Zn	× 25
	Fe	× 13
	Mn	× 5
	Al	× 3
	As	× 2
	B	× 2
	Ba	× 1,5
	Rb	× 1,5
Alcalino-terreux	Li	× 1,3
	Sr	× 1,3

### Résultats et discussions

L'injection d'eau saturée en CO<sub>2</sub> a fortement perturbé le pH de l'eau de l'aquifère, qui est passé de 7,3 à 5,7, du fait de l'acidification induite par la dissolution du CO<sub>2</sub>. On a également observé une augmentation en Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans l'eau de l'aquifère, ce qui indique que le système CO<sub>2</sub>-eau-roche a bien réagi. Par ailleurs, une forte augmentation des concentrations en métaux a également été mesurée : la concentration en manganèse (Mn) a ainsi été multipliée par 5 (par rapport à la concentration initiale avant injection du mélange eau-CO<sub>2</sub>), celle en fer (Fe) par 13, et celle en zinc (Zn) par 25. D'autres éléments traces tels que l'arsenic (As) ont également montré une augmentation significative par rapport aux conditions initiales. Les principaux résultats sont résumés dans le [tableau 1](#).

À l'origine de ces enrichissements, on trouve les processus de dissolution des minéraux composant la roche réservoir, induits principalement par une acidification du milieu et, dans une moindre mesure, par une perturbation du redox de l'eau. Un résultat important à souligner est que les facteurs d'enrichissements mesurés sont différents selon les éléments chimiques. Ainsi, alors que le zinc (Zn) et l'arsenic (As) étaient dans des concentrations comparables dans l'eau avant l'injection, le facteur d'enrichissement du zinc est supérieur d'un ordre de grandeur à celui de l'arsenic. Ces résultats mettent en avant des phénoménologies différentes dans la phase aqueuse selon les espèces chimiques. En effet, des calculs d'équilibres thermodynamiques montrent que des éléments tels que le fer (Fe) et le zinc (Zn) sont beaucoup plus mobiles dans la phase aqueuse du fait de phénomènes de spéciation, notamment par des anions carbonatés (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ce processus de spéciation peut être à l'origine de ces différences de facteurs d'enrichissement entre les différentes espèces métalliques mesurées.

### Conclusion

Cette expérience a permis clairement d'identifier, dans les conditions choisies, un phénomène d'enrichissement de l'eau souterraine en métaux dissous suite à l'injection d'eau saturée en CO<sub>2</sub>. L'acidification du système par l'acide carbonique est le mécanisme principal à l'origine de cet enrichissement. Par

ailleurs, il a été mis en avant que cette dissolution des métaux est accentuée par des phénomènes de spéciation en phase aqueuse par des espèces telles que les anions carbonatés (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Ce type de phénomène devra être étudié en détail dans la perspective des futurs sites de stockage de CO<sub>2</sub>.

En dehors de l'application spécifique au stockage géologique du CO<sub>2</sub>, ce travail a apporté de nombreuses informations intéressantes sur le transfert des métaux lourds dans les eaux souterraines. Il peut également avoir des applications dans d'autres domaines tels que la gestion des sites et sols pollués, la géothermie, l'exploitation des terres rares, le stockage souterrain des déchets, etc. ●

### Abstract

Carbon Capture and Storage (CCS) is considered as potential solution to mitigate accumulation of greenhouse gas into the atmosphere. However, since many years, several works highlighted the potential environmental impact of those technologies for a long term prospective. Special focus is based on the risk of remobilisation and transfer of metals species into groundwater induced by CO<sub>2</sub> perturbation. We performed a field experiment based on single well injection of small volume (3m<sup>3</sup>) of water-CO<sub>2</sub> saturated. This experience was performed in aquifer presented a rock reservoir

naturally concentrated in different metals species (Fe, Mn, U, As, Zn, Pb, etc.). We found that CO<sub>2</sub> perturbation produced important quantity of carbonate, and an enrichment of several orders of magnitude in metal species concentration (Fe, Mn, Zn, As, etc.) into the groundwater. We propose that acidification due to CO<sub>2</sub> injection induced dissolution of minerals, as a first source of metals species. Result showed different enrichment factors, depending on measured metals species. Those differences can be explained by secondary reaction of complexation of metals by carbonate species which could have increased the release of metals species into the groundwater.



## Contributeurs



Arnaud Charmoille



Amélie Lecomte

# ÉVALUATION DE L'ALÉA MOUVEMENT DE TERRAIN LIÉ AUX PROCESSUS NATURELS DE DISSOLUTION DES ROCHES

L'impact en surface du développement de cavités de dissolution dans des couches de gypse peut s'avérer très important pour les infrastructures [A] [B] [C] [D] [E].

En France, la région parisienne est fortement impactée par ces phénomènes de dissolution liés au gypse présent dans les terrains d'âges bartonien et lutétien. Le fonctionnement hydrogéologique y est très complexe, caractérisé par plusieurs aquifères superposés, intervenant dans le processus de dissolution.

La Direction des risques du sol et du sous-sol (DRS) mène depuis plusieurs années des travaux de recherche sur la dissolution des horizons géologiques solubles. L'un des objectifs de ces travaux est d'améliorer l'évaluation des risques de mouvement de terrain liés à ce type de mécanisme. Cette étude, réalisée en collaboration avec le département de Seine-Saint-Denis, a permis d'étudier dans le détail les mécanismes moteurs du processus de dissolution dans un contexte typique du Bassin parisien et de développer une méthodologie adaptée à l'évaluation de l'aléa mouvement de terrain dans ce type d'environnement.

## Contexte

Le bois de la Tussion, situé sur la commune de Villepinte, à environ 15 km au nord-est de Paris, correspond à une zone forestière couvrant 18,6 ha [figures 1a et 1b]. Dans le secteur d'étude, au-dessous des marnes infragypseuses du Bartonien

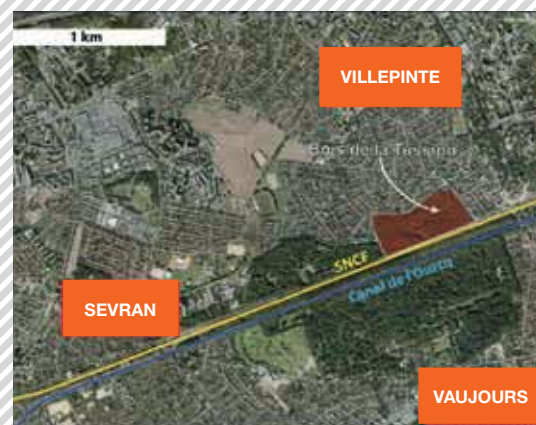


Figure 1a

Localisation du secteur étudié (Google Earth).

supérieur, on trouve plusieurs couches de gypse englobées dans les trois aquifères sous-jacents [figure 2]:

- 0 à 5 m de gypse entre 10 et 15 m de profondeur, dans l'aquifère des marnes infragypseuses (Bartonien supérieur);
- moins de 1 m de gypse à 20 m de profondeur dans l'aquifère marno-calcaire de Saint-Ouen (Bartonien inférieur);
- 1 à 2 m de gypse à environ 50 m de profondeur dans l'aquifère des marnes et caillasses (Lutétien).

## Fonctionnement du système de dissolution

Sur le plan hydrogéologique, les données recueillies permettent de caractériser les trois aquifères:

- l'aquifère des marnes supragypseuses, le plus superficiel, dont la morphologie de la surface piézométrique est restée sensiblement la même depuis dix ans;
- les aquifères des marnes et caillasses et du calcaire de Saint-Ouen, captifs et dont la charge dépasse celle de l'aquifère des marnes supragypseuses.

D'un point de vue hydrochimique, c'est l'aquifère du calcaire de Saint-Ouen qui possède le potentiel de dissolution du gypse le plus important (vitesse de dissolution de 0,17 g/jour d'après les mesures *in situ* réalisées au cours de l'étude) par rapport à l'aquifère des marnes infragypseuses (0,01 à 0,12 g/jour).

Les investigations géotechniques ont permis de répertorier 116 fontis et 134 affaissements dans la zone du bois actuellement fermée au public, révélant notamment une zone active d'affaissement au centre du bois (10 mm d'affaissement maximal entre 1998 et 2008).

Si l'on considère l'épaisseur de gypse cumulée et le potentiel de dissolution de l'aquifère du calcaire de Saint-Ouen, on estime que c'est l'eau de cet aquifère (sous-saturée), en surpression sous la 4<sup>e</sup> masse de gypse, qui, par drainance, provoque les dissolutions les plus significatives.

Deux configurations peuvent se présenter [figure 3]:

En l'absence de la 3<sup>e</sup> masse de gypse, la dissolution de la 4<sup>e</sup> masse conduit à un affaissement de surface sans création de vides francs. Ces vides francs créés par dissolution ont tendance à apparaître lorsque les deux masses (3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup>) sont pré-



Figure 1b

Paysage à l'intérieur du bois de la Tussion.

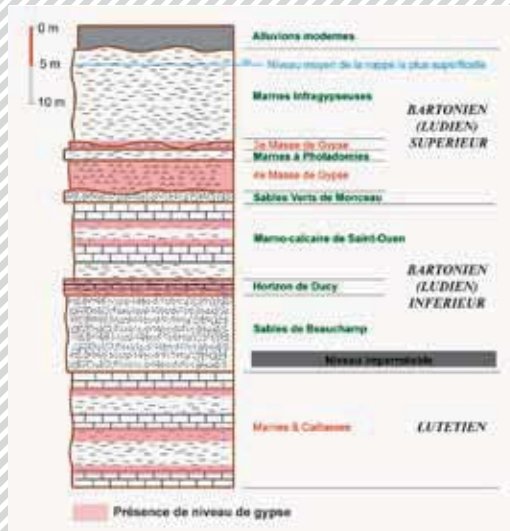


Figure 2

Log stratigraphique des terrains, représentatif du sous-sol du bois de la Tussion.

sentés, la résistance mécanique de l'ensemble non dissous (partie supérieure de la 4<sup>e</sup> masse, marnes à pholadomies sus-jacentes et 3<sup>e</sup> masse) étant suffisante pour maintenir la cavité ouverte. Lorsque sa taille devient critique et que l'épaisseur de gypse à son toit ne suffit plus à maintenir le poids des terrains sus-jacents, celle-ci s'effondre. Elle provoque la remontée d'une cloche de fontis qui peut atteindre la surface.

**Élaboration et application d'une méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain**

La méthodologie d'évaluation de l'aléa fontis et affaissement sur le secteur du bois de la Tussion est définie en fonction de la prédisposition à la dissolution, de la prédisposition à l'occurrence d'un type de désordre (affaissement ou fontis) et de l'intensité de ces désordres.

**a. Évaluation de la prédisposition à la dissolution**

La prédisposition à la dissolution s'appuie sur le croisement de trois critères indispensables à la mise en place d'un mécanisme de dissolution (existence du gypse, potentiel de dissolution de l'eau, écoulement **tableau 1**).

**b. Évaluation de la prédisposition à l'occurrence d'un type de désordre (fontis ou affaissement)**

Afin de déterminer la prédisposition à l'apparition d'un type de désordre (fontis ou affaissement), la prédisposition à la dissolution a été croisée avec un facteur aggravant représenté par la densité du nombre de désordres considérés calculée à partir des observations faites *in situ*. Sa valeur n'est prise en compte que lorsque sa classe est supérieure en gravité à la prédisposition à la dissolution déjà établie.

Tableau 1 - Critères d'évaluation de la prédisposition à la dissolution.

Critère	Niveau	Définition
Minéralogique : épaisseur de gypse cumulée (m)	peu sensible h < 1	Résidus de 4 <sup>e</sup> masse et/ou présence de lentilles dans les marnes infragypseuses ; absence de la 3 <sup>e</sup> masse
	sensible 1 < h < 3,5	4 <sup>e</sup> masse de gypse présente avec localement une épaisseur importante ; absence de la 3 <sup>e</sup> masse de gypse
	très sensible h > 3,5	3 <sup>e</sup> et 4 <sup>e</sup> masses de gypse présentes ; épaisseurs cumulées de gypse importantes
Hydrochimique : concentration en sulfates de la nappe des marnes infragypseuses (mg/l)	peu sensible 1200 < SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> < 1600	Quasi-saturation avec le gypse ; eaux peu agressives vis-à-vis du gypse
	sensible 800 < SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> < 1200	Concentrations intermédiaires représentatives de secteurs en cours de dissolution
	très sensible 350 < SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> < 800	Potentiel de dissolution important vis-à-vis du gypse
Hydraulique : cote NGF de la nappe des marnes infragypseuses (m)	non affecté NGF > 55	Piézométrie de la nappe conforme à la piézométrie régionale
	peu sensible 54 < NGF < 55	Zone où le gradient hydraulique augmente du fait de la présence du talweg piézométrique
	très sensible 53 < NGF < 54	Zone où le gradient hydraulique est maximal

### ➔ c. Évaluation de l'intensité pour chaque type de désordre

Le critère habituellement retenu pour qualifier l'intensité d'un fontis est son diamètre. Si l'on se réfère aux données acquises lors des campagnes d'investigations géotechniques, la gamme de dimensions de fontis (environ 4 m de diamètre) représente une intensité de classe modérée [F].

L'intensité des affaissements a été évaluée à partir des dimensions de chaque désordre relevé lors de la campagne d'investigations géotechnique. La mise en pente moyenne des affaissements relevés à la surface du bois de la Tussion est supérieure à 6%. L'intensité résultante est de classe élevée [F].

### d. Évaluation de l'aléa pour chaque type de désordre

La détermination des différents niveaux d'aléa **figure 4** à la surface du bois consiste à croiser la prédisposition déterminée pour chaque type de désordre avec son intensité associée. L'évaluation de l'aléa a permis de déterminer différentes zones de risque vis-à-vis de l'usager piéton pour chacun des deux types de désordre. Dans le cas étudié, c'est l'aléa fontis qui est le plus contraignant pour les personnes. Cette cartographie du risque a servi de base pour proposer différentes stratégies d'aménagement du bois, assorties ou non de mesures de surveillance.

### Conclusion

Un modèle de fonctionnement hydrogéotechnique du sous-sol du bois de la Tussion a été établi à partir d'une approche couplée intégrant des données hydrogéologiques, hydrochimiques et géotechniques acquises *in situ*. L'expérience de la DRS dans l'évaluation de l'aléa a permis le développement d'une méthodologie spécifique d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain lié à la dissolution tout en intégrant les données quantitatives du site.

Au-delà de son application au site du bois de la Tussion, le travail méthodologique réalisé au cours de cette étude ouvre des perspectives à l'échelle du département ou d'une région, comme celle de l'Ile-de-France, quant à l'évaluation des aléas liés aux processus de dissolution naturelle. ●

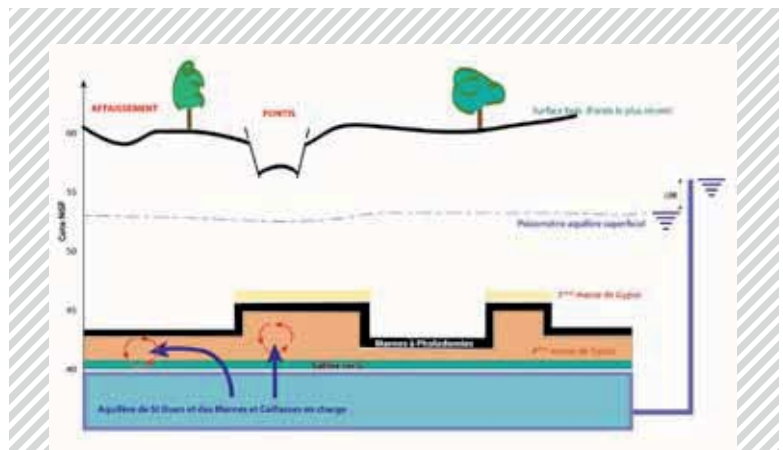


Figure 3

Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéotechnique du système de dissolution identifié dans le sous-sol du bois de la Tussion.

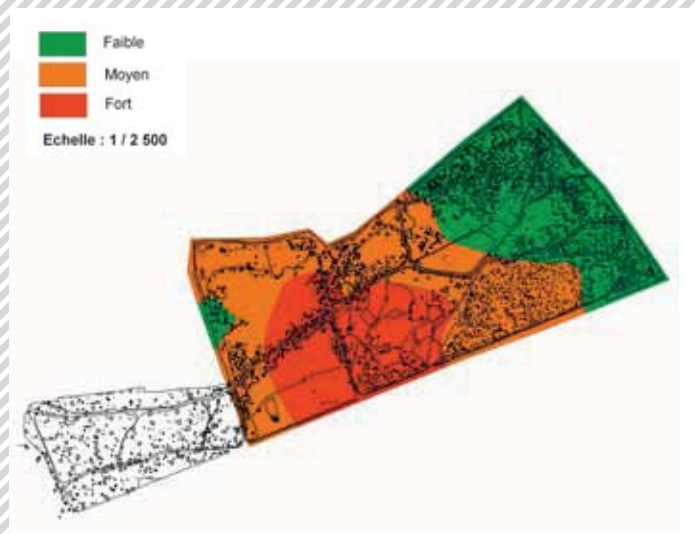


Figure 4

Carte de l'aléa fontis établi sur le territoire du bois de la Tussion.

### Abstract

The Tussion Wood, close to Paris is affected by regular sinkholes development due to gypsum dissolution. The insufficient knowledge concerning formation and evolution of these natural origin sinkholes makes it difficult to apply suitable protective solutions for inhabitants safety. In order to develop this knowledge,

INERIS has performed a hydrogeological and geotechnical studies of this area. They aim to evaluate the "ground movement" risk. As these are evolutive phenomena, it is necessary to have extensive knowledge on the hydrogeological functioning of the site, the underground water flows being at the origin of the dissolution.

### Références

- A Toulemon M. *Les risques d'instabilité liés au karst gypseux lutétien de la région parisienne – Préviation en cartographie*. Bull. de liaison P et Ch, n° 150/151, réf. 3192, 1987, pp. 109-116.
- B Klimchouk A. et al. *Dissolution of gypsum from field observations*. International Journal of Speleology, 1996, 25 (3-4), pp. 37-48.
- C Klimchouk A. *Hydrogeology of gypsum formations*. International Journal of Speleology, 1996, 25 (3-4), Chapter 1.6, pp. 83-89.
- D Gutiérrez F., Cooper A. H. *Identification, prediction and mitigation of sinkhole hazards in evaporite karst areas*. Environ Geol, 2007, 53, réf.: doi10.1007/s00254-007-0728-4, pp. 1007-1022.
- E Thierry P., Rivet F., Vanoudheusden E. *Scénarios risque mouvements de terrain (y compris effondrement de cavités) dans les agglomérations urbaines: développement méthodologique*. Rapport BRGM RP-56243-FR, 2008.
- F Didier C. *L'élaboration des plans de prévention des risques miniers (PPRM)*. Guide méthodologique, INERIS DRS-06-51198/R01, 2006.

## Contributeurs



Christophe Didier



Frédéric Poulard



Figure 1

En rouge : exemple de secteur rompu ayant donné lieu à désordre en surface; en vert : secteurs voisins dont les dimensions de piliers augurent de leur stabilité.

# ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE À LONG TERME

## DES PILIERS DES MINES DE FER DU BASSIN LORRAIN

**S**uite aux différents affaissements ayant affecté les secteurs sud et centre du bassin ferrifère lorrain après la fermeture de l'exploitation minière (Auboué, Moutiers, Moyeuve, etc.), diverses analyses furent entreprises pour mieux comprendre l'origine de ces phénomènes et mieux les anticiper [A]. Contrairement à ce que l'on pouvait craindre à la lumière des événements survenus dans les autres sous-bassins, les mois qui suivirent l'ennoyage du sous-bassin nord n'engendrèrent pas de nouveaux mouvements de grande ampleur, hormis, plusieurs années plus tard, sur la commune d'Angevillers.

Souhaitant mettre à profit le retour d'expérience disponible sur l'ennoyage de travaux miniers sur un aussi vaste secteur géographique, un travail d'analyse a été engagé, en partenariat avec l'université de Johannesburg (Afrique du Sud) et Geoderis. L'objectif est de mieux comprendre le comportement à long terme des piliers et, notamment, leur réponse à l'ennoyage [B] [C].

### Objectifs de l'analyse, choix de l'approche et constitution de la base de données

Pour proposer une approche différente et complémentaire à la démarche « déterministe » systématiquement utilisée en France (essais en laboratoire, puis extrapolation de résistance à l'échelle *in situ*), il nous a semblé intéressant de développer une approche similaire à la démarche ➤

## Références

[A] Didier, C. *Postmining management in France: situation and perspectives*. Risk Analysis, 2009, 29 (10), pp. 1347-1354.

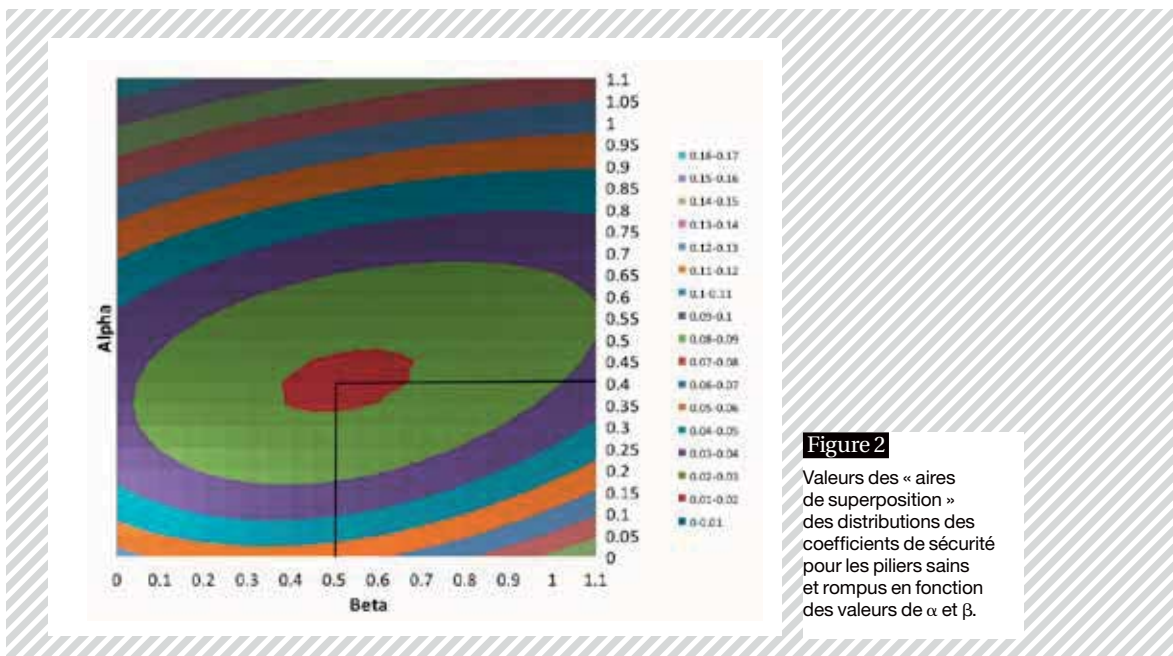
[B] Van der Merwe J.-N., Didier C., Poulard F. *Investigation into the strength of iron ore pillars in the Lorraine basin*. 12<sup>th</sup> Int Congress on Rock Mechanics, Beijing, China, October 18-21, 2011, pp. 611-612.

[C] Didier C., Van der Merwe J.-N., Poulard F. *Back analysis on the Lorraine iron ore pillars behaviour. international congress on the management of mining wastes and closed mines*. GESRIM 2012, Marrakech, Maroc. 3-6 avril 2012.

[D] Salamon M.-D.-G., Munro A.-H. *A study of the strength of coal pillars*. J. S Afr Inst Min Metall, September 1967, pp. 56-67

[E] Didier C., Josien J.-P. *Importance of failure mechanisms for management of surface instability risk*. 10<sup>th</sup> International Congress of the ISRM. September 8-12, 2003, Sandton, South Africa, pp. 243-248.





**Figure 2**  
Valeurs des « aires de superposition » des distributions des coefficients de sécurité pour les piliers sains et rompus en fonction des valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$ .

développée par Salamon et Munro en 1967 [D], qui fait aujourd'hui référence dans le monde minier anglo-saxon. Celle-ci s'appuie sur la détermination d'une loi de résistance « empirique » des piliers permettant de différencier au mieux les piliers « rompus » des piliers « sains ».

La démarche s'appuie sur l'hypothèse majeure suivante : à l'échelle du bassin de risque, la résistance des piliers dépend plus de leurs dimensions et surtout de leur « géométrie » que des variations de propriétés du massif rocheux. Cette géométrie étant principalement définie par deux grandeurs caractéristiques : la largeur,  $w$ , et la hauteur,  $h$ , il vient :  $\sigma_s$  : résistance des piliers, en MPa.

$$\sigma_s = k \frac{w^\alpha}{h^\beta}$$

$w$  et  $h$  : respectivement largeur et hauteur des piliers.

$k$ ,  $\alpha$  et  $\beta$  : paramètres à définir en fonction du bassin de risque considéré.

La qualité de la base de données est un élément clé de la démarche. La base doit intégrer un nombre suffisant de piliers, certains rompus, d'autres stables. Les « rompus » correspondent aux désordres ayant affecté, par le passé, les mines du bassin [E]. Une quinzaine de cas ont été retenus, le plus ancien datant de 1902 (Audun-le-Tiche) et le plus récent de 2009 (Angevillers). Pour chaque secteur, une « maille représentative » est définie pour caractériser la géométrie des piliers dans la zone rompue.

À l'opposé, une soixantaine de piliers « sains », jugés stables à long terme<sup>1</sup> ont été introduits dans la base, afin de permettre l'élaboration de la loi empirique. Certains de ces piliers « sains » ont été systématiquement sélectionnés dans des quartiers environnant les zones rompues [figure 1] afin que les échantillons « rompus » et « sains » ne présentent pas de biais systématique, du fait de leur situation géographique ou de leur ancienneté.

Enfin, de manière innovante au regard de l'approche de Salamon, une troisième famille a été constituée : les piliers jugés « suspects », à savoir ceux qui présentent une résistance mécanique insuffisante pour garantir leur stabilité à long

terme, mais à propos desquels on ne dispose d'aucun indice laissant supposer qu'ils sont déjà effondrés<sup>2</sup>. Environ 80 piliers « suspects » représentant cette classe intermédiaire ont ainsi été identifiés, en veillant là aussi à assurer un échantillonnage géographique aussi satisfaisant que possible.

C'est donc une base de données compilant plus de 170 échantillons de piliers qui a ainsi été constituée en s'appuyant sur la base LORFER mise à disposition par Geoderis.

### Méthodologie d'élaboration de la formule retenue et application au cas étudié

La discrimination des piliers stables et instables est menée sur la base des facteurs de sécurité (rapport entre résistance du pilier et niveau de contrainte verticale). Une approche paramétrique permet de trouver le couple de valeurs ( $a$ ,  $b$ ) pour lequel la « zone de superposition » entre la distribution normale des valeurs de coefficients de sécurité calculés pour les piliers rompus et pour les piliers stables apparaît être la plus limitée.

La [figure 2] synthétise les résultats des simulations menées. Elle présente une cartographie de la valeur de l'aire de superposition entre les distributions de coefficients de sécurité stables et rompus, exprimée en pourcentages. Le centre de gravité de la classe minimale (inférieure à 17 %) correspond à la combinaison  $\alpha = 0,4$  et  $\beta = 0,5$ . En ce point, l'aire de superposition est de 7,9 %.

Par principe, on norme alors la loi pour centrer la moyenne de la distribution des piliers rompus sur 1. Il vient dès lors  $k = 8,3$  MPa. La loi de résistance s'exprime donc :

$$\sigma_s = 8.3 \frac{w^{0.4}}{h^{0.5}} \text{ (en MPa)}$$

La [figure 3] représente, sur cette base, la distribution des trois familles de piliers décrites précédemment (« rompus », « suspects », « stables »). On constate que l'aire de recouvrement entre les familles « rompus » et « stables » est bien limitée, ce qui traduit une fiabilité prometteuse de l'approche (les piliers rompus sont bien sensiblement différents des piliers stables en termes de géométrie).

### Notes

1. Sur la base de l'estimation de la résistance *in situ* à long terme des piliers, estimée à 7,5 MPa par le comité d'experts, en s'appuyant sur divers retours d'expérience et interprétations d'essais de laboratoire.
2. La plupart des chantiers étant désormais inaccessibles, ces indices se limitent au développement d'instabilités en surface.

Lorsque l'on applique la formule obtenue en différenciant les sous-bassins, il apparaît que les piliers rompus présentent une distribution plus défavorable au sud qu'au nord (ce qui explique pour partie la forte réactivité du sous-bassin sud à l'ennoyage). Les piliers « suspects » des différents sous-bassins présentent par ailleurs une distribution très proche de celle des piliers récemment rompus dans le sous-bassin nord. Ceci témoigne du fait que leur « potentiel de stabilité » demeure donc très faible.

Enfin, la **figure 4** suggère que l'approche développée semble également prometteuse en termes de cinétique de rupture. Elle illustre en effet le positionnement des « instabilités historiques » sur la loi de distribution en différenciant les « effondrements brutaux » des « affaissements progressifs ». À de très rares exceptions près, qu'il conviendra d'analyser, la démarche permet une différenciation claire entre les phénomènes.

### Conclusions et perspectives

Une loi empirique de résistance des piliers a été établie pour le bassin ferrifère lorrain, sur la base d'une analyse en retour d'expérience des instabilités observées durant environ un siècle d'exploitation et une décennie d'abandon (arrêt puis ennoyage). Les premiers résultats s'avèrent encourageants. L'approche sera désormais affinée sur la base de nouvelles instabilités produites récemment, mais non encore intégrées jusqu'ici dans la base des « événements historiques ».

La définition d'une loi normale ouvre la voie au développement d'une approche probabiliste de caractérisation du « potentiel de rupture » des piliers, qui permettra d'analyser précisément les différents secteurs du bassin minier jugés potentiellement instables et de prendre ainsi les dispositions de gestion du risque les plus adaptées aux différents contextes. ●

#### Co-contributeur

Nielen Van der Merwe, University of the Witwaterstrand, Johannesburg, South-Africa.

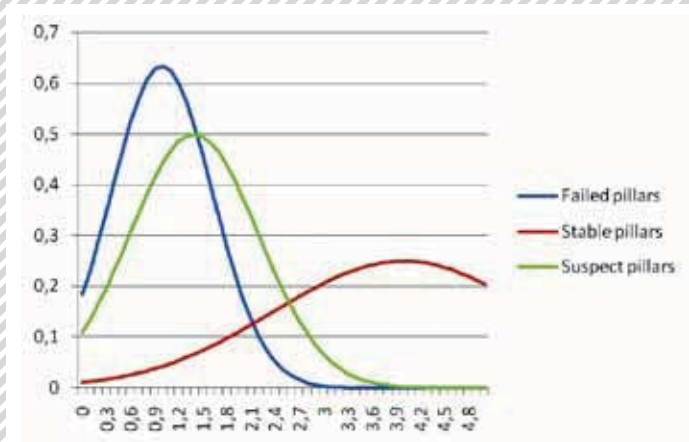


Figure 3

Distributions normales des facteurs de sécurité pour les piliers stables, suspects et rompus.

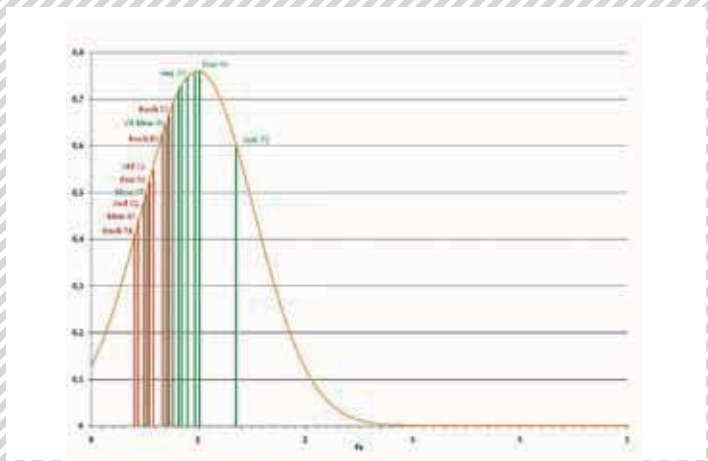


Figure 4

Positionnement des instabilités passées (en rouge effondrements, en vert affaissements).

## Abstract

After one hundred years of activity, mining in the Lorraine iron ore basin has ceased. Following several surface instabilities, investigations into methods of evaluating underground long-term stability were initiated few years ago. This paper concerns the latest

developments in the field of pillars stability evaluation as input into the risk assessment procedures. The methodology is based on the empirical back analysis philosophy developed by Salamon in South African coalfields after the Coalbrook disaster. A strength formula resulting in the best possible separation of data bases of safety

factors of failed and intact pillar cases was determined. The first results appear quite promising. Work is ongoing into the kinematics of failure as well as the distinction between different zones of the basin and the development of a "Failure Potential Index".

## ANNEXES

- 67** Programmes 190
- 68** L'INERIS, partenaire de 45 programmes européens
- 70** Programmes de recherche soutenus par l'ANR
- 71** Autres programmes
- 72** Sujets de thèses sélectionnés en 2012
- 73** Gouvernance scientifique
- 76** Les indicateurs du contrat d'objectifs 2011-2015
- 77** Publications

# ANNEXES





# PROGRAMMES 190

Axes de recherche soutenus par le ministère chargé de l'Écologie  
Recherche dans les domaines de l'énergie, du développement et de l'aménagement durable

## LISTE AU 31 JUILLET 2012 DES AXES DE RECHERCHE EN COURS

### DIRECTION DES RISQUES CHRONIQUES

- Toxicologie prédictive et expérimentale
- Écotoxicologie
- Chimie de l'environnement
- Métrologie de l'environnement
- Mobilité en matrices complexes, efficacité de dépollutions
- Spatialisation des inégalités environnementales, expologie
- Modélisation de la qualité de l'air
- Analyse technico et socio-économique

### DIRECTION DES RISQUES ACCIDENTELS

- Développement des explosions en milieu complexe, du processus d'explosion aux effets sur les structures
- Plateforme numérique pour la simulation des phénomènes dangereux (EPHEDRA)
- Dynamique des fuites et formation des nuages
- Modélisation moléculaire
- Risques accidentels liés aux nanoparticules et matériaux nanostructurés
- Sécurité des procédés de production de biomasse/bioraffineries/chimie verte
- Risques liés aux systèmes de stockage électrochimique (batteries, supercapacités) et aux véhicules électriques
- Risque, décision et incertitudes
- Organisation et sécurité: de l'évaluation des risques à la conception d'outils d'ingénierie

### DIRECTION DES RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

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



# L'INERIS PARTENAIRE DE 45 PROGRAMMES EUROPÉENS

(au 31 juillet 2012)

COSMOS	Integrated in silico models for the prediction of human repeated dose toxicity of cosmetics to optimise safety
DIESE	Détermination d'indicateurs environnementaux pertinents: une stratégie pour l'Europe
GEDSET	Gestion des sédiments transfrontaliers
CITYCHLOR	Tackling urban soil and groundwater contamination caused by chlorinated solvents
MACC2	Monitoring atmospheric composition and climate interim implementation
PREDICT-IV	Profiling the toxicity of new drugs: a non animal-based approach integrating toxicodynamics and biokinetics
MACC	Monitoring atmospheric composition and climate
CITEAIR2	Common information to european air
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
CARBOLAB	Improving the knowledge of carbon storage and coal bed methane production by <i>in situ</i> underground tests
NANOFOL	Nanobiodevices for targeting chronic inflammatory diseases
GREENLAND	Sustainable management and gentle remediation of trace element contaminated land
HUGE 2	Hydrogen oriented underground coal gasification for Europe - Environmental and safety aspects
RFCS MISSTER	Mine shats: improving security and new tools for the evaluation of risks
DEMCAMER	Design and manufacturing of catalytic membrane reactors by developing new nano-architected catalytic and selective membrane materials
HEROIC	Health and environmental risks: organisation, integration and cross-fertilisation of scientific knowledge
ATO PICA	Atopic diseases in changing climate, land use and air quality
EnviroMonitor	Demonstration of an on-site automated environmental monitoring
Q-NANO	A pan-european infrastructure for quality in nanomaterials safety testing
OCTAVIUS	Optimisation of CO <sub>2</sub> capture technology allowing verification and implementation at utility scale
COMEX	Vulnérabilité des bâtis
MARINA	Managing risks of nanoparticles
SANOWORK	Safe nano worker exposure scenarios
INTEG-RISK	Early recognition, monitoring and integrated management of emerging, new technology related, risks
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
CO <sub>2</sub> PipeHaze	Quantitative failure consequence hazard assesment for next generation CO <sub>2</sub> pipelines: the missing link
FONTIS	Validation de méthodes et d'outils de reconnaissance et surveillance de zones à risque de fontis
HELIOS	High energy lithium-ion storage solutions
EDA-EMERGE	Innovative biodiagnosis meets chemical structure elucidation - Novel tools in effect directed analysis to support the identification and monitoring of emerging toxicants on a european scale
ETC/ACM	European topic centre on air pollution and climate change mitigation

Programme piloté par l'INERIS.

<b>TOSCA</b>	Technology opportunities and strategies toward climate-friendly transport
<b>STABALID</b>	Stationary batteries Li-ion safe deployment
<b>NECOBAULT</b>	New concept of metal-air battery for automotive application based on advanced nanomaterials
<b>CO<sub>2</sub> QUEST</b>	Techno-economic assessment of CO <sub>2</sub> quality effect on its storage and transport
<b>I2MINE</b>	Innovative Technologies and concepts for the intelligent deep mine of the future
<b>HELIX</b>	The human early-life exposome: novel tools for integrating early-life environmental exposures and child health across Europe
<b>ERANET SAFERA</b>	Outil de coordination européen et de programmation des appels d'offres nationaux dans le domaine de la sécurité industrielle
<b>EDEN</b>	End-user driven demo for cbrNe
<b>CALEIDOS</b>	Harmonisation des exigences réglementaires et de la recherche scientifique grâce à plusieurs actions visées à la mise en place d'une formation technique destinée à toutes les parties prenantes du règlement REACH
<b>APPRAISAL</b>	Air pollution policies for assesment of integrated strategies at regional and local scales
<b>4FUN</b>	Établissement d'un outil de toxicologie quantitative pour prédire les effets des substances au niveau des organes
<b>NANOREG</b>	Common european approach to the regulatory testing of nanomaterials
<b>NANOSTAIR</b>	Establishing a process and a platform to support standardisation for nanotechnologies implementing the STAIR approach
<b>MARSITE1</b>	Recherche des signes précurseurs de séisme et de glissement de terrain en mer de Marmara et à Istanbul (Turquie)

# PROGRAMMES DE RECHERCHE

soutenus par l'Agence nationale de la recherche – ANR (en cours au 31 juillet 2012)

## 2008

<b>AgingNano&amp;Troph</b>	Impact environnemental des résidus de dégradation des nanomatériaux commercialisés: devenir, biotransformation
<b>RISKER</b>	Recherche intégrée des impacts sanitaires et environnementaux de la contamination par les polluants organiques persistants aux îles Kerguelen
<b>FLUXOBAT</b>	Développement d'outils optimisés pour l'évaluation des transferts de composés organiques volatils depuis une source dans le sol ou la nappe vers l'air atmosphérique extérieur et l'air intérieur des bâtiments

## 2009

<b>AMORE</b>	Analyse multicritère pour le développement d'un outil d'aide à la décision en vue de la prévention des risques environnementaux
<b>NANOCARA</b>	Caractérisation globale (taille, concentration, composition en ligne) des nanoparticules produites par des procédés en phase gazeuse
<b>SLAMS</b>	Études multidisciplinaires du mouvement de Séchillienne: aléas, risques associés et conséquences socio-économiques
<b>NANOFRESES</b>	Nanoparticules de fer pour la remédiation des eaux souterraines

## 2010

<b>BARPPRO</b>	Dimensionnement des barrières physiques de protection contre la propagation d'ondes de souffle consécutives à une explosion
<b>INCERDD</b>	Prise en compte des incertitudes pour les décisions durables
<b>PREDIMOL</b>	Prediction des propriétés physico-chimiques des produits par modélisation moléculaire
<b>TRISTAN</b>	Structures intrinsèquement sûres aux tirs d'armes et aux engins improvisés
<b>ECHIBIOTECH</b>	Outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi de traitements avancés des eaux usées et des boues
<b>BIOFILTREE</b>	Filtration biologique pour la réduction des éléments traces métalliques dans la biomasse des arbres

## 2011

<b>CARMEN – ESSAIS MÉTAUX</b>	Carmen – Essais métaux Ntc
<b>DEMETER</b>	Démonstration de la faisabilité technique et économique d'une boucle de stockage/déstockage d'électricité renouvelable sur méthane de synthèse au moyen d'un électrolyseur à haute température réversible
<b>CIPRES</b>	Caractérisation des impacts potentiels du stockage géologique du CO <sub>2</sub> sur la qualité de la ressource en eau souterraine
<b>PIVERT</b>	IEED, Picardie Innovation Végétale, Enseignement et Recherches Technologiques
<b>POLYSAFE</b>	Conduite en sécurité des réacteurs-échangeurs intensifiés continus en milieu polyphasique
<b>INTERNATECH</b>	Étude pluridisciplinaire de la réduction des risques NaTech dans un monde complexe: tirer les leçons du séisme de Tohoku au Japon en appliquant la méthode ERRA NaTech du projet iNTeg-Risk

Programmes pilotés par l'INERIS.

# AUTRES PROGRAMMES

(financements sur fonds publics) – en cours au 31 juillet 2012

## ADEME

ATTENA	Acceptation de l'atténuation naturelle des polluants organiques
Programme d'étude des pesticides dans l'air de logements d'agriculteurs mis en œuvre par ATMO Nord-Pas-de-Calais	
PEREN BOIS	Biomasse énergie
CAPHEINE 2	Caractérisation des phénomènes de transfert en zone insaturée des éléments traces
EMILIBS	Développement d'un dispositif de mesure de métaux lourds en continu par spectroscopie LIBS
Valorisation COMRISK	Organiser l'implication des populations dans l'évaluation et la gestion des sites pollués
BIOHEALTH	Health effects of particulate emissions from small scale biomass combustion
SALUT'AIR	Changement climatique et stratégies de lutte contre le transport de la pollution à longue distance
PRIMEQUAL 2	Qualité de l'air à l'intérieur des bâtiments et des transports: caractérisation des émissions
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
APIFLAME	Développement d'un module opérationnel de calcul des émissions de feux de forêt en Europe
CARACITYCHLOR	Outils de caractérisation des pollutions des COV dans les eaux souterraines et les sols
Écotoxicité des matières fertilisantes organiques	
PECMICMOG	Les interactions perturbateurs endocriniens – micro-organismes et matières organiques, moteurs de l'écodynamique et de l'impact des polluants au sein d'écosystèmes épuratoires
OFRIR+	Observatoire français des ressources dans les infrastructures
PHYTOSED	Efficacité et pérennité de la phytostabilisation aidée sur un sédiment excavé contaminé par les éléments traces
EMBRUVE	Émissions atmosphériques liées au brûlage de véhicules
NANOFlueGas	Caractérisation et réduction des émissions particulaires issues de l'incinération des déchets contenant des nanomatériaux manufacturés
PASSCITYCHLOR	Tests croisés de capteurs passifs pour la nappe sur sites ateliers français et flamand
ANOPE	Analyse des nouveaux polluants pour la déclaration E-PRTR
ERANET BIOENERGY: EN-PME-TEST	Common European method for the determination of particulate matter emissions of solid fuel burning appliances and boilers
OSSIMED	Outil spécifique au site de mesure et suivi des émissions diffuses
Caractérisation des substances émergentes dans les boues et les composts de boues urbaines	
DIMENSION	Impact métaux particules/bioaccess
PHYTOAGGLO	Intégration des phytotechnologies de gestion et de traitement des sols pollués dans un projet de renouvellement urbain de la communauté d'agglomération creilloise
PHYTOSED Échelle 1	Parcelle expérimentale de grande taille
PRO-EXTERN – AAP R&D	Analyses coûts-bénéfices du recyclage des déchets urbains en agriculture
MANAUS et MANAUS II	Méthodologie d'analyse unifiée et de gestion des risques liés au stockage géologique de CO <sub>2</sub>
ACHIA	Air pollution and climate change health impact assessment
État de l'art émission combustion biomasse	
PassSolAir	Capteurs passifs pour l'air du sol
IZNOGOU	Impacts des ZAPA, nouvelle génération d'outils de diagnostic et d'évaluation des bénéfices sanitaires et économiques attribuables aux restrictions de circulation
Pesticides glyphosate air intérieur, air extérieur	
Protocole ETV	Préparation d'une méthodologie d'évaluation adaptée au domaine de l'application: nouvelles technologies de l'énergie

## MEDDE

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



# SUJETS DE THÈSES SÉLECTIONNÉS EN 2012

## RISQUES CHRONIQUES

Prédiction de la cinétique et des effets des mélanges de substances chimiques (cosmétiques) à partir de modèles QSARs et de tests réalisés *in vitro* sur des cellules humaines

Impact de la contamination plurimétallique sur le milieu aquatique et conséquences sur les réponses immunitaires et les capacités adaptatives du poisson

Méthodologie d'évaluation pour la sélection des meilleures techniques disponibles

Réactivité chimique et photochimique des hydrocarbures aromatiques polycycliques et de leurs dérivés nitrés et oxygénés associés aux aérosols atmosphériques : approche de laboratoire et de terrain

## RISQUES ACCIDENTELS

Étude des émissions liées à l'incinération de matériaux nanostructurés et incidence éventuelle sur les procédés industriels

Outils d'aide à la décision pour une gestion intégrée des risques

Contribution à la prédiction des effets des réactions Na-H<sub>2</sub>O-air dans les réacteurs électronucléaires type RNR de IV<sup>e</sup> génération : applications au programme ASTRID

Les signaux faibles : comment les capter et comment leur donner du sens ?

Rôle du rayonnement thermique dans les mécanismes de propagation des flammes dans les nuages de poussières

## RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

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

Développement d'un outil numérique de prédiction de la sismicité synthétique des mines souterraines profondes

# GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE

(au 31 juillet 2012)

## 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)

*Paris Diderot-Université Paris VII*

**Véronique Bach**

**Professeur des universités en physiologie humaine**

*Université de Picardie-Jules-Verne*

**Marta Heitzmann**

**Senior Vice President**

Research & Innovation

*Areva*

**Christian Blaise**

**Chercheur scientifique**

Responsable de l'unité Toxicologie aquatique

*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 DU CONSEIL

**Nadine Gabas**

**Présidente de la commission**

**Risques accidentels**

Professeur des universités

*École nationale supérieure des ingénieurs*

*en arts chimiques et technologiques*

**Rémi Maximilien**

**Président de la commission**

**Risques chroniques**

Attaché au directoire de la direction

des Sciences du vivant

*CEA*

**Jean-Louis Durville**

**Président de la commission**

**Risques sol et sous-sol**

Coanimateur du collège Techniques

de la construction

*Ministère de l'Écologie, du Développement*

*durable et de l'Énergie*

## 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*

**Philippe Lubineau**

**Responsable Recherche et**

**développement mécatronique et**

**développement durable – Cetim**

*Direction de l'Agence de programme*

### COLLÈGE ÉLUS

**Michel Guilloux**

**Adjoint au maire**

*Mairie de Feyzin (69)*

**René Drouin**

**Maire**

*Mairie de Moyeuve-Grande (57)*

### COLLÈGE SYNDICATS

**Gérald Hayotte**

*CFDT*

**Louis Persico**

*CFE-CGC*

### 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 ÉTAT

**Cédric Bourillet**

**Sous-directeur des Risques**

**accidentels**

*Direction générale de la Prévention*

*des risques*

*Service des risques technologiques*

*Ministère de l'Écologie,*

*du Développement durable*

*et de l'Énergie*

**Claire Hubert**

**Chef du service de la recherche**

**(représentée par Lionel Moulin,**

**chef de la mission Environnement,**

**risques et santé)**

*Direction de la Recherche*

*et de l'Innovation*

*Ministère de l'Écologie,*

*du Développement durable*

*et de l'Énergie*

### COLLÈGE INDUSTRIEL

**Jean-Charles Boutonnet**

**Chef du département Toxicologie**

**et Environnement**

*Arkema*

**Henri Molleron**

**Directeur Environnement**

*Colas*

**Manoelle Lepoutre**

**Directeur du développement**

**durable**

*Total S.A.*

# LES COMMISSIONS SCIENTIFIQUES

(au 31 juillet 2012)

## RISQUES CHRONIQUES

**Rémi Maximilien**

**Président**

Attaché au directoire de la direction  
des Sciences du vivant  
CEA

**Vincent-Henri Peuch**

**Vice-président**

Responsable de la division Chimie  
atmosphérique  
Centre européen pour les prévisions  
météorologiques à moyen terme

**Robert Barouki**

Directeur unité INSERM U747

UFR Biomédicale

Paris Descartes-Université Paris V

**Jean-Yves Bottero**

Directeur de recherche CNRS

Directeur du GDRI ICENT

CEREGE UMR 6635

CNRS

**Hélène Budzinski**

Laboratoire de physico et toxico-chimie

de l'environnement (LPTC)

Environnements et paléoenvironnements

océaniques et continentaux

Université Bordeaux I

**Thierry Caquet**

Écologie et santé des écosystèmes

UMR Agrocampus ESE

INRA

**Pierre Cellier**

Directeur de recherche

UMR Environnement et grandes cultures

INRA

**François Gensdarmes**

Chef du laboratoire de physique et métrologie  
des aérosols

IRSN

**Christian George**

Directeur de recherche

Institut de recherche sur la catalyse

et l'environnement (IRCE)

UMR 5256 CNRS

Université Lyon I

**Philippe Gislette**

Directeur du CIRSEE

SUEZ Environnement

**Christophe Minier**

Professeur

Laboratoire d'écotoxicologie-milieux

aquatiques (LEMA)

Université du Havre

**Pascale Robineau**

Directrice des produits réglementés

Direction du végétal et de l'environnement

Anses

**Christian Seigneur**

CEREA

École nationale des ponts et chaussées

**Denis Zmirou**

Directeur du département

Santé-environnement-travail

EHESP

## RISQUES ACCIDENTELS

**Nadine Gabas**

**Présidente**

Professeur des universités

École nationale supérieure des ingénieurs en arts

chimiques et technologiques

**Yves Mortureux**

**Vice-président**

Expert de l'équipe d'appui

Plateforme sécurité de l'Union internationale

des chemins de fer

SNCF

**Frédérique Battin-Leclerc**

Directrice de recherche

Laboratoire Réactions et génie des procédés

CNRS

**Philippe Klein**

R&D

EDF

**Jean-François Lechaudel**

Coordinateur Risques technologiques Groupe

Direction sécurité industrielle

Total S.A.

**Xavier Montagne**

IFP Énergies Nouvelles

**André Pauss**

Professeur

Département Génie des procédés industriels

Université de technologie de Compiègne

**Christophe Pijolat**

Directeur Centre SPIN

Directeur Laboratoire LPMG

(FRE 3312 – CNRS)

École des mines de Saint-Étienne

**Christophe Renier**

Directeur d'objectifs Infrastructures

GDF SUEZ

**Alexis Tsoukias**

LAMSADE – UMR CNRS 7024

Université Paris-Dauphine

**Serge Walter**

Laboratoire propre intégré

Groupe Sécurité et Écologies chimiques

**Maureen Wood**

Major Accident Hazards Bureau

European Commission – Joint Research Center

**Enrico Zio**

Responsable de la chaire

“Science des systèmes et défi énergétique”

Laboratoire Génie industriel

École centrale de Paris

## RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

### Jean-Louis Durville

#### Président

Coanimateur du collège Techniques de construction

*Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie*

### Jacques Pironon

#### Vice-président

Directeur de recherche

UMR G2R 7566

*CNRS*

### Pascal Bernard

Physicien-sismologue

*Institut de physique du globe de Paris*

### Robert Charlier

Département ArGenCo

*Université de Liège*

### Pierre-Lionel Forbes

Directeur Stratégie matières et déchets

BG Aval

*Areva*

### Damien Goetz

Directeur du Centre de géosciences  
Professeur responsable de l'option sol  
et sous-sol du cycle ingénieur civil

*Mines Paris Tech*

### François Kalaydjian

Directeur adjoint du Centre de résultat  
ressources

*IFP Énergies Nouvelles*

### Vincent Labiouse

Maître d'enseignement et de recherche

Rock Mechanics Laboratory

School of architecture, civil and environmental  
engineering (ENAC)

*Swiss Federal Institute of Technology Lausanne*

*EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Lausanne (Suisse)*

### Laurent Levêque

Ceidre TEGG

*EDF*

### Jacques Mudry

UMR Chrono-Environnement

UFR Sciences et Techniques

*Université de Franche-Comté*

### Xavier Piccino

Inspection générale des carrières

*Mairie de Paris*

### Pierre Potherat

### Jean-Pierre Rajot

Chef du groupe Conception et calcul des  
ouvrages

*IFSTTAR*

### Maxence Vermersch

Directeur

*Mavesa*

### Sandrine Vidal-Gilbert

R&D – *Unconventional Gas Resources Project*

*Total Exploration-Production*



# LES INDICATEURS DU CONTRAT D'OBJECTIFS 2011-2015

(au 31 juillet 2012)

## RECHERCHE

	2010	CIBLE	RÉSULTAT 2011
Part de l'activité de l'Institut consacrée à la recherche	> 19,3 %	> 20 %	19,4 %
Part des financements sur appel à projets de recherche dans les ressources publiques de la recherche (dont part des financements européens)	33 %	> 35 %	33,1 %
Nombre de titulaires d'une HDR	10	> 10	11
Nombre de publications dans des revues à comité de lecture référencées ISI	80	> 80	81
Part des contrats passés avec les industriels dans les ressources totales de la recherche	12,7 %	12 %	12,1 %
Nombre de doctorants	52	Sans cible	55
Nombre de démonstrateurs où l'INERIS intervient	3	4	4

## PUBLICATIONS

## Risques chroniques

2011

BRIGNON J.-M.

Socio-economic analysis: a tool for assessing the potential of nanotechnologies  
*Journal of Physics-Conference Series*, 2011, 304, art 012069

CHIAPPINI L.

Le benzène en air intérieur : bilan des niveaux de concentration rencontrés  
*Pollution Atmosphérique*, 2011 (210), pp. 155-162

NAJA G. M., ALARY R., BAJEAT P., BELLENFANT G., GODON J.-J., JAEG J.-P., KECK G., LATTES A., LEROUX C., MODELON H., MOLETTA-DENAT M., RAMALHO O., ROUSSELLE C., WENISCH S., ZDANEVITCH I.

Assessment of biogas potential hazards  
*Renewable Energy*, 2011, 36 (12), pp. 3445-3451

VUONG LE B., KHORSI-CAUET H., VILLEGIER A.-S., BACH V., GAY-QUEHEILLARD J.

New rat models of iron sucrose-induced iron overload  
*Experimental Biology and Medicine*, 2011, 236 (7), pp. 790-799

GERAUDIE P., HINFRAY N., GERBRON M., PORCHER J.-M., BRION F., MINIER C.

Brain cytochrome P450 aromatase activity in roach (*Rutilus rutilus*): seasonal variations and impact of environmental contaminants  
*Aquatic Toxicology*, 2011, 105 (3-4), pp. 378-384

VOSGES M., KAH O., HINFRAY N., CHADILI E., LE PAGE Y., COMBARNOUS Y., PORCHER J.-M., BRION F.

17 $\alpha$ -Ethinylestradiol and nonylphenol affect the development of forebrain GnRH neurons through an estrogen receptors-dependent pathway  
*Reproductive Toxicology*, 2011, 33, pp. 198-204

LE PAGE Y., VOSGES M., SERVILI A., BRION F., KAH O.

Neuroendocrine effects of endocrine disruptors in teleost fish  
*Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B*, 2011, 14 (5-7), pp. 370-386

SANCHEZ W., SREMSKI W., PICCINI B., PALLUEL O., MAILLOT-MARECHAL E., BETOULLE S., JAFFAL A., AIT-AISSA S., BRION F., THYBAUD E., HINFRAY N., PORCHER J.-M.

Adverse effects in wild fish living downstream from pharmaceutical manufacture discharges  
*Environment International*, 2011, 37 (8), pp. 1342-1348

OUATTARA D. A., CHOI S.-H., SAKAI Y., PERY A., BROCHOT C.

Kinetic modelling of *in vitro* cell-based assays to characterize non-specific bindings and ADME processes in a static and a perfused fluidic system  
*Toxicology Letters*, 2011, 205 (3), pp. 310-319

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 polluted harbour?  
*Comparative Biochemistry and Physiology. Part C - Toxicology and Pharmacology*, 2011, 154 (3), pp. 187-195

VANDENTORREN S., ZEMAN F., MORIN L., SARTER H., BIDONDO M.-L., OLEKO A., LERIDON H.

Bisphenol-A and phthalates contamination of urine samples by catheters in the ELFE pilot study: implications for large-scale biomonitoring studies  
*Environmental Research*, 2011, 111 (6), pp. 761-764

DEVIER M.-H., MAZELLIER P., AIT-AISSA S., BUDZINSKI H.

New challenges in environmental analytical chemistry: identification of toxic compounds in complex mixtures  
*Comptes rendus Chimie*, 2011, 14 (7-8), pp. 766-779

DOR F., DENYS S.

Combining environmental and health evaluation is essential to optimize the management of contaminated sites: a case study of Saint-Laurent-le-Minier  
*Environnement Risques & Santé*, 2011, 10 (4), pp. 323-330

WRAGG J., CAVE M., BASTA N., BRANDON E., CASTEEL S., DENYS S., GRON C., OOMEN A., REIMER K., TACK K., VAN DE WIELE T.

An inter-laboratory trial of the unified BARGE bioaccessibility method for arsenic, cadmium and lead in soil  
*Science of the Total Environment*, 2011, 19 (1), pp. 4016-4030

ZDANEVITCH I., BOUR O.

Quality of composts from municipal biodegradable waste of different origins  
*Cossu R., He P., Kjeldsen P., Matsufuji Y., Reinhart D., Stegmann R. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International waste management and landfill symposium, Sardinia 2011, Italy : CISA Publisher, pp. 87-88*

WIDORY D., BLESSING M., PROUST E., BELLENFANT G., BOUR O.

Assessing methane oxydation under landfill covers and its contribution to the above atmospheric CO<sub>2</sub> levels: the added value of the isotope approach  
*Cossu R., He P., Kjeldsen P., Matsufuji Y., Reinhart D., Stegmann R. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International waste management and landfill symposium, Sardinia 2011, Italy : CISA Publisher, pp. 551-552*

AKERMAN A., BOUR O., CREST M., SENANTE E., PRESSE D., AUDIC J.-M.

Performing and cost-effective landfill gas management in the aftercare period  
*Cossu R., He P., Kjeldsen P., Matsufuji Y., Reinhart D., Stegmann R. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International waste management and landfill symposium, Sardinia, 2011, Italy : CISA Publisher, pp. 245-246*

TOGNET F., TURMEAU C., HA TI L., TARNAUD E., ROUIL L., BESSAGNET B., ROBINE E., MOREL Y.

Numerical modelling of microorganisms dispersion in urban area: application to legionella  
*Bartzis J.G., Syrakos A., Andronopoulos S. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 14), University of West Macedonia, 2011, pp. 746-750*

MIGLIETTA M. M., THUNIS P., PEDERZOLI A., GEORGIEVA E., BESSAGNET B., TERRENOIRE É., COLETTE A.

Evaluation of WRF model performances in different European regions with the DELTA-FAIRMODE evaluation tool  
*Bartzis J.G., Syrakos A., Andronopoulos S. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 14), University of West Macedonia, 2011, pp. 288-292*

PERNIGOTTI D., GEORGIEVA E., THUNIS P., BESSAGNET B.

Impact of meteorological modelling on air quality: summer and winter episodes in the Po valley (Northern Italy)  
*Bartzis J.G., Syrakos A., Andronopoulos S. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 14), University of West Macedonia, 2011, pp. 331-334*

GONZALEZ M. A., VIVANCO M. G., PALOMINO I., GARRIDO J. L., BESSAGNET B.

Modelling some heavy metals air concentration in Europe  
*Bartzis J.G., Syrakos A., Andronopoulos S. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 14), University of West Macedonia, 2011, pp. 86-90*

MOMBELLI E., PERY A.

A linear model to predict chronic effects of chemicals on *Daphnia magna*  
*Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2011, 87 (5), pp. 494-498

CHIAPPINI L., DAGNELIE R., SASSINE M., FUVEL F., FABLE S., TRAN-THI T.-H., GEORGE C.

Multi-tool formaldehyde measurement in simulated and real atmospheres for indoor air survey and concentration change monitoring  
*Air Quality, Atmosphere & Health*, 2011, 4 (3-4), pp. 211-220

# PUBLICATIONS

GRANIER C., BESSAGNET B., BOND T., D'ANGIOLA A., DENIER VAN DER GON H., FROST G., HEIL A., KAISER J., KINNE S., KLIMONT Z., KLOSTER S., LAMARQUE J.-F., LIOUSSE C., MASUI T., MELEUX F., MIEVILLE A., OHARA T., RAUT J.-C., RIAHI K., SCHULTZ M.G., SMITH S. J., THOMPSON A., VAN AARDENNE J., VAN DER WERF G. R., VAN VUUREN D. P.  
Evolution of anthropogenic and biomass burning emissions of air pollutants at global and regional scales during the 1980-2010 period  
*Climatic Change*, 2011, 109 (1-2), pp. 163-190

HINFRAY N., BAUDIFFIER D., LEAL M. C., PORCHER J.-M., AIT-AISSA S., LE GAC F., SCHULZ R., BRION F.  
Characterization of testicular expression of P450 17 $\alpha$ -hydroxylase, 17,20-lyase in zebrafish and its perturbation by the pharmaceutical fungicide clotrimazole  
*General and Comparative Endocrinology*, 2011, 174 (3), pp. 309-317

BORRA J.-P., JIDENKO N., DUTOUQUET C., AGUERRE-CHARIOL O., HOU J., WEBER A.  
Nano-droplet ejection and nucleation of materials submitted to non-thermal plasma filaments  
*European Physical Journal Applied Physics*, 2011, 56 (2), p. 24019

JUUTILAINEN J., HEIKKINEN P., LAGROYE I., MIYAKOSHI J., VAN RONGEN E., SAUNDERS R., DE SEZE R., TENFORDE T., VERSCHAEVE L., VEYRET B., XU Z.  
Experimental studies on carcinogenicity of radiofrequency radiation in animals  
*Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41 (18), pp. 1664-1695

BOIS F. Y., HABKA D., BROCHOT C.  
An integrated modelling approach for *in vitro* to *in vivo* extrapolations  
*ALTEX*, 2010, 27 (Special issue Proceedings), pp. 103-108

PINEL-MARIE M.-L., LOUARN L., DESMOTS S., FARDEL O., SPARFEL L.  
Aryl hydrocarbon receptor-dependent induction of the IgA receptor Fc $\alpha$ RI by the environmental contaminant benzo(a)pyrene in human macrophages  
*Toxicology*, 2011, 290 (1), pp. 89-95

JUHASZ P., BAKOS J., NAGY N., JANOSSY G., FINTA V., THUROCZY G.  
RF personal exposimetry on employees of elementary schools, kindergartens and day nurseries as a proxy for child exposures  
*Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 2011, 107 (3), pp. 449-455

HABKA D.  
Modélisation toxico-pharmacocinétique à partir de méthodes bioinformatiques et de tests *in vitro*  
*Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne*, 11/01/2011

JOLLY S.  
Recherche d'une référence valide pour l'utilisation des biomarqueurs dans un contexte de surveillance des milieux aquatiques  
*Thèse de doctorat. Université de Reims, Champagne-Ardenne*, 22/09/2011

CAUDEVILLE J.  
Construction d'un indicateur d'exposition de la population spatialisé par l'intégration de bases de données environnementales dans un système d'information géographique  
*Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne*, 21/10/2011

QUIGNOT N.  
Perturbateurs endocriniens et déséquilibre de la balance androgènes/estrogènes : évaluation intégrée  
*Thèse de doctorat. Université Paris V*, 05/12/2011

CREUSOT N.  
Contribution de l'approche Effect Directed Analysis à l'identification de perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques  
*Thèse de doctorat. Université de Bordeaux I*, 06/12/2011

ELERT M., BONNARD R., JONES C., SCHOOF R. A., SWARTJES F. A.  
Human exposure pathways  
Swartjes F. A. *Dealing with contaminated sites. From theory towards practical application.*  
Dordrecht : Springer, 2011, pp. 455-515 (Earth and Environmental Science)

CAVE M., WRAGG J., DENYS S., JONDREVILLE C., FEIDT C.  
Oral bioavailability  
Swartjes F. A. *Dealing with contaminated sites. From theory towards practical application.*  
Dordrecht : Springer, 2011, pp. 287-324 (Earth and Environmental Science)

BARILLOT C., SARDE C., TARNAUD E., BERT V., COCHET N.  
Optimisation de la phytoextraction : caractérisation et sélection de bactéries PGPB associées à une plante hyperaccumulatrice de Zn et Cd : *Arabidopsis halleri*  
*Actes du 13<sup>e</sup> Congrès de la SFGP. Paris : SFGP*, 2011 (Récents progrès en génie des procédés, 101)

DUTOUQUET C., R'MILI B., GALLOU G., SIRVEN J. B., TORRALBA B., LE BIHAN O., DERMIGNY A., AMODEO T., AGUERRE-CHARIOL O., FREJAFON E.  
Détection de particules micrométriques en suspension dans l'air par technique LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy)  
*Actes du 12<sup>e</sup> Colloque international francophone sur les méthodes et techniques optiques pour l'industrie. Société Française d'Optique (SFO)*, 2011

FAYE C.-B., DUTOUQUET C., AMODEO T., FREJAFON E., DELALAIN P., AGUERRE-CHARIOL O., GILON-DELEPINE N.  
Détection des polluants métalliques particuliers dans les eaux par spectroscopie de plasma induit par laser (LIBS : Laser-induced breakdown spectroscopy)  
*Actes du 12<sup>e</sup> Colloque international francophone sur les méthodes et techniques optiques pour l'industrie. Société Française d'Optique (SFO)*, 2011

AMODEO T., DUTOUQUET C., LECERF P., DUFOR J.-P., FREJAFON E.  
Détection des nanoparticules manufacturées sur les places de travail  
*Actes du 12<sup>e</sup> Colloque international francophone sur les méthodes et techniques optiques pour l'industrie. Société Française d'Optique (SFO)*, 2011

LE GALL A.-C., RUSSELL Z., BAL D., BEALEY W. J., BJERREGAARD H., KEURHORST-MANS I., MATHIESON S., OTT B., POWLESLAND C., SOTIROS T., UHL R.  
Working group report. Section 3.2 in chapter 3 Approaches to assessing the impact of new plans and projects on Natura 2000 sites  
*Nitrogen deposition and Natura 2000: Science and practice in determining environmental impacts. COST729/Nine/ESF/CCW/JNCC/SEI Workshop Proceedings. COST*, 2011, pp. 29-36

SOUQUES M., DE SEZE R.  
L'induction et les fréquences intermédiaires  
Perrin A., Souques M. *Champs électromagnétiques, environnement et santé. Paris : Springer*, 2010, pp. 57-67

SCHWESIG D., BORCHERS U., CHANCERELLE L., DULIO V., ERIKSSON U., FARRE M., GOKSOYR A., LAMOREE M., LEONARDS P., LEPOM P., LEVERETT D., O'NEILL A., ROBINSON R., SILHAROVA K., SLOBODNIK J., TOLGYESSY P., TUTUNDJIAN R., WEGENER J.-W., WESTWOOD D.  
A harmonized european framework for method validation to support research on emerging pollutants  
*TRAC-Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30 (8), pp. 1233-1242

MANIER N., GARAUD M., DELALAIN P., AGUERRE-CHARIOL O., PANDARD P.  
Behaviour of ceria nanoparticles in standardized test media - influence on the results of ecotoxicological tests  
*Journal of Physics- Conference Series*, 2011, 304, art 012058

UZU G., SAUVAIN J.-J., BAEZA-SQUIBAN A., RIEDIKER M., SANCHEZ SANDOVAL HOHL M., VAL S., TACK K., DENYS S., PRADERE P., DUMAT C. *In vitro* assessment of the pulmonary toxicity and gastric availability of lead-rich particles from a lead recycling plant *Environmental Science & Technology*, 2011, 45 (18), pp. 7888-7895

MOUFAREJ ABOU JAOUE M.-T., LEFRANCOIS E., LE BIHAN O., BOUILLARD J., MORGENEYER M., SALEH K. Étude de l'empoussièrement des poudres par un test de fluidisation *Actes du 13<sup>e</sup> Congrès de la SFGP. Paris : SFGP, 2011 (Récents progrès en génie des procédés, 101)*

## 2012

PELFRENE A., WATERLOT C., MAZZUCA M., NISSE C., CUNY D., ANTOINE R., DENYS S., HEYMAN C., ROUSSEL H., BIDAR G., DOUAY F. Bioaccessibility of trace elements as affected by soil parameters in smelter-contaminated agricultural soils: a statistical modeling approach *Environmental Pollution*, 2012, 160, pp. 130-138

CHENG S., BOIS F. Y. A mechanistic modeling framework for predicting metabolic interactions in complex mixtures *Environmental Health Perspectives*, 2011, 119 (12), pp. 1712-1718

BRION F., LE PAGE Y., PICCINI B., TONG S.-K., CHUNG B.-C., KAH O. Brain aromatase (Cyp19a1b) is a highly sensitive gene to estrogens and xeno-estrogens *Endocrine disruptors 2012. Conference proceedings. Shropshire : Smithers, 2012*

DORTS J., BAUWIN A., KESTEMONT P., JOLLY S., SANCHEZ W., SILVESTRE F. Proteasome and antioxidant responses in *Cottus gobio* during a combined exposure to heat stress and cadmium *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C - Toxicology and Pharmacology*, 2012, 155, pp. 318-324

GLORENNEC P., MAURAU S., ROUSSELLE C., MANDIN C., RONGA-PEZERET S., BOULANGER G., ISMERT M., LAURENT O., GUILLOUSSOU G., ROBERT-GNANSIA E., ROUHAN A., KARG F., FERVERS B., DE TONI A., BOIZE M., CHAHINE G., DEIBER G., LOUNIS M., MOSQUERON L., NEDELLEC V., PERY A., PHILIPPE S., PRADELLE F., REDAELLI M., CASTELLAN I., PERUT V., CABANES P.-A. Améliorations de la démarche d'évaluation des risques sanitaires : contribution de la section « Méthodologie d'évaluation des risques sanitaires » de la SFSE *Environnement Risques & Santé*, 2011, 10 (2), pp. 142-146

SELMAOUI B., LAMBROZO J., SACKETT-LUNDEEN L., HAUS E., TOUITOU Y. Acute exposure to 50-Hz magnetic fields increases interleukin-6 in young healthy men *Journal of Clinical Immunology*, 2011, 31, pp. 1105-1111

BEAUDOUIN R., GINOT V., MONOD G. Improving mesocosm data analysis through individual-based modelling of control population dynamics: a case study with mosquitofish (*Gambusia holbrooki*) *Ecotoxicology*, 2012, 21 (1), pp. 155-164

DAGNINO S., BELLET V., GRIMALDI M., RIU A., AIT-AISSA S., CAVAILLES V., FENET H., BALAGUER P. Affinity purification using recombinant PXR as a tool to characterize environmental ligands *Environmental Toxicology*, 2012 : accepté

KERAMBRUN E., HENRY F., MARECHAL A., SANCHEZ W., MINIER C., FILIPUCI I., AMARA R. A multibiomarker approach in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus*, exposed to contaminated sediments *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 80 (1), pp. 45-53

BELLET V., HERNANDEZ-RAQUET G., DAGNINO S., SEREE L., PARDON P., BANCON-MONTINY C., FENET H., CREUSOT N., AIT-AISSA S., CAVAILLES V., BUDZINSKI H., ANTIGNAC J.-P., BALAGUER P. Occurrence of androgens in sewage treatment plants in influents is associated with antagonist activities on other steroid receptors *Water Research*, 2012, 46 (6), pp. 1912-1922

MOMBELLI E. Evaluation of the OECD (Q)SAR application toolbox for the profiling of estrogen receptor binding affinities *SAR and QSAR in Environmental Research*, 2012, 23 (1-2), pp. 37-57

GIRAUD G., TEBBY C., AMBLARD C. Measurement of consumers' wine-related knowledge *Enometrika*, 2011, 4 (1) : pp. 33-42

SCIARE J., D'ARGOUES O., SARDA-ESTEVE R., GAIMOZ C., DOLGOUKI C., BONNAIRE N., FAVEZ O., BONSANG B., GROS V. Large contribution of water-insoluble secondary organic aerosols in the region of Paris (France) during wintertime *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2011, 116, p. D22203

PERE J.-C., MALLET M., PONT V., BESSAGNET B. Impact of aerosol direct radiative forcing on the radiative budget, surface heat fluxes, and atmospheric dynamics during the heat wave of summer 2003 over western Europe: a modeling study *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2011, 116, p. D23119

MENUT L., BESSAGNET B., KHVOROSTYANOV D., TURQUETY S., MONGE J.-L., VALARI M., VAUTARD R. Modélisation de la composition chimique de la troposphère avec CHIMERE *La Météorologie*, 2011 (75), pp. 23-32

TUCCELLA P., CURCI G., VISCONTI G., BESSAGNET B., MENUT L., PARK R. J. Modeling of gas and aerosol with WRF/Chem over Europe: evaluation and sensitivity study *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2012, 117, p. D03303

KAH O., LE PAGE Y., VOSGES M., TONG S.-K., CHUNG B.-C., BRION F. Neural progenitors are direct targets of xenoestrogens in zebrafish *Bourguignon J.-P., Jegou B. Kerdelhue B., Toppari J., Christen Y. Multi-System Endocrine Disruption. Berlin Heidelberg : Springer, 2011, pp. 73-89 (Research and Perspectives in Endocrine Interactions)*

SANCHEZ W., BADO-NILLES A., PORCHER J.-M. Biomarqueurs chez le poisson : un outil d'intérêt pour le contrôle d'enquête *La Houille Blanche*, 2012 (2), pp. 49-54

CHENG S., PROT J.-M., LECLERC E., BOIS F. Y. Zonation related function and ubiquitination regulation in human hepatocellular carcinoma cells in dynamic vs. static culture conditions *BMC Genomics*, 2012, 13, art. 54

AUDEBERT M., ZEMAN F. A., BEAUDOIN R., PERY A., CRAVEDI J.-P. Comparative potency approach based on H2AX assay for estimating the genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2012, 260 (1), pp. 58-64

COSNEFROY A., BRION F., MAILLOT-MARECHAL E., PORCHER J.-M., PAKDEL F., BALAGUER P., AIT-AISSA S. Selective activation of zebrafish estrogen receptor subtypes by chemicals by using stable reporter gene assay developed in a zebrafish liver cell line *Toxicological Sciences*, 2012, 125 (2), pp. 439-449

GOURLAY-FRANCE C., VINCENT-HUBERT F., TUSSEAU-VUILLEMIN M.-H., SANCHEZ W., GEFFARO A., LEVI Y., OZIOL L., LABADIE P., MOUCHEL J.-M., RAGUET M., THERY S. Le risque écotoxicologique dans le bassin de la Seine : comprendre et diagnostiquer l'impact de la contamination sur les organismes *Le risque écotoxicologique dans le bassin de la Seine. 2011 (Programme PIREN-Seine, 12)*

MENUT L., GOUSSEBAILE A., BESSAGNET B., KHVOROSTYANOV D., UNG A. Impact of realistic hourly emissions profiles on air pollutants concentrations modelled with CHIMERE *Atmospheric Environment*, 2012, 49, pp. 233-244



# PUBLICATIONS

**JOLLY S., BADO-NILLES A., LAMAND F., TURIES C., CHADILI E., PORCHER J.-M., BETOULLE S., SANCHEZ W.**

Multi-biomarker approach in wild European bullhead, *Cottus sp.*, exposed to agricultural and urban environmental pressures: practical recommendations for experimental design  
*Chemosphere*, 2012, 87 (7), pp. 675-683

**KERAMBRUN E., LE FLOCH S., SANCHEZ W., THOMAS GUYON H., MEZIANE T., HENRY F., AMARA R.**

Responses of juvenile sea bass, *Dicentrarchus labrax*, exposed to acute concentrations of crude oil, as assessed by molecular and physiological biomarkers  
*Chemosphere*, 2012, 87 (7), pp. 692-702

**SANCHEZ W., BURGEOT T., PERCEVAL O.**  
Perspectives from the French workshop on the development and validation of biomarkers and bioassays for the monitoring of aquatic environments

*Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19 (4), pp. 1345-1347

**PROT J.-M., BUNESCU A., ELENA-HERRMANN B., ANINAT C., CHOUCHA SNOUBER L., GRISCOM L., RAZAN F., BOIS F. Y., LEGALLAIS C., BROCHOT C., CORLU A., DUMAS M.-E., LECLERC E.**

Predictive toxicology using systemic biology and liver microfluidic "on chip" approaches: application to acetaminophen injury  
*Toxicology and Applied Pharmacology*, 2012, 259 (3), pp. 270-280

**BEAUDOUIN R., ZEMAN F. A., PERY A.**

Individual sensitivity distribution evaluation from survival data using a mechanistic model: implications for ecotoxicological risk assessment  
*Chemosphere*, 2012, 89 (1), pp. 83-88

**PERNIGOTTI D., GEORGIEVA E., THUNIS P., BESSAGNET B.**

Impact of meteorology on air quality modeling over the Po valley in northern Italy  
*Atmospheric Environment*, 2012, 51 : pp. 303-310

**SCHERE K., FLEMMING J., VAUTARD R., CHEMEL C., COLETTE A., HOGREFE C., BESSAGNET B., MELEUX F., MATHUR R., ROSELLE S., HU R.-M., SOKHI R. S., RAO S. T., GALMARINI S.**

Trace gas/aerosol boundary concentrations and their impacts on continental-scale AQMEII modeling domains  
*Atmospheric Environment*, 2012, 53, pp. 38-50

**HUGUET S., BERT V., LABOUDIGUE A., BARTHES V., ISAURE M.-P., LLORENS I., SCHAT H., SARRET G.**

Cd speciation and localization in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*  
*Environmental and Experimental Botany*, 2012, 82, pp. 54-65

**MANIER N., BRULLE F., LE CURIEUX F., VANDENBULCKE F., DERAM A.**

Biomarker measurements in *Trifolium repens* and *Eisenia fetida* to assess the toxicity of soil contaminated with landfill leachate: a microcosm study  
*Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 80, pp. 339-348

**SOLAZZO E., BIANCONI R., PIROVANO G., MATTHIAS V., VAUTARD R., MORAN M. D., APPEL K. WYAT., BESSAGNET B., BRANDT J., CHRISTENSEN J. H., CHEMEL C., COLL I., FERREIRA J., FORKEL R., FRANCIS X. V., GRELL G., GROSSI P., HANSEN A. B., MIRANDA A. I., NOPMONGCOL U., PRANK M., SARTELET K. N., SCHAAP M., SILVER J. D., SOKHI R. S., VIRAJ., WERHAHN J., WOLKE R., YARWOOD G., ZHANG J., RAO S. T., GALMARINI S.**  
Operational model evaluation for particulate matter in Europe and North America in the context of AQMEII

*Atmospheric Environment*, 2012, 53, pp. 75-92

**PIROVANO G., BALZARINI., BESSAGNET B., EMERY C., KALLOS G., MELEUX F., MITSAKOU C., NOPMONGCOL U., RIVA G. M., YARWOOD G.**  
Investigating impacts of chemistry and transport model formulation on model performance at European scale

*Atmospheric Environment*, 2012, 53, pp. 93-109

**SOLAZZO E., BIANCONI R., VAUTARD R., APPEL K. W., MORAN M. D., HOGREFE C., BESSAGNET B., BRANDT J., CHRISTENSEN J. H., CHEMEL C., COLL I., DENIER VAN DER GON H., FERREIRA J., FORKEL R., FRANCIS X., GRELL G., GROSSI P., HANSEN A. B., JERICEVIC A., KRALJEVIC L., MIRANDA A. I., NOPMONGCOL U., PIROVANO G., PRANK M., RICCIO A., SARTELET K. N., SCHAAP M., SILVER J. D., SOKHI R. S., VIRAJ., WERHAHN J., WOLKE R., YARWOOD G., ZHANG J., RAO S. T., GALMARINI S.**

Model evaluation and ensemble modelling of surface-level ozone in Europe and North America in the context of AQMEII

*Atmospheric Environment*, 2012, 53, pp. 60-74

**BEAUDOUIN R., DIAS V., BONZOM J.-M., PERY A.**  
Individual-based model of *Chironomus riparius* population dynamics over several generations to explore adaptation following exposure to uranium-spiked sediments

*Ecotoxicology*, 2012, 21 (4) : pp. 1225-1239

**RAMES A., GUILLOSSOU G., RONGA-PEZERET S., HULOT C.**

Evaluation de la qualité de l'air intérieur au regard d'un éventuel phénomène d'intrusion de vapeur : cas des anciennes usines à gaz

*Environnement Risques & Santé*, 2012, 11 (2), pp. 110-119

**ZYRYANOV D., FORET G., EREKENKO M., BEEKMANN M., CAMMAS J.-P., D'ISIDORO M., ELBERN H., FLEMMING J., FRIESE E., KIOUSIOUTKIS I., MAURIZI A., MELAS D., MELEUX F., MENUT L., MOINAT P., PEUCH V.-H., POUPKOU., RAZINGER M., SCHULTZ M., STEIN O., SUTTIE A.M., VALDEBENITO A., ZEREFOS C., DUFOUR G., BERGAMETTI G., FLAUD J.-M.**

3-D evaluation of tropospheric ozone simulations by an ensemble of regional chemistry transport model

*Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12, pp. 3219-3240

**ROSSIGNOL S., CHIAPPINI L., PERRAUDIN E., RIO C., FABLE S., VALORSO., DOUSSIN J.-F.**

Development of parallel sampling and analysis for the elucidation of gas/particle partitioning of oxygenated semi-volatile organics: a limonene ozonolysis study

*Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, *accepted*

**BRION F., LE PAGE Y., PICCINI B., CARDOSO O., TONG S.-K., CHUNG B.-C., KAH O.**

Screening estrogenic activities of chemicals or mixtures *in vivo* using transgenic (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos

*PLoS One*, 2012, 7 (5), p. e36069

**MIEGE C., MAZZELLA N., SCHIAVONE S., DABRIN A., BERHO C., GHESTEM J. P., GONZALEZ C., GONZALEZ J.-L., LALERE B., LARDY-FONTAN S., LEPTO B., MUNARON D., TIXIER C., TOGOLA A., COQUERY M.**

An *in situ* intercomparison exercise on passive samplers for monitoring metals, polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides in surface waters

*Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 36 : pp. 128-143

**BEAUCHAMP M., MALHERBE L., LETINOIS L., DE FOUQUET C.**

Spatial representativeness of an air quality monitoring station. Delimitation of exceedance areas

Abrahamsen P., Hauge R., Kolbjornsen O. *Geostatistics Oslo 2012. Springer (Quantitative Geology and Geostatistics, 17)*

**ROMARY T., DE FOUQUET C., MALHERBE L.**

Optimization strategies for spatial design of air quality measurement surveys

Abrahamsen P., Hauge R., Kolbjornsen O. *Geostatistics Oslo 2012. Springer (Quantitative Geology and Geostatistics, 17)*

**DE FOUQUET C., FLIPO N., LETINOIS L., MALHERBE L., POLUS-LEFEBVRE E., POULIN M., UNG A.**

Which relations between deterministic simulations and observations?

Abrahamsen P., Hauge R., Kolbjornsen O. *Geostatistics Oslo 2012. Springer (Quantitative Geology and Geostatistics, 17)*

- BAUDIFFIER D., HINFRAY N., VOSGES M., CREUSOT N., CHADILI E., PORCHER J.-M., SCHULZ R. W., BRION F.**  
A critical role of follicle-stimulating hormone (Fsh) in mediating the effect of clotrimazole on testicular steroidogenesis in adult zebrafish  
*Toxicology*, 2012, 298 (1-3), pp. 30-39
- BOUJI M., LECOMTE A., HODE Y., DE SEZE R., VILLEGIER A.-S.**  
Effects of 900 MHz radiofrequency on corticosterone, emotional memory and neuroinflammation in middle-aged rats  
*Experimental Gerontology*, 2012, 47 (6), pp. 444-451
- BERT V., LORS C., PONGE J.-F., CARON L., BIAZ A., DAZY M., MASFARAUD J.-F.**  
Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: a field study focusing on plants, springtails, and bacteria  
*Environmental Pollution*, 2012, 169, pp. 1-11
- JOSEPH W., FREI P., ROOSLI M., VERMEEREN G., BOLTE J., THUROCZY G., GAJSEK P., TRCEK T., MOHLER E., JUHASZ P., FINTA V., MARTENS L.**  
Between-country comparison of whole-body SAR from personal exposure data in urban areas  
*Bioelectromagnetics*, 2012 : *accepté*
- ZDANEVITCH I., AUVINET N., MALLARD I., BOUR O.**  
On-site assessment of methods to measure gaseous emissions from biological treatment of waste  
Tremier A., Dabert P., Druilhe C., Maudet M.-N., Barth J., Siebert S., Sbidlingmaier H. W.  
*Conference proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference ORBIT 2012 Global assessment for organic resources and waste management. Weimar : Verlag ORBIT, 2012*
- NDIAYE A., SANCHEZ W., DURAND J.-D., BUDZINSKI H., PALLUEL O., NDIAYE P., DIOUF K., PANFILI J.**  
Multiparametric approach for assessing environmental quality variations in West African aquatic ecosystems using the black-chinned tilapia (*Sarotherodon melanotheron*) as a sentinel species  
*Environmental Science and Pollution Research*, 2012 : *accepté*
- NOPMONGCOL U., KOO B., TAI E., JUNG J., PIYACHATURAWAT P., EMERY C., YARWOOD G., PIROVANO G., MITSAKOU C., KALLOS G.**  
Modeling Europe with CAMx for the air quality model evaluation international initiative (AQMEII)  
*Atmospheric Environment*, 2012, 53 (Special), pp. 177-185
- WITSCHGER O., LE BIHAN O., REYNIER M., DURAND C., MARCHETTO A., ZIMMERMANN E., CHARPENTIER D.**  
Préconisations en matière de caractérisation des potentiels d'émission et d'exposition professionnelle aux aérosols lors d'opérations mettant en œuvre des nanomatériaux  
*Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 2012 (226), pp. 41-55
- GEISS S., SCHNEIDER M., DONNEVERT G., EINAX J. W., LETTMANN N., REY A., LEPPER H., KOERNER B., PREY T., HILGER B., ENGELKE M., STRUB M.-P., ADRIEN H., SAWAL G., LOEFFLER D., SCHILLINGS T., HUSSY I., STEINBICHL P., SCHARF S., RUDERISCH A., OLMOS J. E., JAVIER SANTOS F., BARTOLOME A., CAIXACH J.**  
Validation interlaboratory trial for ISO 12010: water quality-determination of short-chain polychlorinated alkanes (SCCP) in water  
*Accreditation and Quality Assurance*, 2012, 17 (1), pp. 15-25
- COLETTE A., GRANIER C., HODNEBROG O., JAKOBS H., MAURIZI A., NYIRI A., BESSAGNET B., D'ANGIOLA A., GAUSS M., MELEUX F., MEMMESHEIMER M., MIEVILLE A., ROUIL L., RUSSO F., SCHUCHT S., SIMPSON D., STORDAL F., TAMPIERI F., VRAC M.**  
Air quality trends in Europe over the past decade: a first multi-model assessment  
*Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11 (22), pp. 11657-11678
- CAUDEVILLE J., BOUDET C., DENYS S., BONNARD R., GOVAERT G., CICOLELLA A.**  
Caractérisation des inégalités environnementales en Picardie, fondée sur l'utilisation couplée d'un modèle multimédia et d'un système d'information géographique  
*Environnement Risques & Santé*, 2011, 10 (6), pp. 485-494
- QUIGNOT N., DESMOTS S., BAROUKI R., LEMAZURIER E.**  
A comparison of two human cell lines and two rat gonadal cell primary cultures as *in vitro* screening tools for aromatase modulation  
*Toxicology in vitro*, 2012, 26 (1), pp. 107-118
- QUIGNOT N., BAROUKI R., LEMAZURIER E.**  
Perturbation endocrinienne et évaluation du risque pour la reproduction humaine : entre défis scientifiques d'aujourd'hui et enjeux de demain  
*Environnement Risques & Santé*, 2011, 10 (6), pp. 454-468
- POUECH C., TOURNIER M., QUIGNOT N., KISS A., WIEST L., LAFAY F., FLAMENT-WATON M.-M., LEMAZURIER E., CREN-OLIVE C.**  
Multi-residue analysis of free and conjugated hormones and endocrine disruptors in rat testis by QuEChERS-based extraction and LC-MS/MS  
*Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 402 (9), pp. 2777-2788
- BOTTA F., LEPOT B., LEOZ-GARZIANDIA E., MORIN A.**  
Estimation of sampling uncertainty in lake-water monitoring in a collaborative field trial  
*Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 36, pp. 176-184
- DENYS S., GOMBERT D., TACK K.**  
Combined approaches to determine the impact of wood fire on PCDD/F and PCB contamination of the environment : a case study  
*Chemosphere*, 2012, 88, pp. 806-812
- COLETTE A., GRANIER C., HODNEBROG O., JAKOBS H., MAURIZI A., NYIRI A., RAO S. T., AMANN M., BESSAGNET B., D'ANGIOLA A., GAUSS M., HEYES C., KLIMONT Z., MELEUX F., MEMMESHEIMER M., MIEVILLE A., ROUIL L., RUSSO F., SCHUCHT S., SIMPSON D., STORDAL F., TAMPIERI F., VRAC M.**  
Future air quality in Europe: a multi-model assessment of projected exposure to ozone  
*Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12 (6) : *accepté*
- QUIGNOT N., ARNAUD M., ROBIDEL F., LECOMTE A., TOURNIER M., CREN-OLIVE C., BAROUKI R., LEMAZURIER E.**  
Characterization of endocrine-disrupting chemicals based on hormonal balance disruption in male and female adult rats  
*Reproductive Toxicology*, 2012, 33 (3), pp. 339-352
- SHINTU L., BEAUDOIN R., NAVRATIL V., PROT J.-M., PONTOIZEAU C., DEFERNEZ M., BLAISE B. J., DOMANGE C., PERY A., TOULHOAT P., LEGALLAIS C., BROCHOT C., LECLERC E., DUMAS M.-E.**  
Metabolomics-on-a-chip and predictive systems toxicology in microfluidic bioartificial organs  
*Analytical Chemistry*, 2012, 84 (4), pp. 1840-1848
- QUIGNOT N., TOURNIER M., POUECH C., CREN-OLIVE C., BAROUKI R., LEMAZURIER E.**  
Quantification of steroids and endocrine disrupting chemicals in rat ovaries by LC-MS/MS for reproductive toxicology assessment  
*Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2012, 403 (6), pp. 1629-1640

## Risques accidentels

2011

**HENRY F., MARCHAL P., BOUILLARD J., VIGNES A., DUFAUD O., PERRIN L.**

Évolution du niveau d'agglomération de nanopoudres d'aluminium : une approche rhéologique  
*Actes du 13<sup>e</sup> Congrès de la SFGP. Paris : SFGP, 2011 (Récents Progrès en Génie des Procédés, 101)*

**FAYET G., DEL RIO A., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.**

Predicting the thermal stability of nitroaromatic compounds using chemoinformatic tools  
*Molecular Informatics, 2011, 30 (6-7), pp. 623-634*

**GOOJER L., CORNI N., LENOBLE C.**

An international comparison of four quantitative risk assessment approaches - A benchmark study based on a fictitious LPG plant  
*Process Safety and Environmental Protection, 2011, 90 (2), pp. 101-107*

**BOUDALAA M., OLLIER Y.**

Électricité statique : source d'incendie et d'explosion  
*Techniques de l'Ingénieur. Paris : Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2011, SE 5 120*

**MURILLO C., VIGNES A., LOPEZ O., MUNOZ F.**

New insights toward the influence of agglomeration on dust dispersion and related effects on the ignitability and explosivity of sub-micronic powders  
*Proceedings of the 3<sup>rd</sup> CCPS Latin American Conference on Process Safety and Expo, 2011*

**MASSE F., TIENNOT R., SIGNORET J.-P., BLANCART P., DUPIN G., MARLE L.**

Benchmark study on international functional safety standards  
*Berenguer C., Grall A., Guedes Soares C. Advances in safety, reliability and risk management: proceedings of the annual conference ESREL 2011. London : CRC Press, 2012, pp. 1685-1692*

**JANES A., CHAINEAUX J., LESNE P., MAUGUEN G., PETIT J.-M.**

Mise en œuvre de la réglementation relative aux atmosphères explosives (ATEX). Guide méthodologique. ED 945  
*Paris : INRS, 2011*

**MARLAIR G.**

Les enjeux de sécurité  
*Ballerini D. Les biocarburants. Répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports. Paris : Technip, 2011, pp. 13-18*

**DI TOMMASO S., ROTUREAU P., CRESCENZI O., ADAMO C.**

Oxidation mechanism of diethyl ether: a complex process for a simple molecule  
*Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13 (32), pp. 14636-14645*

**GUILLAUME E.**

Apprentissage organisationnel au travers du retour d'expérience : l'intégration des signaux faibles  
*Thèse de doctorat. Safety Science Group - TBM TU Delft, 13/05/2011*

**DI TOMMASO S.**

Modélisation moléculaire et cinétique du processus de peroxydation de composés organiques : le cas des éthers aliphatiques  
*Thèse de doctorat. Université Paris VII - Chimie ParisTech, 03/11/2011*

**CARVEL R., MARLAIR G.**

A history of fire incidents in tunnels  
*Beard A., Carvel R. Handbook of tunnel fire safety, 2nd edition. London : ICE Publishing, 2011, pp. 3-23*

**CARVEL R., MARLAIR G.**

A history of experimental tunnel fires  
*Beard A., Carvel R. Handbook of tunnel fire safety, 2nd edition. London : ICE Publishing, 2011, pp. 239-271*

**TRUCHOT B., CASSINI P., KNOFLACHER H.**

Transport of hazardous goods  
*Beard A., Carvel R. Handbook of tunnel fire safety, 2nd edition. London : ICE Publishing, 2011, pp. 451-483*

**LE COZE J.-C., PERINET R., HERCHIN N., LOUYS P.**

Observing resilience within a large technical system  
*Hollnagel E., Rigaud E., Besnard D. Proceedings of the fourth resilience engineering symposium. Paris : École des mines de Paris, 2011 (Collection Sciences économiques)*

**PAGNON S., DEBRAY B., BONY-DANDRIEUX A., TIXIER J., FONTAINE F., DUSSERRE G.**

Sensitivity analysis applied to observable parameters in case of flammable gas dispersion modeling in emergency situation  
*Huang C., Ortiz, J. M., Sears S. Beyond experience in risk analysis and crisis response. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Risk Analysis and Crisis Response. Paris : Atlantis Press, 2011, pp. 140-145 (Advances in Intelligent Systems Research, 16)*

**BRISSAUD F., LANTERNIER B., CHARPENTIER D.**

Modelling failure rates according to time and influencing factors  
*International Journal of Reliability and Safety, 2011, 5 (2), pp. 95-109*

**RIBIERE P., GRUGEON S., MORCLETTE M., BOYANOV S., LARUELLE S., MARLAIR G.**

Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry  
*Energy & Environmental Science, 2012, 5 (1), pp. 5271-5280*

**PROUST C., KONE H., KERAMPRAN S., DAUBECH J.**

Capacité des codes "CFD" à prédire les explosions  
*Actes du 13<sup>e</sup> Congrès de la SFGP. Paris : SFGP, 2011 (Récents progrès en génie des procédés, 101)*

**DUFAUD O., VIGNES A., HENRY F., PERRIN L., BOUILLARD J.**

Ignition and explosion of nanopowders: something new under the dust  
*Journal of Physics- Conference Series, 2011, 304, art 012076*

**BOUILLARD J., MARCHAL P., HENRY F., VIGNES A., DUFAUD O., PERRIN L., PLASARI E.**

Re-examination of safety parameters using kinetic theory of nano-granular flows  
*Journal of Physics- Conference Series, 2011, 304, art 012079*

**SALVI O., DELSINNE S., EVANNO S.**

Biogas - A european peerspective on safety and regulation  
*Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2011, 1 (1), pp. 1-20*

**CALOGINE D., MARLAIR G., BERTRAND J.-P., DUPLANTIER S., LOPEZ-CUESTA J.-M., SONNIER R., LONGUET C., MINISINI B., CHIVAS-JOLY C., GUILLAUME E., PARISSÉ D.**

Gaseous effluents from the combustion of nanocomposites in controlled-ventilation conditions  
*Journal of Physics- Conference Series, 2011, 304, art 012019*

**DEROBERT C., DEBRAY B., CHANTELAUVE G.**

Les PPRT, un instrument de gestion intégrée des risques industriels sur le territoire  
*Cros M., Gaultier-Gaillard S., Harter H., Pech P. Catastrophes et risques urbains. Nouveaux concepts, nouvelles réponses. Paris : Tec & Doc, 2011, pp. 45-54 (Sciences du risque et du danger)*

**VIGNES A., MUNOZ F., BOUILLARD J., DUFAUD O., PERRIN L., LAURENT A., THOMAS D.**

Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminum nanopowders  
*Process Safety and Environmental Protection, 2011: accepté*

**FLEURY D., BOMFIM J. A.S., METZ S., BOUILLARD J., BRIGNON J.-M.**

Nanoparticle risk management and cost evaluation: a general framework  
*Journal of Physics- Conference Series, 2011, 304, art 012084*

2012

**MAZRI C., JOVANOVIĆ A., BALOS D.**

Descriptive model of indicators for environment, health and safety management  
*Cozzani V., De Rademaekere E. Proceedings of CISAP-5. Milano : AIDIC, 2012 (Chemical Engineering Transactions, 26)*



**DIEN Y., DECHY N., GUILLAUME E.**

Accident investigation: from searching direct causes to finding in-depth causes. Problem of analysis or/and of analyst?  
*Safety Science*, 2012, 50 (6), pp. 1398-1407

**FAYET G., ROTUREAU P., PRANA V., ADAMO C.**

Global and local QSPR models to predict the impact sensitivity of nitro compounds  
*Proceedings of the AIChE spring meeting 2012 & 8<sup>th</sup> Global congress on process safety. New York : AIChE, 2012*

**ABOU ASSALI A., LENNE D., DEBRAY B.**

Acquisition de connaissances d'adaptation à partir d'une base de cas hétérogène  
*Technique et Science Informatiques*, 2012, 31 (2), pp. 159-185

**VALLEE A., DUVAL C.**

Flooding of industrial facilities. Vulnerability reduction in practice  
Cozzani V., De Rademaeker E. *Proceedings of CISAP-5. Milano : AIDIC, 2012 (Chemical Engineering Transactions, 26)*

**LE COZE J.-C.**

Towards a constructivist program in safety  
*Safety Science*, 2012, 50, pp. 1873-1887

**FAYET G., ROTUREAU P., PRANA V., ADAMO C.**

Global and local quantitative structure-property relationship models to predict the impact sensitivity of nitro compounds  
*Process Safety Progress*, 2012, 31 (3), pp. 291-303

**MAZRI C., SOUMARE I.**

Risk based approaches for indicators identification: insights from the field  
*Proceedings of PSAM 11 and ESREL 2012*

**FLAUW Y., LENOBLE C.**

The use of field experience to assess the probabilities of major accidents  
*Proceedings of PSAM 11 and ESREL 2012*

**DIALLO A.-O., FAYET G., LEN C., MARLAIR G.**

Evaluation of heats of combustion of ionic liquids through use of existing and purpose-built models  
*Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51 (7), pp. 3149-3156

**MERAD M., DECHY N., MARCEL F.**

Adapting participative governance framework for the implementation of a sustainable development plan within an organization  
Karl H. A., Scarlett L., Vargas-Moreno J. C., Flaxman M. *Restoring lands - Coordinating science, politics and action : complexities of climate and governance. Dordrecht : Springer, 2012, pp. 217-237*

**JANES A., MARLAIR G., CARSON D., CHAINEAUX J.**

Towards the improvement of UN N.5 test method for the characterization of substances which in contact with water emit flammable gases  
*Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25 (3), pp. 524-534

**KHOUDOUR L., EL KOURSI E. M., VELASTIN S. A.,**

**BUCH N., LIM-THIEBOT S., FONTAINE F.**  
An approach for protecting transport infrastructure  
*Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F : Journal of Rail and Rapid Transit*, 2011, 225 (4), pp. 383-393

**ADAMO C., ROTUREAU P., DI TOMMASO S.,**

**BENAÏSSA W., GRUEZ P.**  
A mechanistic and experimental study of the diethyl ether oxidation  
*Proceedings of the AIChE spring meeting 2012 & 8<sup>th</sup> Global congress on process safety. New York : AIChE, 2012*

**FLEURY D., BOMFIM J. A. S., VIGNES A.,**

**GIRARD C., METZ S., MUNOZ F., R'MILI B., USTACHE A., GUIOT A., BOUILLARD J. X.**  
Identification of the main exposure scenarios in the production of CNT-polymer nanocomposites by melt-moulding process  
*Journal of Cleaner Production*, 2012 : accepté

## Risques du sol et du sous-sol

2011

**MAISON T.**

Analyse à l'échelle microscopique des phénomènes d'humectation et de dessiccation des argiles  
*Thèse de doctorat. École centrale Paris, 17/01/2011*

**HOR B., CAUDRON M., AL HEIB M.**

Experimental analysis of the impact of ground movements on surface structure  
*Proceedings of the 14<sup>th</sup> Pan-America conference on soil mechanics and geotechnical engineering. 2011*

**HOR B., CAUDRON M., AL HEIB M.,**

**EMERIAULT F.**  
Effectiveness of a mitigation technique for buildings subjected to ground subsidence  
Shahin M. A., Nikraz H. R. *Proceedings of the International conference on advances in geotechnical engineering. 2011, pp. 651-656*

**BIGARRE P., BENNANI M., CONTRUCCI I.,**

**KLEIN E., BAROUDI H., HADADOU R., VUIDART I., JOSIEN J.-P.**  
Microseismic monitoring strategy as a key component of post-mining risk management: review and feedback experience over the past decade  
Qian Q., Zhou Y. *Harmonising rock engineering and the environment : proceedings of the 12<sup>th</sup> ISRM international congress on rock mechanics. London : Taylor & Francis, 2012, pp. 933-938*

**CAO N.-T.**

Apport de la surveillance microsismique en champ proche pour la détection de mécanismes et signes précurseurs aux instabilités gravitaires : application à l'effondrement de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt.  
*Thèse de doctorat. INPL, 13/12/2011*

**VAN DER MERWE J., DIDIER C., POULARD F.**

Investigation into the strength of iron ore pillars in the Lorraine basin  
Qian Q., Zhou Y. *Harmonising rock engineering and the environment : proceedings of the 12<sup>th</sup> ISRM international congress on rock mechanics. London : Taylor & Francis, 2012, pp. 1605-1609*

**WILDAY J., PALTRINIERI N., FARRET R.,**

**HEBRARD J., BREEDVELD L.**  
Addressing emerging risks using carbon capture and storage as an example  
*Process Safety and Environmental Protection*, 2011, 89 (6), pp. 463-471

**GARNIER C., FINQUENEISEL G., ZIMMY T.,**

**POKRYSZKA Z., LAFORTUNE S., DEFOSSEZ P., GAUCHER E.**  
Selection of coals of different maturities for CO<sub>2</sub> Storage by modelling of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> adsorption isotherms  
*International Journal of Coal Geology*, 2011, 87 (2), pp. 80-86

**SOULEY M., ARMAND G., SU K., GHOREYCHI M.**

Modeling the viscoplastic and damage behavior in deep argillaceous rocks  
*Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36 (17-18), pp. 1949-1959

**KLINGER C., CHARMOILLE A., BUENO J.,**

**GZYL G., GARZON SUGAR B.**  
Strategies for follow-up care and utilisation of closing and flooding in European hard coal mining areas  
*International Journal of Coal Geology*, 2011, 89, pp. 51-61

**DIDIER C., GHOREYCHI M., TOULHOAT P.**

La maîtrise des risques émergents : le cas des hydrocarbures non conventionnels  
*Annales des mines. Responsabilité et environnement*, 2011 (64), pp. 81-85

2012

**DAOUADJI A., JRAD M., PRUNIER F., SIBILLE L.,**

**NICOT F., LAOUAFA F., DARVE F.**  
Divergence instability and diffuse failure in granular media  
*Procedia IUTAM*, 2012, 3, pp. 105-130

**LUO H., QUINTARD M., DEBENEST G.,**

**LAOUAFA F.**  
Properties of a diffuse interface model based on a porous medium theory for solid-liquid dissolution problems  
*Computational Geosciences*, 2012



# PUBLICATIONS

LAOUAFA F., LUO H., QUINTARD M.,  
DEBENEST G.

A numerical method for cavity dissolution in salt formation

Berest P., Ghoreychi M., Hadj-Hassen F., Tijani M. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on the mechanical behavior of salt*. London : Taylor & Francis Group, 2012, pp. 313-320

LE GAL N., LAGNEAU V., CHARMOILLE A.

Experimental characterization of CH<sub>4</sub> release from coal at high hydrostatic pressure  
*International Journal of Coal Geology*, 2012, 96-97, pp. 82-92

CAUDRON M., HOR B., AL HEIB M.,  
EMERIAULT F.

Effectiveness of a mitigation technique for buildings subjected to ground subsidence  
*International Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 6 (2), pp. 179-184

SOULEY M., ARMAND G., SU K., GHOREYCHI M.

Modeling the viscoplastic and damage behavior in deep argillaceous rocks  
*Physics and Chemistry of the Earth*, 2012, 36 (17-18), pp. 1949-1959

LAHAIE F., GUNZBURGER Y., BEN OUANAS A.,  
BARNICHON J.-D., BIGARRE P., PIGUET J.-P.

Impact of epoxy glue curing time on the quality of overcoring stress measurements in low-temperature environments  
*XIE F. Rock stress and earthquakes. Proceeding of the 5<sup>th</sup> international symposium on in situ Rock Stress*. London : Taylor & Francis Group, 2010, pp. 161-166

LAOUAFA F., CONTRUCCI I., DAUPLEY X.

In-situ large monitoring and numerical modeling of the loss of stability of salt cavity  
Berest P., Ghoreychi M., Hadj-Hassen F., Tijani M. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on the mechanical behavior of salt*. London : Taylor & Francis Group, 2012, pp. 171-178

GHOREYCHI M., DAUPLEY X., LAOUAFA F.

Creep and damage impact on long-term stability of underground structures in salt formations  
Berest P., Ghoreychi M., Hadj-Hassen F., Tijani M. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on the mechanical behavior of salt*. London : Taylor & Francis Group, 2012, pp. 283-291

## Autres

2011

CANTELAUBE P., JAYET P. A., CARRE F.,  
BAMPS C., ZAKHAROV P.

Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level  
*Land use policy*, 2012, 29 (1), pp. 35-44

CARRE F., JEANNEE N., CASALEGNO S.,  
LEMARCHAND O., REUTER H.I.,  
MONTANARELLA L.

Mapping the CN ratio of the forest litters in Europe-lessons for global digital soil mapping  
Boettinger J.-L., Howell D. W., Moore A. C., Hartemink A. E., Kienast-Brown S. *Digital soil mapping. Bridging research, environmental application and operation*. Dordrecht : Springer, 2010, pp. 217-226 (*Progress in soil science*, 2)

PRATS A.

Analyse environnementale  
*Techniques de l'Ingénieur*. Paris : Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2011, G 5 004

PRATS A.

Documentation d'un système de management environnemental  
*Techniques de l'Ingénieur*. Paris : Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2011, G 5 130

MERAD M., DECHY N., MARCEL F.

Assessing sustainability and risks: about using a multi-criteria decision aid methodology within an organization  
Berenguer C., Grall A., Guedes Soares C. *Advances in safety, reliability and risk management : proceedings of the annual conference ESREL 2011*. London : CRC Press, 2012, pp. 2309-2316

MERAD M., OUERDANE W., DECHY N.

Expertise and decision-aiding in safety and environment domains: what are the risks?  
Berenguer C., Grall A., Guedes Soares C. *Advances in safety, reliability and risk management : proceedings of the annual conference ESREL 2011*. London : CRC Press, 2012, pp. 2317-2323

BEAUDOUIN F., MERAD M.

A guidance for implementing decision-aiding in risk management  
Berenguer C., Grall A., Guedes Soares C. *Advances in safety, reliability and risk management : proceedings of the annual conference ESREL 2011*. London : CRC Press, 2012, pp. 191-200

LINKOV I., STEEVENS J., CHAPPELL M.,  
TERVONEN T., FIGUEIRA J. R., MERAD M.

Classifying nanomaterial risks using multi-criteria decision analysis  
Linkov I., Steevens J. *Nanomaterials: risks and benefits*. Dordrecht : Springer, 2009, pp. 179-191 (*NATO Science for peace and security Series C : environmental security*)

2012

MERAD M., MARCEL F.

Assessing the governance of the organizations: risks, resiliencies and sustainable development  
*Proceedings of PSAM 11 and ESREL 2012*

CARERE M., DULIO V., HANKE G., POLESSELLO S.

Guidance for sediment and biota monitoring under the common implementation strategy for the water framework directive Mario Carere  
*Trends in Analytical Chemistry*, 2012, 36, pp. 15-24

LYCZKOWSKI R. W., PODOLSKI W. F.,  
BOUILLARD J. X., FOLGA S. M.

Thermo-hydrodynamic. Design of fluidized bed combustors: estimating metal wastage  
*New York : Springer, 2012 (Springer briefs in applied sciences and technology)*

Les noms des auteurs de l'INERIS apparaissent en gras.





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 et de l'Énergie.