

# 2012/2013

RAPPORT  
SCIENTIFIQUE



**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable



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

## 2 INTRODUCTION

- 02 L'INERIS, acteur de la transition écologique et énergétique
- 04 L'INERIS se prépare à relever les défis d'Horizon 2020
- 06 Les travaux de recherche sur les perturbateurs endocriniens à l'INERIS



8

## NOUVELLES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

- 10 Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier : développement d'un protocole expérimental et approche numérique
- 12 Évaluation de la stabilité thermique et danger d'incendie des méthoxydes de sodium et de potassium
- 15 **FOCUS. Mécanismes des réactions sodium-eau**
- 16 Comportement au feu de réservoirs entièrement composites destinés au stockage de gaz à très haute pression



18

## SUBSTANCES CHIMIQUES

- 20 Développement de méthodes alternatives en expérimentation animale : caractérisation de la toxicité et du métabolisme *in vitro* de xénobiotiques au sein de biopuces hépatiques et rénales
- 23 **FOCUS. Estimation de l'incertitude de prédictions individuelles QSAR**
- 24 Étude théorique des incompatibilités chimiques du nitrate d'ammonium et de ses mécanismes de décomposition
- 27 Contribution à l'amélioration de la méthode d'essai ONU N.5 relative à la caractérisation des solides qui dégagent des gaz inflammables au contact de l'eau
- 30 Génotoxicité et perturbation de la reproduction chez l'épinoche à trois épines
- 32 Modélisation de la perturbation de la synthèse des hormones ovariennes par les produits chimiques chez les mammifères
- 34 Améliorer les connaissances sur le devenir et les effets des médicaments dans l'environnement



36

## NANOTECHNOLOGIES

- 38 Développer des outils de métrologie innovants basés sur des diagnostics laser
- 40 **FOCUS. La sécurité incluse dans les nano-objets dès leur conception : Nanosafety by design**
- 41 Effet d'une exposition répétée au dioxyde d'azote et/ou à des nanoparticules de carbone sur la fonction pulmonaire, la réactivité bronchique et l'inflammation chez le rat sensibilisé à l'ovalbumine
- 43 **FOCUS. Preuves expérimentales de la présence de colloïdes et de nanoparticules dans 25 lixiviats de déchets**
- 44 Les chambres d'émission, un outil innovant pour étudier les sources de particules



46

## SITES ET TERRITOIRES

- 48 **Risques sanitaires et environnementaux**
- 48 Impact du prélèvement sur la qualité des données de la surveillance
- 50 Dérivés oxygénés et nitrés des hydrocarbures aromatiques polycycliques en phase particulaire : granulométrie et devenir dans l'atmosphère
- 52 Effets d'une exposition chronique à des ondes radiofréquences sur l'équilibre énergétique chez des rats en développement
- 55 **FOCUS. Modèles de qualité de l'air : les nouveaux outils d'aide à la décision**
- 56 Développement d'un modèle multimédia stochastique pour évaluer l'exposition spatialisée de la population à l'échelle régionale
- 58 Pollution atmosphérique et climat : construction d'une nouvelle chaîne de modélisation
- 61 **FOCUS. Évaluer l'oxydation du méthane par une approche isotopique pour les biogaz des installations de stockage de déchets non dangereux**

### 62 Risques industriels

- 62 Quel retour d'expérience sur le retour d'expérience ?
- 64 Modélisation numérique des réservoirs soumis aux explosions et aux impacts

### 66 Risques du sol et du sous-sol

- 66 Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage
- 68 Outils numériques et géophysiques appliqués à la prédiction de la sismicité dans les mines profondes
- 70 Retour d'expérience sur la catastrophe de Coalbrook
- 73 Nouveau dispositif pour caractériser rapidement le retrait-gonflement des argiles

76  
ANNEXES

# L'INERIS, acteur de la transition écologique et énergétique

La création de l'INERIS autour notamment du Centre d'études et de recherches des Charbonnages de France (CERCHAR) résultait du pari de développer la recherche et l'expertise sur les risques induits par les activités économiques à partir de celles nécessaires à l'activité minière. On aurait pu alors juger les activités du CERCHAR obsolètes et décider de les abandonner en même temps que l'exploitation des mines. Heureusement, il n'en a rien été. Sur la base des fortes compétences dont il disposait, l'INERIS a pu – et su – défricher de nouveaux domaines et acquérir une position d'avant-garde dans plusieurs d'entre eux.

Aujourd'hui, face à la crise économique et écologique que la France et l'Europe traversent, le président de la République a fait le choix d'engager résolument le pays sur le chemin de la transition écologique. Celle-ci requiert la mise en œuvre de démarches globales qui intègrent les nécessités économiques, sociales et environnementales. Elle doit mobiliser des connaissances et savoir-faire nouveaux, mais bien souvent bâtis sur des compétences existantes. L'innovation est au cœur de cette transition écologique et énergétique. Fort de l'expérience acquise au cours de sa mue ces vingt-cinq dernières années, l'INERIS est plus que jamais prêt et décidé à l'accompagner.

Face aux changements climatiques, à la perte accélérée de biodiversité, à l'épuisement des ressources et à l'émergence des sujets « santé-environnement », la transition écologique



Raymond Cointe,  
directeur général de l'INERIS

et énergétique requiert de nouvelles technologies qui permettent un meilleur usage des ressources (matières premières, énergie, eau) et la réduction de l'impact sur l'environnement et la santé. Indispensable pour mener à bien la transition écologique, l'innovation est parfois vécue – notamment dans le domaine de l'énergie – comme une source de dégradations de l'environnement. Au cœur des enjeux actuels de société, l'innovation amène ainsi nos concitoyens à vivre une situation paradoxale. Ils sont partagés entre le souhait d'une innovation nécessaire pour répondre à leurs attentes et la crainte d'une accélération de ses rythmes qui est parfois à l'origine de controverses et de peurs. Les risques liés aux nouvelles filières technologiques ne sont en effet pas facilement compréhensibles par le public. Ils alimentent des controverses qui ne facilitent pas la possibilité de se faire une opinion. Le citoyen se sent de plus en plus incapable de contrôler sa propre sécurité et encore plus celle de la planète.



Although science is not the only remedy for ending controversy, it must contribute by reducing situations of uncertainty and by expanding awareness."

Si la science n'est pas le seul remède pour faire cesser la controverse, elle doit y contribuer en diminuant les situations d'incertitudes et en améliorant les connaissances. L'INERIS s'est fixé pour mission d'accompagner les acteurs qui innoveront, pour prendre en compte, très en amont, les risques liés à de nouveaux produits ou à de nouvelles filières technologiques. Ainsi, il participe à de nombreux programmes de recherche sur des sujets émergents, comme l'illustre ce rapport : perturbateurs endocriniens, nanotechnologies, ondes radiofréquences, hydrogène-énergie... L'Institut est partie prenante, dans ses domaines de compétences (substances chimiques, nanotechnologies, risques sanitaires et environnementaux, risques industriels, risques du sol et du sous-sol...), des meilleurs travaux de recherche au niveau européen. Mais, par ailleurs, conscient des peurs et des interrogations que génèrent les crises économique et écologique, l'Institut partage l'avancement de ses recherches avec l'ensemble des acteurs du dialogue environnemental (élus, entreprises, syndicats, associations notamment environnementales) et s'efforce de prendre en compte leurs attentes, de répondre à leurs questions et, de plus en plus, de définir en lien avec elles ses programmes de recherche.

ENGLISH  
VERSION

## INERIS, in the forefront of environmental and energy transition

When INERIS was founded, building in particular on the French coal mining operator Charbonnages de France's research centre – CERCHAR, a deliberate effort was made to develop research and expertise around the hazards induced by industrial activities based on those required for mining operations. At the time, the coal-related research activities undertaken by CERCHAR might have appeared obsolete and could simply have been abandoned as coal mining was wound down. Luckily, this was not the case. Based on a strong inhouse expertise, INERIS was, and has been able to, seek out new fields and gain a pioneering place in a number of them. Today, given the economic and environmental crisis faced by France and Europe, the President of France has chosen to resolutely move the country along the road towards an environmental transition. This requires implementing overall approaches combining economic, societal and environmental necessities. It requires mobilising new expertise and know-how, often built on existing skills. Innovation is at the heart of this environmental and energy transition. On the strength of the experience gained through its transformation over the past twenty five years, INERIS is now

more than ever ready and committed to be at the forefront of this transition. Faced with climate change, the accelerated loss of biodiversity, the exhaustion of resources and the emergence of "environmental-health" issues, this environmental and energy transition requires new technologies that ensure a better use of resources (raw materials, energy, water) and a reduced environmental and health footprint. Innovation is a prerequisite to undertaking this ecological transition but is sometimes – and especially in the energy field – felt to be a cause of environmental deterioration. At the heart of the current challenges facing society, innovation brings our fellow citizens to live a paradox. They are torn between the necessary innovation required to address their expectations and the fear of an acceleration of its pace, often leading to controversy and fears. One reason is that risks linked to new technological specialties are often not easily understood by the public. Such risks feed a controversy that does not make it any easier for citizens to make their own position. In such circumstances, they feel unable to keep control over their own safety, and even more at the global level. Although science is not the only remedy for ending controversy, it must

contribute by reducing situations of uncertainty and by expanding awareness. INERIS has set itself a mission to accompany innovative players to take into account, far ahead of time, any risks linked to new products or to innovative technological processes. As a result, it takes part in numerous research programmes covering emerging aspects, as illustrated by this report: endocrine disruptors, nanotechnologies, radiofrequency wave, hydrogen power, etc. The Institute takes an active part, in its areas of expertise (chemicals, nanotechnologies, health and environmental hazards, industrial hazards, ground and underground hazards, etc.), in the best research work undertaken at the European level. Moreover, with a strong awareness of the fears and questions raised by the economic and environmental crises, the Institute shares progress achieved in its research work with all of the players in the ongoing environmental dialogue process (elected officials, enterprises, trade unions, non governmental organizations especially environmental ones) and seeks to take into account their expectations, answer their questions and, more and more, to define its research programmes in relation with them.





Pierre Toulhouat,  
directeur scientifique

## L'INERIS se prépare à relever les défis d'Horizon 2020

Depuis une dizaine d'années, l'INERIS s'est fortement mobilisé pour répondre aux appels d'offres des 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> programmes-cadres européens. En 2012, le taux de succès de l'INERIS a dépassé 50 % au 7<sup>e</sup> programme-cadre, et plus de 3 millions d'euros de recettes sont attendus en 2013 via les projets européens. Le 8<sup>e</sup> programme-cadre, couvrant la période 2014-2020, s'intitule Horizon 2020. Il est structuré en trois piliers : l'excellence de la science, la primauté industrielle et les défis sociétaux.

Ces défis sont relatifs à la santé, à la bioéconomie, aux énergies, aux transports, à la lutte contre le changement climatique, à la préservation des ressources, à la société « inclusive » et, enfin, à la protection de la liberté et de la sécurité.

Focalisé sur de la recherche finalisée, l'INERIS se positionne davantage sur les piliers 2 et 3, tout en gardant le souci d'excellence de la recherche, qui va croissant. En effet, le pilier 1 vise à soutenir la recherche fondamentale d'excellence au sein de l'Union européenne. En ce qui concerne la primauté industrielle, l'INERIS entend jouer pleinement son rôle en matière d'accompagnement des nouvelles technologies pour en garantir, le plus en amont possible, la maîtrise des risques et impacts. Les thèmes prioritaires suivants sont en phase avec les compétences de l'Institut : nanotechnologies, matériaux avancés (recyclage, métrologie, contrôle qualité), biotechnologies, fabrication et transformation avancées.

### Un soutien à l'innovation sur le plan européen

La valorisation des travaux de l'Institut sera principalement portée par des débouchés sous forme de référentiels pour la normalisation ou la certification, accélérant la mise sur le marché mondial des produits ou services dévelop-

pés en garantissant les conditions d'une innovation responsable. Enfin, les grands défis sociétaux seront abordés également sous l'angle du soutien à l'innovation. La thématique de l'évaluation des risques est un dénominateur commun à ces défis. Il importe donc pour l'INERIS de sélectionner les projets, les consortiums et les compétences de l'Institut – en matière de toxicologie et d'écotoxicologie, de modélisation des expositions, de sécurité des substances et procédés –, mais aussi les installations et organisations qui permettront de contribuer à lever des verrous, notamment pour diminuer les risques de rejet sociétal engendrés par les innovations.

Cette apparente simplicité des lignes de force du programme Horizon 2020 cache une très grande complexité des instruments de lobbying, permettant d'influencer non seulement l'orientation des appels d'offres, mais aussi l'implication dans les consortiums les plus pertinents. L'INERIS s'appuiera tout d'abord sur les réseaux qu'il a contribué à mettre en œuvre autour d'ETPIS (*European Technology Platform on Industrial Safety*) et sur le GEIE Eu-VRi<sup>(1)</sup>. Il s'agira de s'intégrer aux partenariats public-privé (PPP) existants ou en cours de constitution, comme Spire<sup>(2)</sup> ou Bridge<sup>(3)</sup>, l'alliance européenne de recherche sur l'énergie (EERA), et de s'assurer une présence optimale dans les partenariats d'innovation européens (EIP – *European Innovation Partnerships*), comme ceux qui ont été mis en place sur l'eau ou sur les ressources minérales durables.

### Une implantation régionale stratégique

Cette implication au niveau européen se complète par une participation encore accrue aux travaux des alliances auxquelles l'INERIS s'est associé – Aviesan, Allenvi, Ancre – et par des liens avec celles qui ont trait aux sciences de la communication (Allistene) et aux

sciences humaines et sociales (Athena). À travers sa contribution aux travaux des alliances, l'INERIS a pu nourrir – dans les domaines qui le concernent – la Stratégie nationale de recherche, dont la mise en œuvre à court terme a servi de cadre à la préparation des appels d'offres de l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour 2014.

Enfin, pour l'Institut, implanté en Picardie, la dimension régionale est essentielle. La cohérence des actions à tous niveaux est nécessaire et doit s'inscrire dans la stratégie dite de « spécialisation intelligente », RIS3 (*Research and Innovation Strategies for Smart Specialisation*), qui définit les domaines spécialisés que la Région va pouvoir valoriser et développer. Notons que cette stratégie sera également le cadre des futurs contrats de plan État-Région, qui devront permettre d'augmenter la synergie des établissements au sein de sites plus visibles et dotés d'installations attractives mais ciblées, en évitant les doublons.

Les futurs succès à l'Europe revêtent une importance vitale pour l'INERIS dans un contexte où l'érosion de la subvention de l'État à la recherche s'accélère (–17 % entre 2013 et 2014), rendant vraiment incontournable l'accroissement de la recherche partenariale et sur guichets compétitifs. Le défi sera difficile pour l'INERIS, qui d'ores et déjà réussit à abonder sa subvention de recherche à un niveau équivalent par les recettes extérieures issues des succès de ses propositions de recherche. Le contrat d'objectifs de l'Institut prévoit de conserver jusqu'en 2015 une part de 20 % pour la recherche. Ceci ne sera possible que si l'Institut fait les bons choix, en s'appuyant sur une organisation performante du pilotage et de l'animation de la recherche, mais surtout en sachant maintenir l'enthousiasme et la créativité de ses chercheurs, avec des installations et des moyens expérimentaux au meilleur niveau.

ENGLISH  
VERSION

## INERIS prepares to meet the Horizon 2020 challenges

For several years, INERIS has involved considerable resources to respond to European calls in the Sixth and Seventh European Framework Programmes. In 2012, INERIS achieved a success rate of over 50% for the Seventh Framework Programme, with more than €3 million in income expected in 2013 thanks to European projects. The Eighth Framework Programme, covering the period running from 2014 to 2020 is called Horizon 2020. It is structured around three pillars: Scientific excellence, Industrial leadership and Societal challenges. These challenges relate to health, bio-economics, energy, transportation, tackling climate change and preserving resources, to an inclusive society and, lastly, to protecting freedom and safety. Focused on applied research, INERIS is positioned more towards pillars 2 and 3, even if research excellence is a rising area. Pillar 1 aims to support excellence in fundamental research within the European Union. Regarding industrial leadership, INERIS plans to fully play its role in supporting new technologies to guarantee risk and impact management as early as possible. The following priority themes match the Institute's areas of expertise: nanotechnologies, advanced materials (recycling, metrology and quality control), biotechnologies, advanced manufacturing and transformation.

**Support for innovation at the European level**  
The Institute's work will primarily pay off through standardisation or certification purposes, accelerating the introduction onto the worldwide market of the products or services developed

while guaranteeing the conditions for sustainable innovation. Lastly, the societal challenges will also be addressed along the innovation support process. Regarding these challenges, the risk assessment theme is a common denominator. Our Institute therefore seeks to select projects, and consortia, where its expertise in toxicology and eco-toxicology, exposure modelling, substance safety and in processes, as well as in installations and organisations will allow it to contribute to lifting obstacles, especially to lower the risk of societal rejection triggered by innovations. The apparent simplicity in the mainlines of the Horizon 2020 programme hides a very great complexity in lobbying instruments, used not only to influence the way the European calls go, but also the involvement in the most relevant consortia. INERIS will work with the networks that it has contributed to forming around ETPIS (European Technical Platform for Industrial Safety), and on the EEIG EuVRi Consortium<sup>(1)</sup>. This will require joining Public Private Partnerships or ones being put together like SPIRE<sup>(2)</sup> or BRIDGE<sup>(3)</sup>, the European Energy Research Alliance (EERA) and ensuring an optimum presence in European Innovation Partnerships, like the ones set up for water or sustainable mineral resources.

**A strategy regional involvement**  
This involvement at the European level is completed by participation in the work of the Alliances that INERIS belongs to: AVIESAN, ALLENI, ANCRE, and links with those relating to communication sciences (ALLISTENE) and human and social sciences (ATHENA). Through its contributions,

INERIS has been able to feed into the National Research Strategy, where the short term implementation has served as a framework for preparing calls for the National Research Agency for 2014. Lastly, the regional dimension is essential for INERIS. Coherence in all levels of actions is necessary and it must fit into the so-called RIS3 (Research and Innovation Strategies for Smart Specialisation) approach that defines the specialist fields that the Region will be able to put to use and develop. This strategy will also serve as the framework for future French Government – Region plan contracts that should serve to increase the synergy between establishments at the same sites, so that they become more visible and with attractive but targeted installations, thereby avoiding duplication. Future European successes are taking on a vital importance for INERIS in a context of accelerating erosion of the state research subsidy (with a cut of 17% between 2013 and 2014), making it essential to increase research partnerships from competing sources of funding. The challenge will be a difficult one for the Institute, which has already succeeded in matching its research subsidy to an equivalent level with outside income raised thanks to the success of its research proposals. The Institute's target contract calls for retaining a 20% share for research until 2015. This will only be possible if the Institute makes the right choices, based on a highly effective research steering and leadership organisation, but especially by knowing how to maintain the enthusiasm and the creativity of its researchers with the highest level installations and experimental resources.

## Les travaux de recherche sur les perturbateurs endocriniens à l'INERIS

CONTRIBUTEUR



Éric Thybaud

**D**u fait de leurs effets néfastes sur la santé humaine et sur les populations animales, les perturbateurs endocriniens font l'objet d'une attention toute particulière de la part des pouvoirs publics et des associations de protection de la santé et de l'environnement.

Ainsi, dès 1999, l'Union européenne a initié des réflexions autour de ces substances avec le développement d'outils de caractérisation ou de stratégies de tests, comme avec la sélection de substances à étudier en priorité. Toujours au niveau communautaire, le règlement REACH<sup>(1)</sup> a pris en compte ces substances en les soumettant à la procédure d'autorisation.

Plus récemment, à l'échelle nationale, un groupe de travail associant l'ensemble des parties prenantes (ministère, parlementaires français et européens, représentants des organismes publics de recherche et d'expertises, industriels et ONG) a été mis en place pour élaborer une stratégie sur les perturbateurs endocriniens permettant à la France de répondre aux engagements pris sur la scène internationale en matière de protection de la santé et de la biodiversité.

Dans ce contexte, l'INERIS mène depuis plusieurs années un programme de recherche visant à caractériser le mode d'action de ces substances, en particulier chez le poisson, et à développer des outils de caractérisation des effets perturbateurs endocriniens de substances chimiques.

Ces travaux sont menés selon deux axes : la compréhension du mécanisme d'action et le développement d'outils de caractérisation, d'une part, la biosurveillance de l'environnement, d'autre part. Dans ces domaines, les travaux réalisés intègrent différents niveaux de complexité biologique, moléculaire, cellulaire et tissulaire.

### La compréhension des mécanismes d'action et le développement d'outils de caractérisation

Dans ce domaine, les travaux sont principalement centrés sur la caractérisation des effets des perturbateurs endocriniens sur la biosynthèse des hormones stéroïdiennes dans les gonades de poissons.

En effet, bien que le poisson-zèbre soit une espèce recommandée par l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) pour l'étude de l'écotoxicité de

substances chimiques, les connaissances sur la différenciation sexuelle de la gonade sont faibles. En particulier, la régulation de ce processus par les hormones stéroïdiennes a été très peu étudiée, ce qui rend difficile la détermination des mécanismes d'action des perturbateurs endocriniens sur ce processus physiologique. Les travaux réalisés ont donc pour objectif la caractérisation de la stéroïdogénèse au cours de la différenciation sexuelle de la gonade du poisson-zèbre en condition normale ou perturbée. La question de l'effet des perturbateurs endocriniens en mélange est également abordée à l'aide de modèle *in vitro* et *in vivo*.

En parallèle, en partenariat avec l'unité Toxalim UMR 1331 Toxicologie alimentaire INRA-INPT<sup>(2)</sup>, sous contrat avec l'université Toulouse 3 Paul-Sabatier, est conduite une étude du métabolisme des xénobiotiques dans les différents systèmes d'essai *in vitro* et *in vivo* utilisés au sein de l'INERIS. Le but est d'améliorer la caractérisation de chaque modèle, de comparer le métabolisme de xénobiotiques de référence pour ces systèmes et d'évaluer leur intérêt en termes de changement d'échelle (*in vitro* - *in vivo*).

Au niveau populationnel, les travaux sont centrés sur l'étude de l'impact des perturbateurs endocriniens sur les populations de poissons en conditions contrôlées en se focalisant sur l'étude des conséquences fonctionnelles sur la reproduction des poissons et sur l'étude des conséquences sur la dynamique de population de ces organismes.

Ces travaux se traduisent par le développement d'un modèle mathématique de l'axe hypothalamus-hypophyse-gonade, d'une part, et d'un modèle de dynamique de population de type individu centré, d'autre part.

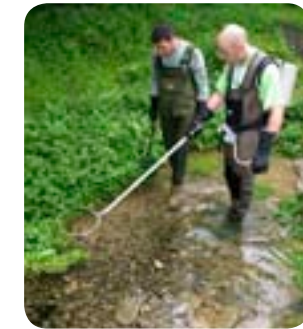
Concernant le développement d'outils de caractérisation, les travaux se concentrent autour du développement :

- de nouveaux modèles cellulaires de poissons basés sur l'expression stable de gènes rapporteurs couplés à un récepteur et/ou un promoteur cible des perturbateurs endocriniens ;
- de lignées de poissons-zèbres transgéniques pour détecter l'activité œstrogénique de substances chimiques ;
- d'un modèle d'explant de testicule de poisson permettant de caractériser le potentiel d'inhibition de la biosynthèse d'androgènes par des substances chimiques.

### NOTES

(1) Règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques.

(2) Institut national polytechnique de Toulouse.



### La biosurveillance

La surveillance de la qualité des milieux aquatiques est aujourd'hui essentiellement basée sur l'analyse chimique ciblée de composés chimiques identifiés comme prioritaires ou pertinents. Or, cette approche ne permet pas de caractériser le danger écotoxique associé à la contamination du milieu.

Les travaux réalisés au sein de l'INERIS sont centrés sur le développement de bio-essais *in vitro* ou *in vivo* basés sur le mode d'action moléculaire de substances chimiques permettant la détection sensible de substances actives au sein de matrices environnementales complexes. Associés à des approches analytiques, ces bio-essais permettent d'orienter l'identification chimique des contaminants détectés dans une approche intégrée dite EDA (*Effect directed analysis*, ou analyse dirigée par l'effet).

Par ailleurs, l'observation dans des milieux naturels fortement anthropisés d'ovotestis, c'est-à-dire d'altérations tissulaires plus ou moins marquées dans les gonades de poissons, a conduit l'Institut à mettre en œuvre, en collaboration avec l'Office nationale de l'eau et des milieux aquatiques (Onema), une cartographie de l'intersexe dans les populations de poissons pour étudier l'occurrence de ce phénomène sur le territoire français.



### ABSTRACT

Endocrine disruptors are the subject of close attention from government and NGOs because of their adverse effects on human health and environment. INERIS has carried out for several years a research program

to characterize the mode of action of these substances, especially in fish, and to develop tools for characterizing PE effects of chemical substances.

This research integrates different levels of biological, molecular, cellular and tissue complexity.





## NOUVELLES FILIÈRES TECHNOLOGIQUES

- 10 Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier : développement d'un protocole expérimental et approche numérique

---

- 12 Évaluation de la stabilité thermique et danger d'incendie des méthoxydes de sodium et de potassium

---

- 15 **FOCUS.** Mécanismes des réactions sodium-eau

---

- 16 Comportement au feu de réservoirs entièrement composites destinés au stockage de gaz à très haute pression

---



# Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier : développement d'un protocole expérimental et approche numérique

CONTRIBUTEUR



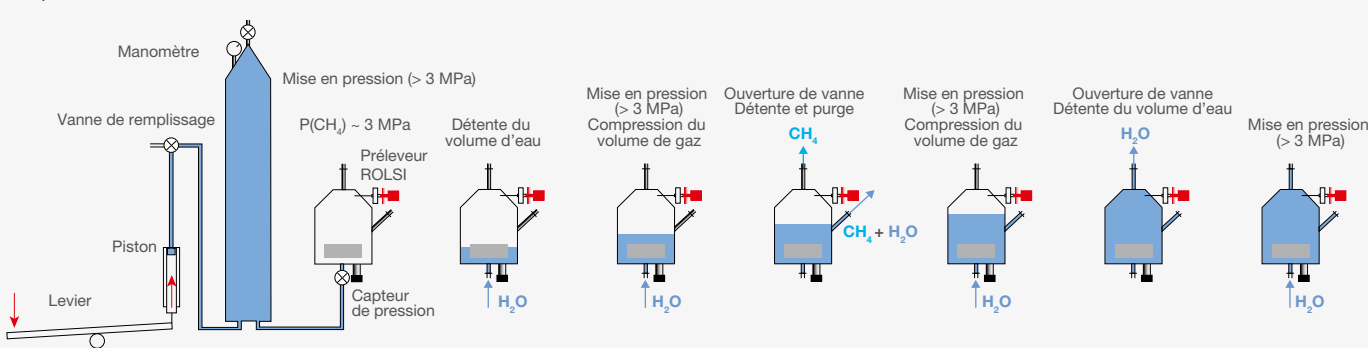
Arnaud Charmoille

La plupart des mines souterraines ont été creusées sous le niveau des nappes phréatiques. Pour permettre leur exploitation, d'importants moyens d'exhaure permettaient d'éviter l'engorgement des travaux miniers. La fermeture des mines est suivie par l'arrêt de ces pompes et, par conséquent, par l'engorgement progressif des vides miniers. L'atmosphère souterraine présente au sein des chantiers est constituée d'un mélange d'air en provenance de la surface et de gaz émanant des roches. Dans le cas de mines de charbon, le gaz désorbé (grisou) est souvent très riche en méthane, un gaz inflammable. Durant l'exploitation, une ventilation forcée des travaux permet de garantir une évacuation satisfaisante de ce gaz et de fournir aux mineurs une atmosphère respirable et sécurisée. Après la fermeture de la mine, cette ventilation est arrêtée, mais le grisou continue pour sa part à se désorber du charbon, même si les flux mis en jeu sont considérablement réduits. Ce gaz peut, dans certaines configurations défavorables, constituer un risque pour les populations et les installations présentes en surface. De précédents travaux [A, B] ont montré l'effet inhibiteur de l'engorgement sur l'émission de gaz de mine en surface à court terme. Pourtant, la poursuite de désorption du gaz ainsi que

sa migration à long terme au sein des travaux miniers engorgés s'avèrent très mal connues. Les travaux de thèse réalisés par Nils Le Gal à l'INERIS [C], en collaboration avec le Centre de géosciences de Mines Paris Tech, ont consisté à développer une approche expérimentale de la libération du méthane depuis un échantillon de charbon engorgé couplée à une approche numérique de la migration du méthane dissous au sein des anciennes structures minières.

## Quantifier la libération de méthane

Un dispositif expérimental de laboratoire baptisé CASPER (Capacité de sorption à hautes pressions lors de l'engorgement des roches) a été développé pour quantifier la libération de méthane depuis un échantillon de charbon préalablement saturé en méthane dans une cellule autoclave. L'échantillon est soumis à une pression d'eau supérieure ou égale à 3 MPa, ce qui correspond à une hauteur d'engorgement de 300 m et plus, gamme de pression fréquente au sein d'anciennes structures minières après la remontée des eaux **Figure 1**. Les expérimentations ont confirmé l'existence d'une « désorption sous eau » induisant la solubilisation d'une fraction significative du méthane initialement présent dans le charbon **Figure 2**.

**Figure 1**  
Étapes de la mise en eau de la cellule.


En revanche, contrairement à ce qui était présupposé, l'augmentation de la pression d'eau semble avoir pour effet d'augmenter la quantité de méthane désorbée (en sollicitant davantage la structure poreuse du charbon). Des constantes d'équilibre de désorption ont été déterminées et introduites dans des simulations numériques.

## L'importance des propriétés hydrodynamiques du charbon

Les modèles développés avec le code de transport réactif HYTEC ont permis de simuler la migration du méthane dissous au sein d'un milieu poreux hétérogène, constitué d'anciens vides miniers, de zones foudroyées, de terrains décomprimés et de formations rocheuses moins influencées par l'exploitation. Les interactions au sein du système eau-charbon-méthane ont été définies à partir des constantes de sorption déterminées sur la base des mesures de laboratoire. L'étude de sensibilité a souligné l'importance des propriétés hydrodynamiques du charbon en termes de cinétique de libération du méthane dans le milieu. Elle a également confirmé le rôle des anciens travaux en tant que voies de circulation préférentielles.

**ABSTRACT**

Mine flooding generally occurs after mine closure due to the end of mine water pumping. Several gases are naturally drained from coal to mine workings, even after end of extraction. Depending to the context, some of them may constitute a hazard for population living on surface. The paper presents a protocol dedicated to the characterisation of methane desorbed from coal structure as well as its migration through flooded mines and up to the surface.

**Références**

[A] Pokryszka Z. *Émission de grisou à la surface de la concession De Wendel après l'arrêt des exhaures minières*, 2000, Rapport INERIS DRS-00-26095/R01.

[B] Pokryszka Z. *Émission de gaz de mine par les terrains à la surface du secteur Merlebach-l'Hôpital de la concession de Sarre et Moselle après l'arrêt des exhaures*, 2005.

[C] Le Gal N. *Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier : développement d'un protocole expérimental et approche*

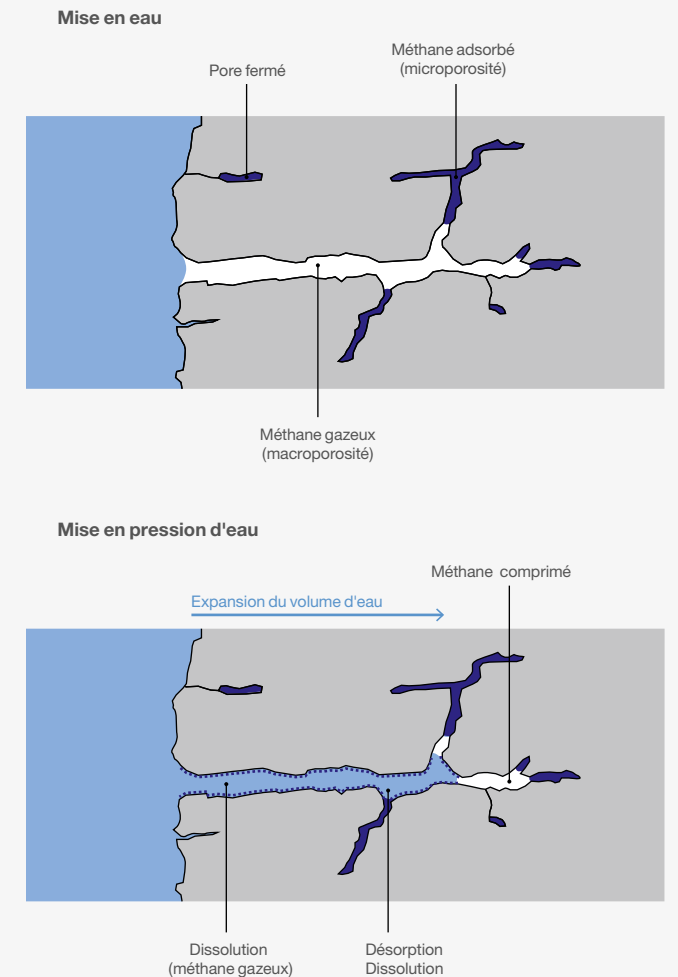
numérique. Thèse de doctorat. École nationale supérieure des mines de Paris. Soutenance le 18 juin 2012.

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, 1 July 2012, 96–97, pp. 82–92.

Klinger C., Charmoille A., Bueno J., Gzyl G., Garzon Súca B. *Strategies for follow-up care and utilisation of closing and flooding in European hard coal mining area*, International Journal of Coal Geology, 2012, 89, pp. 51–61.

**Figure 2**

État du charbon au moment de la mise en eau et solubilisation du méthane dans le charbon avec la pénétration de l'eau dans sa porosité.







## Évaluation de la stabilité thermique et danger d'incendie des méthoxydes de sodium et de potassium

Les méthoxydes de sodium et de potassium (formules chimiques  $\text{CH}_3\text{ONa}$  et  $\text{CH}_3\text{OK}$ ) sont promus depuis le milieu des années 2000 comme catalyseurs pour la production de biodiesel à partir de sources lipidiques. Lorsqu'une catalyse homogène en milieu acide est retenue pour la réaction de base dans la formulation de biodiesel, les méthoxydes de sodium ou de potassium sont souvent préférés aux formes hydroxydes parentes, car ils permettent une amélioration du rendement de conversion des triglycérides tout en réduisant les coûts de purification du biodiesel (Figure 1). Des incidents survenus à la mise en œuvre de ces produits, pour lesquels aucun retour d'expérience n'est formalisé, ainsi qu'une information relativement confuse, et parfois contradictoire, sur les dangers intrinsèques ont motivé la réalisation d'un programme exploratoire de caractérisation des dangers thermiques de ces produits. Ce travail s'est fait en collaboration avec le CERL<sup>(1)</sup> d'Ottawa. Les produits techniquement purs se présentent sous la forme de poudres blanches, formes sur lesquelles le travail a principalement porté. Les formes liquides commercialisées (solutions concentrées de 25 à 30% dans du méthanol) ont également été examinées (Tableau 1).

### Références

Kwok Q., Acheson B., Turcotte R., Janes A., Marlair G. *Fire and explosion hazards related to the industrial use of potassium and sodium methoxides*, Journal of Hazardous Materials, 2013, 250-251, pp. 484-490.

Kwok Q., Acheson B., Turcotte R., Janes A.,

### Démarches expérimentales

Un plan d'expérience a été établi pour cerner les propriétés de stabilité thermique des produits (frais ou âgés) dans différentes ambiances (air sec, air humide) et d'inflammabilité des poudres, jusqu'à l'analyse du danger d'explosion de poussière en cas de dispersion accidentelle dans l'air. Les méthodes expérimentales mises en œuvre ont été les suivantes : essais d'auto-échauffement en étuves isothermes, analyse thermique différentielle couplée à une analyse thermique gravimétrique (ATD-ATG), DSC (*Differential scanning calorimetry*), nanocalorimétrie isotherme, essais d'explosion en sphère de 20 litres, calorimètre de Tewarson pour l'analyse du comportement au feu.

### Principaux résultats

De façon générale, les essais de stabilité thermique montrent une plus grande réactivité du méthoxyde de sodium par rapport au méthoxyde de potassium. Ces produits peuvent être le siège d'une réaction exothermique violente dès 100 °C. Ceci est toutefois très influencé par l'hygrométrie de l'air et le confinement. Une dégradation des produits par l'humidité de l'air est constatée dès la température ambiante.

### CONTRIBUTEURS



Guy Marlair

Agnès Janès

### NOTE

(1) Canadian Explosives Research Laboratory.

Figure 1

Méthoxyde de sodium – réaction de transestérification.

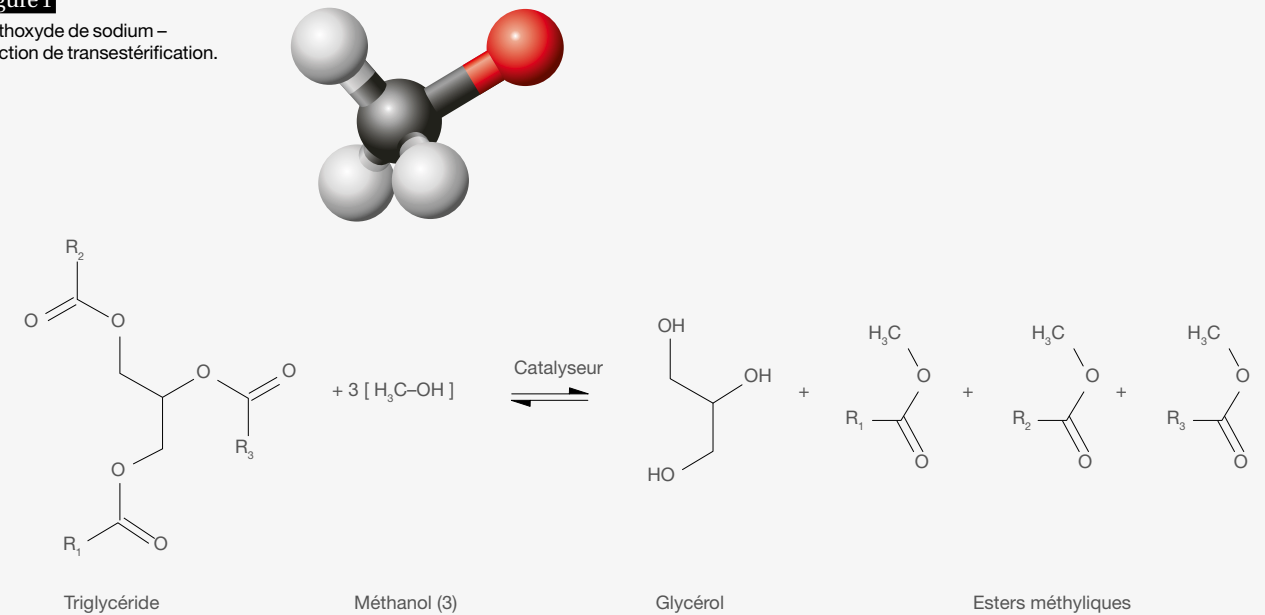


Tableau 1

Aperçu des propriétés des produits rapportés dans la littérature (OECD report, 2006).

| Substance   | Sodium methanolate   | Potassium methanolate   | Comment/Reference (sodium methanolate/potassium methanolate)  |
|---|--|---|---|
| Property  | Value  | Value   |   |
| Physical state/color                              | Solid/white/   | Solid/white to yellowish                                      | Degussa, 1998; Degussa, 2002  |
| Melting point                                     | 300 °C / Decomposition > 127 °C                            | 300 °C (decomposition)  | CRC 2001, IPCS 2001; BASF AG, 2002, 2003  |
| Boiling point                                     | n.a.   | n.a.  | Decomposes already below the melting temperature  |
| Density   | 1.3 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)                              | 1.7 g/cm <sup>3</sup>   | Degussa, 2005; Roempp, 2003   |
| Bulk density (20 °C)                              | 0.45 g/cm <sup>3</sup>                                     | 0.95 g/cm <sup>3</sup>  | Degussa, 1998; Degussa, 2002  |
| Vapor pressure (25 °C)                            | 0.000639 Pa  | 0.000639 Pa   | Calculated; Degussa, 2003; Degussa, 2003 b  |
| Water solubility                                  | Decomposition, hydrolysis to methanol and sodium hydroxide | Decomposition, hydrolysis to methanol and potassium hydroxide | Sax, 2000; IPCS, 2001; Sax, 2000  |
| Partition coefficient n-octanol/water (log value) | -0.74 (methanol)   | -0.74 (methanol)  | Due to rapid hydrolysis in water to methanol and sodium or potassium hydroxide, only the log K <sub>ow</sub> of methanol is relevant. OECD, 2004  |
| Henry's law constant                              | 0.461 Pa m <sup>3</sup> /mol (methanol)                    | 0.461 Pa m <sup>3</sup> /mol (methanol)                       | Due to rapid hydrolysis in water to methanol and sodium or potassium hydroxide, only the Henry's law constant of methanol is relevant. OECD, 2004 |
| Autoignition temperature                          | 50 - 60 °C   | 90 - 100 °C   | Degussa, 2005; Degussa, 2004  |
| pKa   | 15.5 (methanol)  | 15.5 (methanol)   | Friedrich, Sonnefeld, and Jansen, 1998  |

Les conditions d'inflammabilité et les profils de combustion des méthoxydes testés sous forme de solutions sont très voisins en termes de débit calorifique et produits de combustion émis du comportement du solvant seul; on observe néanmoins la formation en surface d'un résidu blanchâtre qui, selon toute vraisemblance, est une forme oxydée du métal alcalin (Na, K) correspondant **Photo 1**.

La réaction à la flamme des échantillons secs à l'air ne conduit pas à une combustion entretenue dans la masse. En revanche, l'échantillon développe des phénomènes d'incandescence, et les résidus peuvent être sources de point chaud si le contact à l'air est intensifié. Lorsque ces produits à l'état de poudres sont dispersés dans l'air, une atmosphère explosive se forme. La violence d'explosion est toutefois modérée et, dans tous les cas, très inférieure à celle des métaux.

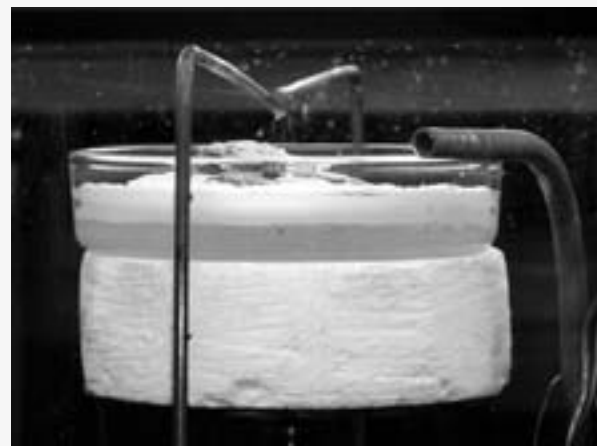
### Conclusion

On peut conclure, pour ce qui concerne la mise en œuvre des poudres, que les risques liés à l'utilisation de ces produits sont principalement associés à une stabilité thermique complexe et fortement conditionnée par l'environnement ambiant et l'état de fraîcheur du produit. Dans les cas extrêmes, des décompositions exothermiques sont possibles à des températures voisines de l'ambiance. Soumis à de fortes chaleurs, le produit peut devenir une source indirecte d'inflammation par point chaud.

Ce travail comble en partie le manque d'information relative à la sécurité de mise en œuvre de ces produits dont l'importance en génie des procédés n'est plus à démontrer. Il sem-

**Photo 1**

Résidu blanchâtre formé en surface du méthoxyde de sodium liquide au cours de l'essai au calorimètre de Tewarson.



blerait utile de compléter l'analyse de l'influence de l'atmosphère et de l'humidité, et d'examiner l'influence potentielle des impuretés de fabrication, qui peuvent varier selon les procédés de fabrication des produits étudiés. Dans le cas de l'utilisation des méthoxydes étudiés pour la production de biodiesel, les résultats militent pour leur emploi sous la forme de solutions dans le méthanol, plus commodes de mise en œuvre et présentant un risque « simple » d'inflammabilité.

### Collaboration

Richard Turcotte, Ressources naturelles Canada.

### ABSTRACT

Sodium and potassium methoxides are used as an intermediary for a variety of products in several industrial applications. Current production of so called "1G-biodiesel" processes implies the use of methanol, caustic potash (KOH), and caustic soda

(NaOH) for which the hazards are well characterized. The more recent introduction of the direct catalysts  $\text{CH}_3\text{OK}$  and  $\text{CH}_3\text{ONa}$  may potentially introduce new process hazards. From an examination of existing MSDSs concerning these products, it appears that no consensus currently exists on their intrinsic hazardous properties. INERIS and the CERL (Canada) have embarked upon a joint effort to better characterize the thermal hazards associated with these catalysts. This work employs the

more conventional tests for water reactivity as an ignition source, and fire and dust explosion hazards, using isothermal nano-calorimetry, isothermal basket tests, the Fire Propagation Apparatus and a standard 20 L sphere, respectively. It was found that these chemicals can become self-reactive close to room temperature under specific conditions and can generate explosive dusts.

## Mécanismes des réactions sodium-eau

Une thèse conduite en collaboration entre l'UTC<sup>(1)</sup>, l'INERIS et le CEA<sup>(2)</sup> de Cadarache vient de s'achever **[A]** dans le domaine des « réacteurs rapides à caloporteur sodium » (SFR), un concept de référence dans le cadre du développement des réacteurs de 4<sup>e</sup> génération **[B]**. Le sujet de la thèse porte sur la réaction chimique entre le sodium (Na) et l'eau, dont la maîtrise représente un défi important.

Le sodium est utilisé comme réfrigérant primaire du fait de ses bonnes propriétés thermiques et neutroniques. Mais le sodium réagit énergiquement avec l'eau, en produisant principalement de l'hydrogène et de la soude: la compréhension et la maîtrise de cette réaction représentent un enjeu majeur pour la sûreté des réacteurs. Jusqu'alors, le caractère explosif du contact entre sodium et eau était attribué à la réaction secondaire entre l'hydrogène (produit par la réaction sodium-eau) et l'oxygène de l'air.

L'analyse de résultats expérimentaux antérieurs a démontré l'existence d'une réaction explosive aussi bien en présence qu'en absence d'air, ce qui indique que les phénomènes explosifs ne sont pas liés à la présence d'oxygène. La primauté de la vaporisation de l'eau et son potentiel explosif ont été mis en évidence pendant la thèse. D'autres

essais ont été réalisés dans son cadre pour compléter la compréhension de la cinétique chimique. Le phénomène réactionnel est piloté par les transferts de masse, y compris à très basse température, ce qui signifie que la réaction est extrêmement rapide **Figure 1**.

Une représentation phénoménologique a été proposée: immergé dans l'eau, un morceau de sodium subit une hydrolyse superficielle non explosive (car à basse température) et se trouve enveloppé d'une couche d'hydrogène qui l'isole thermiquement. De la vapeur d'eau traverse ce film et réagit adiabatiquement avec le sodium. Le sodium se réchauffe jusqu'à l'ébullition. Dès que des vapeurs de sodium sont émises, il est fait l'hypothèse que la réaction devient gazeuse, ce qui rompt le film gazeux protecteur, et l'eau liquide se mélange instantanément avec le sodium bouillant. Une vaporisation explosive se produit alors. Ce modèle est tout à fait cohérent avec les observations expérimentales **Figure 2**.

Sur cette base, un modèle d'estimation des effets de la réaction sodium-eau, plus pertinent que ceux préconisés auparavant, a été proposé. La thèse a reçu le prix d'excellence de l'EFCE<sup>(3)</sup> et une « mention » de la SFEN<sup>(4)</sup> pour son caractère novateur et la qualité du transfert des connaissances vers l'application industrielle.

### CONTRIBUTEUR



**Christophe Proust**

### Références

**[A]** Carnevali S. *Unsteady aspects of Sodium-Water reaction*. Thèse soutenue le 22 octobre 2012 à l'Université de technologie de Compiègne.

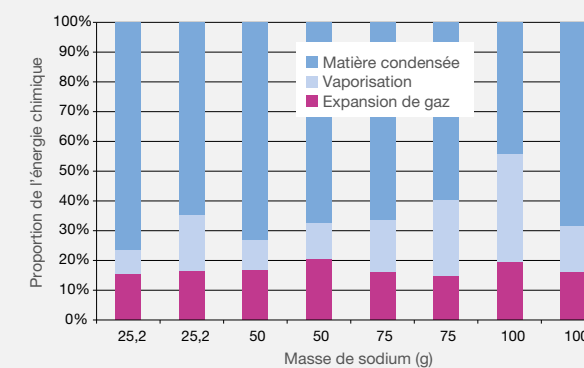
**[B]** Doe U.S. Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, 2002, A technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, December 2002.

### NOTES

- (1) Université de technologie de Compiègne.
- (2) Commissariat à l'énergie atomique.
- (3) European Federation of Chemical Engineering.
- (4) Société française d'énergie nucléaire.

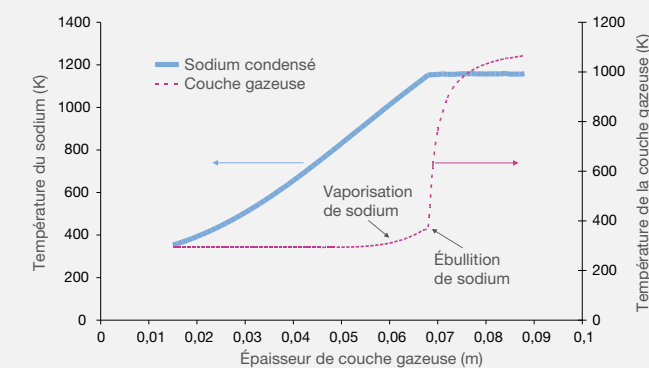
**Figure 1**

Interprétation de résultats d'essais à propos de la répartition de l'énergie de réaction: la partie « gas expansion » est responsable des effets de pression.



**Figure 2**

Évolution des températures du sodium et du film gazeux en fonction de son épaisseur. Variation en proportion du sodium consommé (13 g Na initialement).





# Comportement au feu de réservoirs entièrement composites destinés au stockage de gaz à très haute pression

## NOTES

(1) *Thermally activated Pressure Relief Device.*

(2) Agence nationale de la recherche.

L'usage de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie est envisagé comme complément ou alternative à l'électricité, notamment pour les applications où une grande autonomie est requise, tel le transport automobile [A]. Parmi différentes options possibles, le stockage sous forme gazeuse à très haute pression paraît techniquement le plus favorable [B]. Dans le cas spécifique de l'hydrogène, des réservoirs entièrement composites, dits de type IV, ont été conçus : l'hydrogène est contenu dans une enceinte fine (quelques millimètres) de plastique qui assure l'étanchéité, enveloppée par l'extérieur par un bobinage serré de fibres de verre (de quelques dizaines de millimètres) noyées dans une résine époxy qui assure la résistance mécanique. Cette stratégie est techniquement supérieure aux traditionnelles « bouteilles » en métal, non seulement pour des raisons de poids mais aussi eu égard à la fatigue et au vieillissement sous hydrogène.

Cependant, ces réservoirs en matière plastique sont plus sensibles aux effets des incendies et éclatent assez rapidement (en quelques minutes dans un feu généralisé) avec des effets catastrophiques [C]. C'est pourquoi il est prévu de les équiper d'orifices de décharge (TPRD<sup>(1)</sup>) qui s'ouvrent sous l'effet de la chaleur et vident le contenu du réservoir de façon à éviter l'éclatement. Néanmoins, le retour d'expérience indique que cette

technologie n'est pas efficace, par exemple, si le feu est localisé ou si l'orifice de décharge est trop petit. Par ailleurs, nul ne s'inquiète des effets de jet de flamme qui peuvent être considérables lorsque le débit est important [D].

L'objectif de ces travaux est de fournir des éléments de compréhension du comportement des réservoirs composites lorsqu'ils sont soumis à un feu et d'en déduire les caractéristiques que devraient avoir les systèmes de protection comme les TPRD. Ces travaux ont été réalisés en partenariat étroit avec Air Liquide et avec le soutien financier de l'ANR<sup>(2)</sup>.

## L'installation d'essai

Les expériences ont été réalisées dans une galerie du site de l'INERIS à Montlavoille (Figure 1), avec pour objectif de contenir les effets de l'éclatement des réservoirs. Un bac de 0,7 m<sup>2</sup> contenant de l'heptane, liquide de référence en matière d'incendie, est utilisé comme matière inflammable. Il est alimenté en permanence. Le taux de régression du feu est de 50 g/m<sup>2</sup>/s, tandis que sa puissance nominale est de 1,5 MW. En utilisant une maquette métallique du réservoir comme calorimètre, on a pu déterminer que le flux thermique net reçu par le réservoir est de 110 kW/m<sup>2</sup>, ce qui est une valeur « haute » et témoigne d'une « agression » violente.

L'instrumentation se compose pour l'essentiel de six thermocouples K sur la périphérie du réservoir et d'un capteur piézorésistif pour suivre l'évolution de la pression interne (Tableau 1). L'hydrogène a été remplacé par de l'hélium afin d'éviter une pressurisation excessive de la galerie sous l'effet de la combustion de l'hydrogène après l'éclatement. Les conditions d'essai figurent dans le Tableau 1. Un seul modèle de réservoir a été testé.

## Résultats

Deux exemples de comportement au feu de réservoirs dépourvus de TPRD sont présentés sur la Figure 2.

Des températures relativement stables de 800 °C sont atteintes alors que la pression interne ne semble guère varier pendant 300 secondes, signifiant que le front de chaleur n'est pas parvenu aux couches internes du composite. À la pression nominale, la rupture se produit au bout de 6 minutes environ, mais ce délai varie inversement proportionnellement à la pression

## CONTRIBUTEURS



Christophe Proust

## Références

[A] McKinsey & Company. *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis – The role of battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*, 2010, info@zeroemissionvehicles.eu

[B] Sarkar A., Banerjee R. *Net energy analysis of hydrogen – storage options*. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(8), pp. 867–77.

[C] Weyandt N. *Vehicle bonfire to induce catastrophic failure of a 5,000-PSIG Hydrogen Cylinder Installed on a Typical SUV – Final report – SwRI Project N° 01.06939.01.005 – 2006*, 28 pages.

[D] Proust C., Jamois D. Studer E., *High pressure hydrogen fires*, International Journal of Hydrogen Energy, 2011, vol. 36, pp. 2367–2373.

Perrette L., Wiedemann H.K. *CNG bus fire safety: Learning from recent accidents in France and Germany*. SAE International, 2007. Zalosh R. *CNG and Hydrogen Vehicle Fuel Tank Failure Incidents, Testing, and Preventive Measures*, 2008.

Figure 1

Vues de l'entrée de la galerie et de l'installation d'essai.



Figure 2

Évolution des températures et de la pression interne pendant l'incendie (pression initiale de 700 bar à gauche et 178 bar à droite).

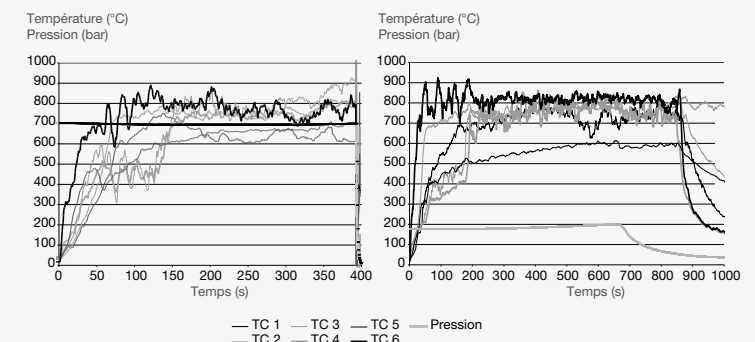


Tableau 1

Conditions d'essai.

| Réservoir     | Pression initiale | Temps à l'éclatement                   | Taille TPRD | Position des thermocouples |
|---------------|-------------------|--|-------------|----------------------------|
| type IV, 36 L | 700 bar           | 6 min 32 s                             | sans        |                            |
|               | 700 bar           | 5 min 20 s                             |             |                            |
|               | 350 bar           | 9 min 49 s                             |             |                            |
|               | 178 bar           | Pas d'éclatement – fuites à 11 min 4 s | 0,5 mm      |                            |
|               | 700 bar           | non                                    |             |                            |

initiale (Tableau 1). Lorsque la pression initiale n'est plus que de 178 bar, le réservoir n'éclate plus mais se met à fuir, si bien que le contenu est évacué de manière « naturelle ». L'expertise du réservoir a montré que l'enveloppe interne s'est désagrégée, ainsi que la résine, permettant au gaz de s'échapper de manière diffuse à travers les fibres.

Ce résultat important a été mis à profit, pour définir un TPRD « optimisé ». Pour le type de réservoir testé, l'état de l'art suggérerait un orifice de décharge de 3 à 6 mm qui s'activerait en typiquement 90 secondes, alors que la pression dans le réservoir est de 700 bar. Une flamme longue de 11 m apparaîtrait... D'après nos résultats d'essais, pour ce même délai d'activation, on pourrait prévenir l'éclatement à condition que la pression passe en dessous de 350 bar et de 200 bar, respectivement en moins de 9 minutes et 11 minutes. Comme le confirme l'expérience (dernière ligne du tableau 1), un orifice de 0,5 mm suffit pour produire une flamme très réduite: 0,5 m de longueur. Cela paraît plus acceptable.

## Perspectives

La technologie du stockage d'hydrogène sous très forte pression pourrait être envisagée grâce à la mise au point de réservoirs composites de type IV (sans conteneur métallique). L'un des enjeux est la résistance de ces capacités à l'incendie. Ces travaux sont une contribution à cet effort grâce à la conduite d'essais à l'échelle réelle. L'une des avancées majeures est de constater que le réservoir peut fuir de manière diffuse sans éclater, même dans des feux très intenses. Cette expérimentation a servi à mettre au point un système automatique de dépressurisation de dimensions suffisamment réduites pour que le risque résiduel (le feu torche d'hydrogène) paraisse tolérable. Ces développements s'inscrivent dans une démarche plus globale de définition de stratégie de prévention de ce type de réservoir.

## ABSTRACT

High-pressure full composite cylinders are a practical solution aiming at containing high pressure gases (up to 700 bar or even more) at an affordable cost and weight. Since they are not expected to resist in a large fire and may burst, they may be equipped with a TPRD (Thermally activated Pressure Relief Device). These devices are designed

to release the internal content of the reservoir once a preset temperature is surpassed. When the gas is flammable, like hydrogen for which this full composite reservoir+TPRD technology is more specifically designed, the activated release may produce a very hazardous jet flame [D] to protect them from fire. In the event of a fire, the TPRD prevents the cylinder from bursting by detecting high temperatures and releasing the pressurized gas. The current safety performance of both the vessel and the TPRD is demonstrated by an engulfing bonfire test. However, experience shows that

totally unacceptable jet flames may result (up to 11 m long for a 40 l reservoir...). The objectives of this research were to investigate the behaviour of isolated full composite reservoirs (without TPRD) engulfed in a fire (figure 1) and to select the appropriate TPRD size as to obtain an efficient but yet safe release. A major finding is that those reservoirs may leak in a diffuse manner without bursting if the internal pressure is not too high (table 1). Following a much smaller TPRD could be used for which the jet flame length becomes tolerable.



## SUBSTANCES CHIMIQUES

- 20** Développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale: caractérisation de la toxicité et du métabolisme *in vitro* de xénobiotiques au sein de biopuces hépatiques et rénales
- 
- 23 FOCUS.** Estimation de l'incertitude de prédictions individuelles QSAR
- 
- 24** Étude théorique des incompatibilités chimiques au nitrate d'ammonium et de ses mécanismes de décomposition
- 
- 27** Contribution à l'amélioration de la méthode d'essai ONU N.5 relative à la caractérisation des solides qui dégagent des gaz inflammables au contact de l'eau
- 
- 30** Génotoxicité et perturbation de la reproduction chez l'épinoche à trois épines
- 
- 32** Modélisation de la perturbation de la synthèse des hormones ovariennes par les produits chimiques chez les mammifères
- 
- 34** Améliorer les connaissances sur le devenir et les effets des médicaments dans l'environnement
-



# Développement de méthodes alternatives en expérimentation animale : caractérisation de la toxicité et du métabolisme *in vitro* de xénobiotiques au sein de biopuces hépatiques et rénales

CONTRIBUTRICE



Céline Brochot

En complément des systèmes *in vitro* traditionnels, les systèmes microfluidiques ont connu récemment un fort développement. Ces microsystèmes, appelés aussi biopuces, permettent une culture cellulaire dans un fluide circulant afin de reproduire l'organisation des cellules au sein des tissus ainsi que les conditions physiologiques d'écoulement qui apportent *in vivo* des nutriments, de l'oxygène ou des xénobiotiques aux cellules cibles. Parce que cette nouvelle génération de tests *in vitro* est conceptuellement différente des systèmes traditionnels, il apparaît essentiel d'évaluer leur pertinence pour des applications en toxicologie ou pharmacologie, notamment dans le cadre du

développement de méthodes alternatives en expérimentation animale. Nous présentons ici trois aspects traités au sein des projets SYSBIOX et  $\mu$ HepaReTox: la caractérisation du comportement cellulaire, l'évaluation de la toxicité de xénobiotiques par des techniques Omiques et la détermination du métabolisme de xénobiotiques au sein des biopuces.

### Caractérisation du métabolisme cellulaire dans les biopuces

Des techniques de métabolomique ont été développées pour décrire et comprendre le métabolisme cellulaire basal dans les biopuces (Figure 1). Des analyses statistiques multidimensionnelles dites supervisées ont été mises en place afin de caractériser la signature métabolique d'une culture en biopuce. En particulier, nos analyses ont montré une signature métabolique endogène des biopuces directement reliée aux conditions de culture, ainsi qu'une ségrégation claire entre les signatures métaboliques des biopuces hépatiques, rénales et de coculture foie-rein. Une signature métabolique unique a donc été obtenue démontrant la présence d'un métabolisme endogène spécifique à chaque type de biopuce, directement relié à la fonction physiologique de cet organe dans l'organisme [A].

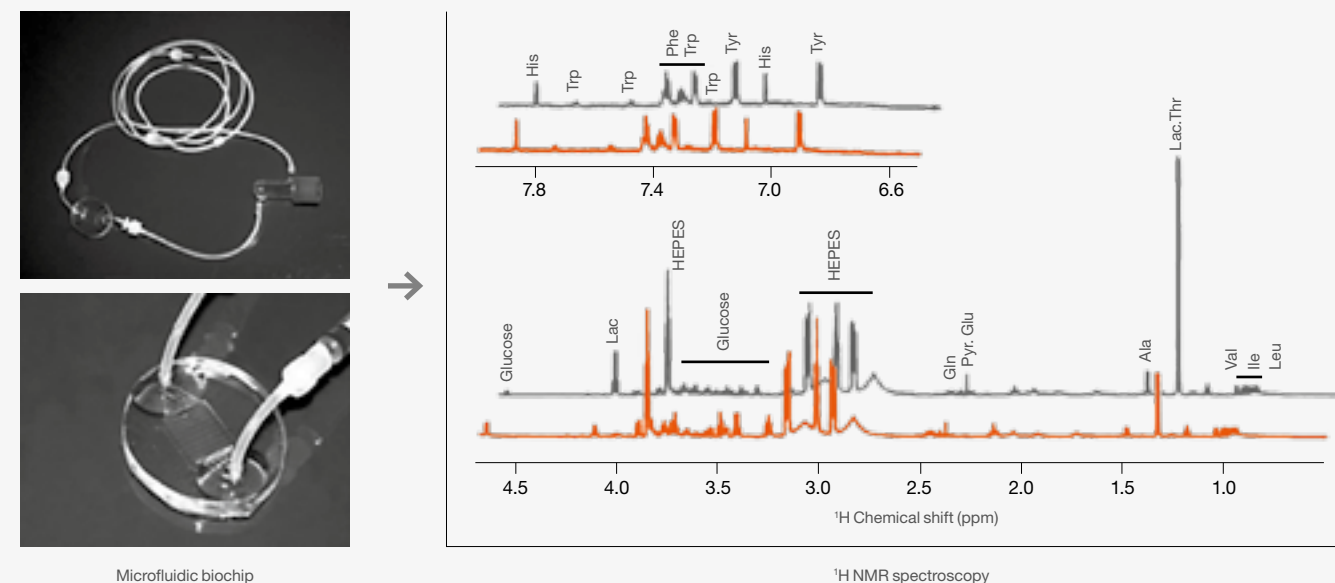
En complément des analyses de métabolomique, nous avons proposé une modélisation mécanistique du métabolisme cellulaire en combinant la métabolomique-sur-puce et l'analyse des flux métaboliques (Figure 2). Nos résultats montrent que la biopuce hépatique et la boîte de Pétri présentent des activités glycolytiques similaires et caractéristiques d'un environnement limité en oxygène. Cependant, ces activités sont significativement plus élevées en biopuce, ce qui suggère un meilleur approvisionnement en oxygène. Ces résultats ont été validés par des analyses de transcriptomique [B].

### Identification des perturbations métaboliques endogènes liées à la présence de xénobiotiques

Plusieurs xénobiotiques de référence tels que l'ammoniaque, le diméthylsulfoxyde, l'acétaminophène, l'ifosfamide et la flutamide ont été testés sur des biopuces hépatiques à différentes concentrations afin d'identifier des perturbations métaboliques endogènes liées à leur présence [C, A, E].

Figure 1

Métabolomique-sur-biopuce (panel de gauche: biopuce hépatique; panel de droite: spectre RMN).



## Références

[A] Shintu L., Baudoin R., Navratil V., Prot J.-M., Pontoizeau C., Defernez M., Blaise B. J., Domange C., Pery A. R., 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, pp. 1840-1848.

[B] Quattara D. A., Prot J.-M., Bunescu A., Dumas M. E., Elena-Herrmann B., Leclerc E., Brochot C. *Metabolomics-on-a-chip and metabolic flux analysis for label-free modeling of the internal metabolism of HepG2/C3A cells*. Molecular Biosystems, 2012, 8, pp. 1908-1920.

[C] Choucha-Snouber L., Aninat C., Griscorn L., Madalinski G., Brochot C., Poleni P. E., Razan F., Guillouzo C. G., Legallais C., Corlu A., Leclerc E. *Investigation of ifosfamide nephrotoxicity induced in a liver-kidney co-culture biochip*. Biotechnology and Bioengineering, 2013, 110, pp. 597-608.

[D] Prot J.-M., Bunescu A., Elena-Herrmann B., Aninat C., Snouber L. C., Griscorn 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, pp. 270-280.

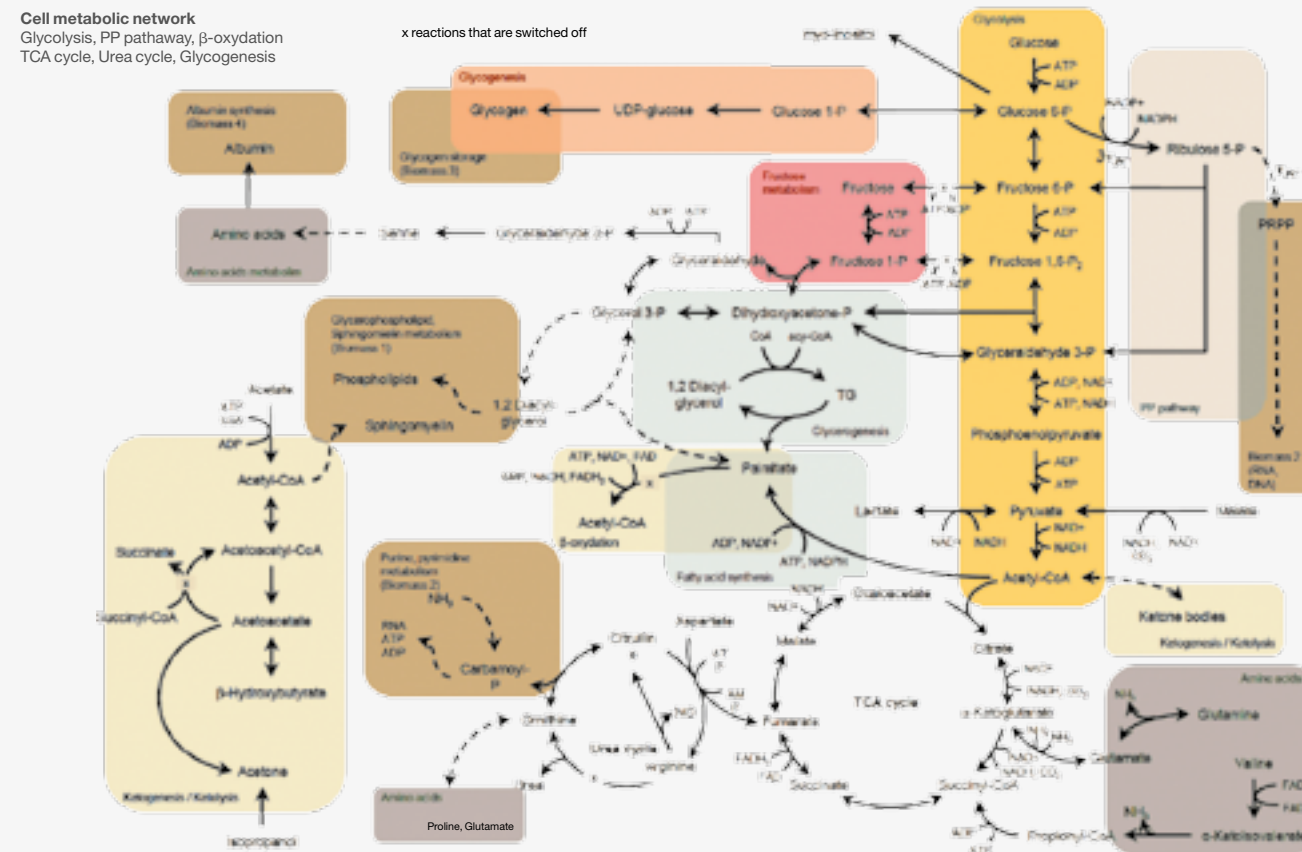
[E] Snouber L. C., Bunescu A., Naudot M., Legallais C., Brochot C., Dumas M. E., Elena-Herrmann B., Leclerc E. *Metabolomics-on-a-chip of hepatotoxicity induced by anticancer drug flutamide and its active metabolite hydroxyflutamide using HepG2/C3A microfluidic biochips*. Toxicol. Sci., 2013, 132, pp. 8-20.

[F] Baudoin R., Prot J.-M., Nicolas G., Brocheton J., Brochot C., Legallais C., Benech H., Leclerc E. *Evaluation of seven drug metabolisms and clearances by cryopreserved human primary hepatocytes cultivated in microfluidic biochips*. Xenobiotica, 2013, 43, pp. 140-152.

Prot J.-M., Videau O., Brochot C., Legallais C., Benech H., Leclerc E. *A cocktail of metabolic probes demonstrates the relevance of primary human hepatocyte cultures in a microfluidic biochip for pharmaceutical drug screening*. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 408, pp. 67-75.

Figure 2

Réseau métabolique intracellulaire d'un hépatocyte.





► Nos analyses ont mis en évidence une réponse métabolique unique et caractéristique de chaque molécule ainsi qu'une relation quantitative de dose-effet. Pour l'acétaminophène, l'intégration des profils métabolomiques, transcriptomiques et protéomiques a permis une reconstruction des voies spécifiques de toxicité [D].

#### Développement de modèles cinétiques pour les biopuces

Un cadre de modélisation a été proposé pour évaluer la clairance hépatique à partir du suivi temporel des concentrations de xénobiotiques dans la biopuce hépatique. Ce cadre intègre :

- 1) un modèle de cinétique décrivant le dispositif *in vitro*;
- 2) un modèle statistique liant la cinétique et les concentrations mesurées dans le milieu de culture;
- 3) un modèle permettant d'extrapoler la clairance (*i.e.*, la vitesse de disparition) *in vitro* à une clairance hépatique *in vivo* chez l'humain.

L'approche a été appliquée à plusieurs molécules thérapeutiques pour estimer la clairance de la molécule parente et les vitesses d'apparition des métabolites [F]. Les résultats montrent que le métabolisme hépatique est sous-prédict avec les biopuces et que des ajustements au niveau des matériaux (liaison non spécifique) sont nécessaires avant d'envisager l'utilisation de cette approche en tant que méthode alternative.

#### Conclusion

Les travaux menés ont démontré qu'un environnement microfluidique améliore l'oxygénation des cellules et l'utilisation de l'oxygène, favorisant ainsi la production d'énergie. Les biopuces associées à l'analyse métabolomique, l'analyse des flux métaboliques et des données issues d'autres technologies "omiques" peuvent être avantageusement intégrées pour améliorer notre compréhension du fonctionnement des cellules dans des milieux de culture *in vitro* et identifier des signatures métaboliques spécifiques aux molécules. Les travaux démontrent le caractère prédictif et le potentiel de cette approche en tant que test *in vitro/in silico* alternatif aux expérimentations animales.

#### Remerciements

Les projets SYSBIOX et  $\mu$ HepaReTox ont bénéficié de financements de l'Agence nationale de la recherche, respectivement dans les thèmes « Chimie et procédés pour le développement durable » et « Physique et chimie du vivant ».

#### Collaborations

UMR CNRS 6600 Biomécanique et génie biomédical de l'Université de technologie de Compiègne (UTC).  
Université Claude-Bernard, Lyon 1, Institut des sciences analytiques, Centre européen de RMN à très hauts champs (UMR 5280).  
Inserm, UMR 991 Foie, métabolismes et cancer de l'Université Rennes 1, CHU de Pontchaillou.  
CNRS-UMR 8089, SATIE/BIOMIS, École normale supérieure de Cachan-Bretagne.

#### ABSTRACT

Besides traditional *in vitro* systems such as plates or Petri dishes, microfluidic biochips have recently gained a remarkable interest. These *in vitro* systems aim at providing cellular environments close to *in vivo* conditions to reproduce reliably *in vivo* mechanisms or metabolic processes. In the framework of the SYSBIOX and  $\mu$ HepaReTox projects, we proposed to evaluate the toxicity and metabolism of xenobiotics in microfluidic biochips in order to assess the relevance of such

systems for applications in toxicology and pharmacology. One of the major results was the development of the metabolomics-on-chip approach. By combining the latter with the modeling of the intracellular metabolic network, we demonstrated that a microfluidic environment improves cell oxygenation. Our results indicated that the metabolic signature is unique to each biochip (liver, kidney or co-culture) demonstrating the presence of a specific endogenous metabolism directly related to the physiological function of the organ. In the presence of xenobiotics, a unique metabolic response, characteristic of each xenobiotic, is obtained in the hepatic biochip.

## Estimation de l'incertitude de prédictions individuelles QSAR

Les modèles QSAR (*Quantitative Structure Activity Relationships*) prédisent l'activité biologique d'une substance chimique à partir de sa structure moléculaire. Ces modèles constituent une alternative en expérimentation animale et sont de plus en plus utilisés en évaluation du danger. Beaucoup de travaux scientifiques ont été réalisés pour décrire de façon statistique la prédictivité globale des modèles QSAR, mais rares sont ceux qui ont quantifié l'incertitude liée à une prédiction individuelle. C'est pourquoi une nouvelle méthode linéaire de prédiction de l'activité au moyen d'une régression PLS (*Partial Least Squares*) a été élaborée sur une sélection de descripteurs physico-chimiques, qui détermine un faible nombre de combinaisons linéaires de descripteurs permettant d'expliquer en grande partie les différences d'activité [Figure 1]. Une méthode de régression locale a ensuite été utilisée – la régression à noyau de Nadaraya-Watson – pour prédire l'activité d'une nouvelle molécule : la prédiction est principalement esti-

mée à partir des molécules les plus semblables. Cette méthode permet également d'obtenir une estimation de la densité des données d'apprentissage, délimitant ainsi un domaine d'applicabilité du modèle [A] [Figure 2]. L'étude de l'effet de la variabilité expérimentale sur les prédictions individuelles est ensuite effectuée par simulation Monte-Carlo, et l'incertitude liée au modèle est quantifiée par rééchantillonnage [Figure 2]. La variabilité expérimentale peut aussi être spécifiée indépendamment pour chaque molécule d'apprentissage. Cette méthode permet ainsi d'obtenir, pour chaque prédiction [Figure 3] :

- une estimation de l'activité;
- l'appartenance au domaine d'applicabilité;
- l'identification des molécules d'apprentissage contribuant le plus à la prédiction;
- l'intervalle de confiance autour de la prédiction et l'écart-type de prédiction;
- la probabilité que la prédiction soit supérieure à un seuil d'activité défini par l'utilisateur.

#### CONTRIBUTEURS



Cléo Tebby

Enrico Mombelli

#### Références

[A] Netzeva T. I., Worth A. P., Aldenberg T., Benigni R., Cronin M. T. D., Gramatica P. et al. *Current status of methods for defining the applicability domain of (quantitative) structure-activity relationships – The report and recommendations of ECVAM Workshop 52, Atla-Alternatives to Laboratory Animals 2005*, 33, pp. 155-173.

Tebby C., Mombelli E. *A kernel-based method for assessing uncertainty on individual QSAR predictions*, Molecular Informatics, 2012, 31 (10), pp. 741-751.

Péry A. R. R., Henegar A., Mombelli E. *Maximum-Likelihood Estimation of Predictive Uncertainty in Probabilistic QSAR Modeling*, QSAR & Combinatorial Science 2009, 28, pp. 338-344.

Sahlin U., Filipsson M., Oberg T. *A risk assessment perspective of current practice in characterizing uncertainties in QSAR regression predictions*, Molecular Informatics 2011, 30, pp. 551-564.

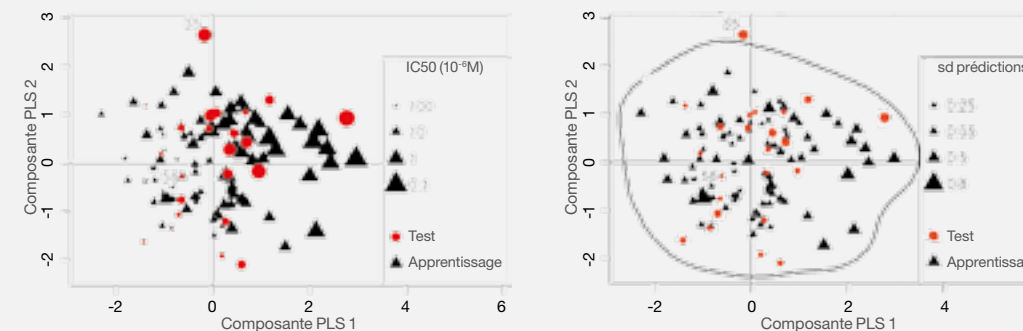


Figure 2 Molécules d'apprentissage du modèle et molécules de test, dans l'espace défini par deux composantes PLS. La taille des symboles représente l'incertitude liée au modèle, elle est proportionnelle à l'écart-type de prédiction associé. La ligne délimite le domaine d'applicabilité défini par la densité des données d'apprentissage.

Figure 1

Molécules d'apprentissage du modèle et molécules de test, dans l'espace défini par deux composantes PLS. La taille des symboles est proportionnelle à leur activité.

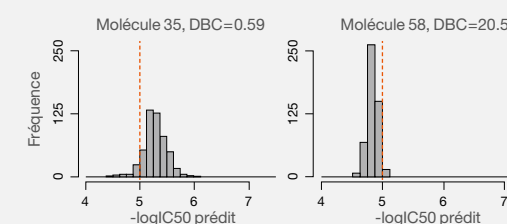


Figure 3

Résultats de prédiction (effet prédit : logarithme de la concentration inhibitrice médiane de l'activité de la polymérase HCV NS5B) pour deux molécules identifiées sur les figures 1 et 2. La DBC représente la densité des données d'apprentissage; lorsqu'elle est inférieure à 1, la molécule est dite hors domaine d'applicabilité et la prédiction n'est pas valide. La ligne rouge marque un seuil d'activité défini par l'utilisateur: les prédictions à sa droite contribuent à la probabilité de toxicité de la molécule.



# Étude théorique des incompatibilités chimiques du nitrate d'ammonium et de ses mécanismes de décomposition

La maîtrise du risque chimique dans l'environnement industriel nécessite une identification rapide et précise des incompatibilités pouvant exister lors du mélange de substances chimiques. Jusqu'à présent, cette identification s'effectue par des essais de *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) en laboratoire et les résultats sont collectés, par exemple, dans les fiches de données de sécurité (FDS) de chaque produit et dans de nombreuses tables d'incompatibilité existant dans la littérature. Cependant, les informations fournies sont limitées et ne permettent pas d'identifier ni de comprendre la relation cause-effet de l'incompatibilité entre deux substances concernées, ni le mécanisme chimique par lequel cette incompatibilité se produit. Dans ce contexte, la prédiction *a priori* de la réactivité entre deux molécules ou plus par modélisation moléculaire devient un outil complémentaire aux essais expérimentaux pour pouvoir comprendre et prédire

de manière fiable les chemins réactionnels, les produits qui se forment et la chaleur qui peut se libérer lorsqu'on mélange des substances chimiques. La thèse de Stefania Cagnina (2011-2014), en collaboration avec Chimie ParisTech, vise à comprendre à l'échelle moléculaire quelques mécanismes d'incompatibilité mettant en jeu le nitrate d'ammonium (NA) en utilisant les outils de chimie quantique, notamment la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT pour *Density Functional Theory*).

## Chemins de décomposition du nitrate d'ammonium (NA) par modélisation moléculaire

Le nitrate d'ammonium est un produit largement utilisé dans l'industrie chimique, surtout comme fertilisant et ingrédient dans la composition d'explosifs. Le nitrate d'ammonium pur est considéré comme un composé relativement stable à tem-

pérature et pression ordinaires. Il fond à 170 °C, mais le processus de décomposition a lieu à des températures supérieures à 200 °C. Bien qu'il soit normalement utilisé d'une façon sûre, un grand nombre d'accidents le concernant se sont produits au fil des années [A], comme en atteste le **Tableau 1**.

Les principaux phénomènes dangereux concernant le nitrate d'ammonium sont le feu, la décomposition et l'explosion. En effet, même si le NA pur n'est pas un produit combustible, il peut se décomposer et produire des gaz toxiques s'il est exposé à la chaleur. En outre, d'autres facteurs tels que le confinement et la contamination favorisent le risque d'explosion. En effet, comme observé dans le **Tableau 1**, les principaux accidents impliquent des mélanges de nitrate d'ammonium avec d'autres substances. Le NA pur est connu comme étant incompatible avec un grand nombre de substances chimiques (ammoniac, chlorures, métaux, acides, combustibles, sulfates) [B, C]. Il a été démontré qu'en présence de ces substances, sa sensibilité à l'explosion augmente car sa stabilité diminue [D].

D'après la littérature, le mécanisme de décomposition du nitrate d'ammonium n'est pas encore élucidé et de nombreuses hypothèses ont été proposées [E]. Aussi, une étude théorique approfondie a été menée et a permis d'identifier les chemins réactionnels, les produits formés et la chaleur dégagée par la décomposition du nitrate d'ammonium, pur en phase gaz **Figure 1** [F]. Tous les mécanismes ont été caractérisés à l'aide de la DFT. Ces calculs, réalisés à la température de 298,15 K et à la pression de 1 atm, mènent à la détermination des données thermodynamiques (énergie électronique avec correction d'énergie au point zéro, enthalpie, énergie libre de Gibbs) de chaque espèce chimique impliquée dans les réactions (réactifs, états de transition, *minima* locaux, produits) *via* le logiciel Gaussian09 [G].

La décomposition du nitrate d'ammonium pur, schématisée dans la **Figure 2**, nous montre que la réaction débute par la décomposition de NA pour donner l'ammoniac et l'acide nitrique. L'acide nitrique joue un rôle fondamental dans la suite de la réaction : la coupure homolytique de la liaison O-N mène à la formation des radicaux OH et NO<sub>2</sub>. À partir de cette étape, différents chemins réactionnels

### CONTRIBUTEURS



Stefania Cagnina



Guillaume Fayet



Patricia Rotureau

Figure 1

Représentation de la densité électronique et du potentiel électrostatique de la molécule de nitrate d'ammonium calculés avec Gaussian09.

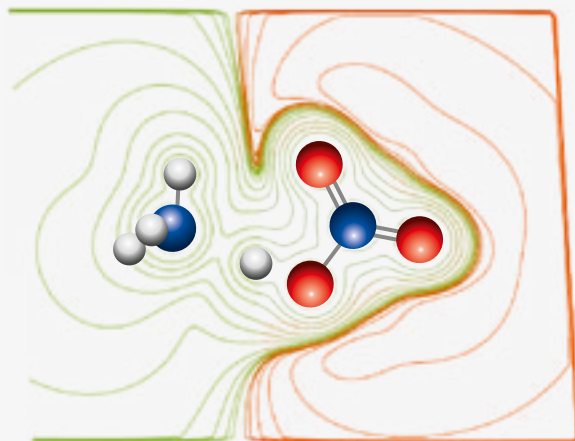


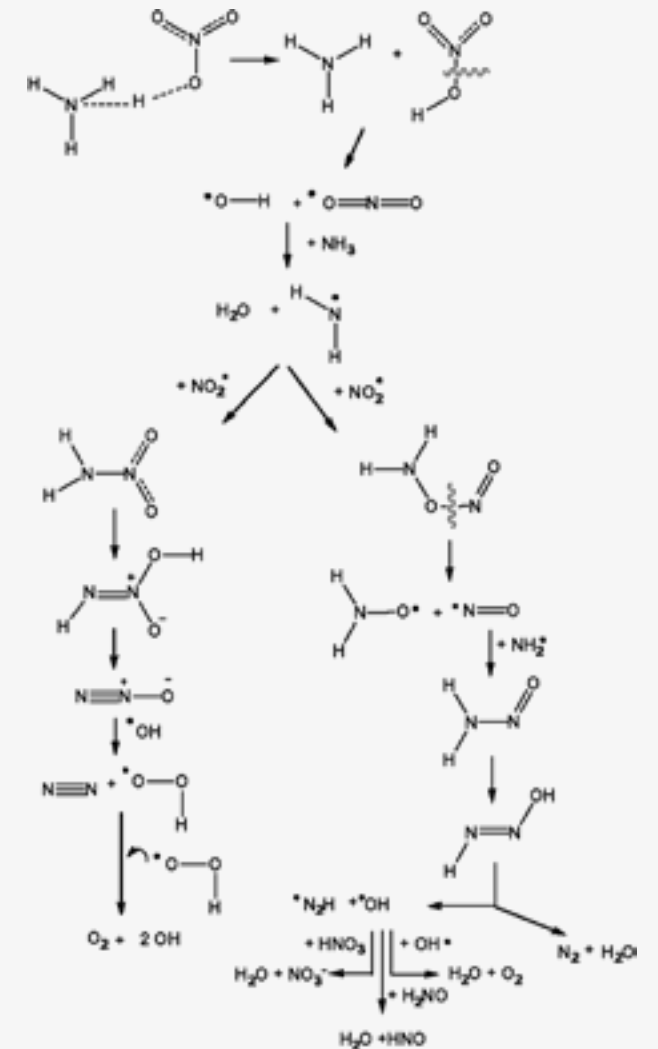
Tableau 1

Accidents majeurs impliquant du nitrate d'ammonium (NA).

| Année, Lieu                        | Substances concernées   | Effets                            |
|------------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1921, Oppau<br>Allemagne           | (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>    | Explosion                         |
| 1947, Canada                       | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>   | Incendie                          |
| 1947, Texas City<br>États-Unis     | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> (pure)/<br>NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> -sulfure | Explosion                         |
| 1954, Finlande (bateau)            | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> /papier/<br>cuivre acetoarsenite                    | Incendie suivi<br>d'une explosion |
| 1994, Sergeant Bluff<br>États-Unis | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>   | Explosion                         |
| 2000, Aunay-sous-Crécy<br>France   | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> /<br>matériaux organiques                           | Décomposition<br>du NA            |
| 2001, Toulouse<br>France           | NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub> /<br>dichloroisocyanurate<br>de sodium (DCCNa)      | Explosion                         |

Figure 2

Schéma global de la réaction de décomposition du nitrate d'ammonium [F]



## Références

- [A] Marlair G., Kordek M. A. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 123, pp. 13-28.
- [B] Oxley J. C., Smith J. L., Rogers E., Yu M. *Thermochemica Acta*, 2002, 384, 23.
- [C] Bretherick L. *Handbook of Reactive Chemical Hazards*, Butterworths, London, 2007, 1, 1749.
- [D] Sun J., Sun Z., Wang Q., Ding H., Wang T., Jiang C. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, B127, 204.
- [E] Chaturvedi S., Dave P. N. *Journal of Energetic Materials*, 2013, 31, 1.
- [F] Cagnina S., Rotureau P., Fayet G., Adamo C. *Physical Chemistry, Chemical Physics*, 2013, 15, pp. 10849-10858.
- [G] Gaussian 09, Revision A.1, Gaussian Inc., Wallingford CT, 2009.
- [H] Dechy N., Bourdeaux T., Ayrault N., Kordek M. A., Le Coze J. C. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 111, 131.
- [I] Paul J. M., Hecquet G., Mieloszynski J.-L. *L'actualité chimique*, 2004, 274, 10.
- [J] Cagnina S., Rotureau P., Adamo C. *Chemical Engineering Transaction*, 2013, 31, 823.



menant à la formation des produits comme  $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$ ,  $OH$ ,  $HNO$  et  $NO_2$ , déjà caractérisés dans les travaux expérimentaux, ont été identifiés.

Les chemins réactionnels modélisés peuvent être représentés sous la forme d'un diagramme énergétique **Figure 3** afin de visualiser les mécanismes réactionnels thermodynamiquement favorisés.

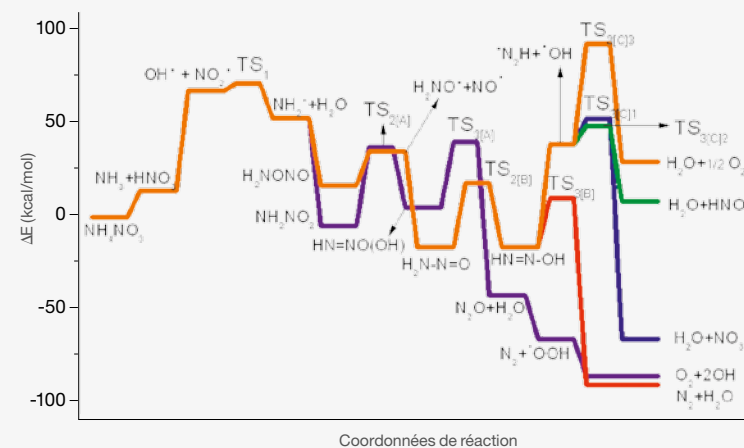
#### Conclusion et perspectives

Un mécanisme détaillé pour la décomposition du nitrate d'ammonium pur a été obtenu à l'aide de la modélisation moléculaire sur la base de calculs DFT. La même méthode est actuellement utilisée pour comprendre la réactivité du mélange NA/DCCNa (dichloroisocyanurate de sodium), qui est une des voies explorées dans l'accident de l'usine AZF de Toulouse en 2001 **[H]**.

Les travaux expérimentaux conduits jusqu'à maintenant ont mené à différentes hypothèses de réaction, mais aucune ne permet d'expliquer complètement l'accident, ni de comprendre les étapes importantes du mécanisme qui a provoqué cette explosion. Jusqu'à maintenant, l'hypothèse expérimentalement reconnue est celle de l'hydrolyse du DCCNa suivie de la réaction entre l'acide hypochloreux (HOCl) ainsi formé et du nitrate d'ammonium **[I, J]**. Couplée au calcul des constantes de vitesse des voies réactionnelles prépondérantes, une étude théorique permettra d'avoir une compré-

**Figure 3**

Diagramme énergétique de la décomposition du nitrate d'ammonium pur (Gaussian09).



hension plus approfondie de la réaction d'incompatibilité entre ces deux substances. L'objectif final est de développer des méthodes prédictives des incompatibilités chimiques entre substances.

#### Collaboration

Chimie ParisTech – Équipe de modélisation des systèmes complexes, *Canadian Explosive Research Laboratory* (CERL).

#### ABSTRACT

Although pure ammonium nitrate (AN) is generally used safely (as chemically relatively stable at normal temperature and pressure), significant accidents occurred causing a number of deaths and injuries as dramatically demonstrated by the Toulouse disaster in September 2001. Indeed, it is well known that when

ammonium nitrate is mixed with combustible materials, metals, acids, chlorides, sulfates and sodium dichloroisocyanurate, its explosive properties can be considerably increased. Despite its large use and its latent risk of accidental detonation under specific conditions, the decomposition mechanism of ammonium nitrate and its evolution in presence of contaminants are not yet unambiguously defined as many hypotheses remain. Complementary to experimental methods (such as Differential Scanning Calorimetry) which are commonly used to describe incompatibilities between

substances (in terms of energy release and temperature of decomposition), molecular modeling was used as a valuable and reliable tool to better understand the reactions involved in this process. In a first step, a study of all the available mechanisms of AN decomposition, in terms of structural and energetic characterization of reaction intermediates and products, was conducted at DFT (Density Functional Theory) level of theory.

## Contribution à l'amélioration de la méthode d'essai ONU N.5 relative à la caractérisation des solides qui dégagent des gaz inflammables au contact de l'eau

#### CONTRIBUTEURS



Agnès Janès



Guy Marlair



Douglas Carson



Jacques Chaineaux

La méthode d'essai ONU N.5 est destinée à déterminer si la réaction entre une substance et de l'eau conduit au dégagement d'une quantité dangereuse de gaz inflammable. Elle est applicable aux solides et aux liquides, dans leur forme commerciale et à température ambiante. Elle est définie dans les recommandations des Nations unies relatives au transport des marchandises dangereuses **[A]**. Cette épreuve constitue également la nouvelle référence européenne pour l'application du règlement CLP<sup>(1)</sup> permettant la classification dans la classe des « substances et mélanges qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables ».

L'expérience de la pratique de cette épreuve montre des difficultés d'ordre métrologique, source de nombreuses incertitudes. De plus, certains facteurs influents ne sont pas fixés par la méthode d'essai normalisée. L'enjeu est d'autant plus important que le règlement CLP introduit une mention de danger additionnelle, EUH029 – « au contact de l'eau, dégage des gaz toxiques » –, pour laquelle aucune méthode d'essai n'étant à ce jour définie, l'utilisation d'un protocole d'essai dérivé de la méthode ONU N.5 est envisagée pour justifier ou non l'application de cette mention.

L'étude expérimentale a consisté en une étude paramétrique du débit de dégagement d'hydrogène, mesuré au moyen d'un système volumétrique constitué de burettes remplies d'eau, lors de la mise en contact de poudres d'aluminium d'une part et de magnésium d'autre part.

#### Classification des substances émettant des gaz inflammables au contact de l'eau

Les trois premières étapes de la méthode d'essai sont destinées à mettre en évidence une éventuelle réaction violente entre le produit testé et l'eau, dans différentes conditions. Durant la quatrième étape, le volume de gaz dégagé est mesuré pendant sept heures. En fonction des résultats, la mesure peut être prolongée jusqu'à un maximum de cinq jours. Si le gaz dégagé est inconnu, il doit être soumis à un essai d'inflammabilité.

Une matière doit être classée dans la catégorie des solides dégageant des gaz inflammables au contact de l'eau du règlement CLP ou dans la classe 4.3 de la réglementation du transport de

marchandises dangereuses, ou si une inflammation spontanée est observée, ou encore si un dégagement de gaz inflammable à un débit supérieur à 1 L.kg-1.h-1 est mesuré **Figure 1**. En fonction du débit mesuré, le produit testé est affecté à l'un des trois groupes d'emballages dans le cas de la réglementation du transport de marchandises dangereuses ou à l'une des trois classes de danger définies dans le règlement CLP.

#### NOTE

**(1)** Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures.

**Figure 1**

Inflammation spontanée de l'hydrogène dégagé par de l'hydrure de magnésium au contact de l'eau, au cours de l'une des phases préliminaires de la méthode ONU N.5.







### Dispositif expérimental

Le montage comporte un erlenmeyer et une ampoule à décanter. La mesure du débit gazeux a été effectuée avec un système volumétrique à lecture manuelle (Figures 2 et 3).

Une revue bibliographique relative à l'hydroréactivité a permis de sélectionner des facteurs influents présumés sur l'intensité de la réaction entre un produit et l'eau : la masse de l'échantillon, la température du milieu réactionnel, le rapport massique poudre/eau, la nature du liquide (eau distillée, eau de mer, solutions d'hydroxyde de sodium, solution d'acide chlorhydrique), le volume de l'erlenmeyer et de l'ampoule à décanter.

39 essais ont été effectués avec la poudre d'aluminium (médiane 80 µm,) et 13 avec la poudre de magnésium (médiane 200 µm). Les réactions qui se produisent au cours de ces essais sont l'oxydation du métal par l'eau, pour former des oxydes métalliques.

### Proposition d'un protocole d'essai optimisé

Les résultats des essais ont permis d'évaluer l'incertitude relative du protocole d'essai actuel (liée au débit de gaz) à 45 % avec le système de mesure volumétrique utilisé.

Les paramètres influents devraient être fixés conformément au Tableau 1. Certains essais supplémentaires sont préconisés, en fonction des conditions de stockage ou de transport.

Il est nécessaire d'effectuer au moins un essai préliminaire afin de s'assurer de l'absence de risque lors de l'essai avec 10 g de produit.

### Conclusion et perspectives

Cette étude confirme que l'application de la méthode d'essai ONU N.5 conduit à des résultats très dépendants des paramètres étudiés. Ceci est une source d'incertitude non négligeable. En effet, dans les cas défavorables, l'erreur est du même ordre de grandeur que le seuil de classification.

Les essais effectués au cours de cette étude ont permis de proposer un protocole d'essai optimisé, destiné à réduire les incertitudes de mesure. Ces travaux ont par ailleurs fait l'objet d'une présentation auprès des sous-comités d'experts (ONU, GHS) en charge de faire évoluer les réglementations concernées.

### Références

[A] Manuel ONU d'épreuves et de critères, 4<sup>e</sup> édition, réf. ST/SG/AC.10/11/Rev.4.

Janès A., Marlair G., Carson D., Chaineaux J. Towards the improvement of UN N.5 test

method relevant 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.

### ABSTRACT

A sensitivity analysis of main parameters affecting the measurement of the gas flowrate emitted during testing substances which emit flammable gases where in contact with water, according to UN N.5 test, was performed. Ambient temperature,

overall volume of glassware, nature of aqueous media, mass sample and sample-to-liquid mass ratio are not fixed in this procedure. This test is described in the Manual of Tests and Criteria of UN [A]; serving both application of international transport regulations as well as classification of substances according to the EU "CLP" Regulation. The main reason that justifies this research is that the measurement of emitted gases is highly critical in the final classification resulting

from the interpretation of the test results. Moreover, that idea has been raised to adapt the UN N.5 test protocol for classifying substances that by contact with water would emit toxic gases. Results confirm that these parameters may play a significant role and alter the final classification resulting from the testing. Guiding principles have also been derived from our measurements and observations towards an improved and more robust UN test protocol in the future.

Tableau 1

Proposition d'un protocole d'essai optimisé.

| Essais à réaliser  | Conditions de réalisation   |
|--|---|
| 10 g de produit et 20 ml d'eau distillée<br>Erlenmeyer de 100 ml et ampoule de 25 ml<br>Température ambiante entre 18 et 22 °C             | Standard<br>Essai de classification (règlement CLP et réglementation TMD)   |
| 10 g de produit et 20 ml d'eau distillée<br>Erlenmeyer de 100 ml et ampoule de 25 ml<br>Température fixée par bain thermostaté à 40 °C     | Transport en vrac<br>Évaluation du danger en cas d'auto-échauffement  |
| 10 g de produit et 20 ml d'eau de mer<br>Erlenmeyer de 100 ml et ampoule de 25 ml<br>Température fixée par bain thermostaté à 40 °C        | Transport maritime<br>Évaluation du danger en cas de contact avec l'eau de mer  |
| 10 g de produit et 20 ml de solution acide<br>Erlenmeyer de 100 ml et ampoule de 25 ml<br>Température fixée par bain thermostaté à 40 °C   | Possibilité d'atteinte de la couche de passivation ou du coating<br>Évaluation du danger en cas de destruction de la couche protectrice ou passivée |
| 10 g de produit et 20 ml de solution basique<br>Erlenmeyer de 100 ml et ampoule de 25 ml<br>Température fixée par bain thermostaté à 40 °C |   |

Figure 2

Schéma du montage expérimental.

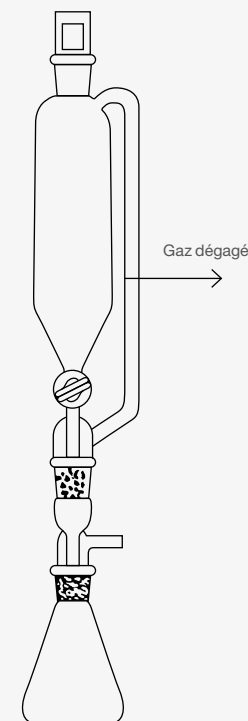
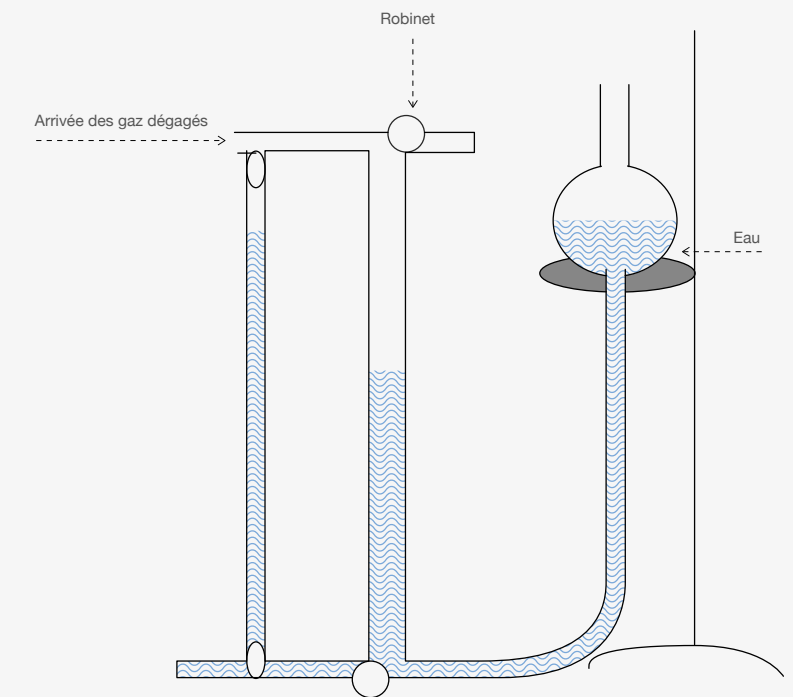


Figure 3

Schéma du système de mesure volumétrique.





# Génotoxicité et perturbation de la reproduction chez l'épinoche à trois épines

CONTRIBUTEUR



Wilfried Sanchez

De nombreux polluants environnementaux peuvent altérer la structure de l'ADN ou les composants cellulaires assurant la transmission d'un génome fidèlement similaire. Malgré l'existence de systèmes de réparation des altérations génotoxiques, des mutations délétères peuvent survenir. Si des phénomènes de cancérisation sont observables au niveau individuel lorsque des cellules somatiques sont atteintes, des perturbations peuvent s'exprimer de façon transgénérationnelle lorsque c'est l'ADN des cellules germinales qui est altéré [A]. L'existence d'une pression génotoxique pourrait alors être un élément explicatif des perturbations de la structure des peuplements piscicoles, voire du déclin de certaines espèces. Afin d'évaluer cette hypothèse, l'INERIS et l'UMR 5023 de l'Université de Lyon ont initié des travaux visant à évaluer le lien entre l'altération de l'ADN des cellules germinales et les perturbations de la descendance chez l'épinoche à trois épines, un poisson utilisé comme modèle à l'INERIS pour le développement des biomarqueurs [B]. Des expérimentations basées sur des essais *ex vivo* sur des

spermatozoïdes, des essais *in vivo* sur des épinoches exposées, en laboratoire, au méthanesulfonate de méthyl (MMS), un génotoxique de référence, et des essais *in situ* sur des poissons collectés dans différents cours d'eau ont été mises en œuvre. Chacune de ces expérimentations a associé la mesure des dommages à l'ADN par le test des comètes et le suivi de la descendance obtenue par des fécondations *in vitro*.

## Première preuve obtenue *ex vivo*

Afin d'évaluer l'existence d'un lien entre l'endommagement de l'ADN spermatique et la qualité de la descendance, une première expérimentation a été réalisée *ex vivo* [C]. Des spermatozoïdes d'épinoche ont été collectés, puis exposés pendant une heure à différentes concentrations de MMS (*i.e.* 2, 3, 4 et 5  $\mu\text{M}$ ). Une fraction de l'échantillon a alors été utilisée pour déterminer le niveau d'endommagement de l'ADN induit par cette exposition, alors que l'autre fraction a été utilisée pour féconder *in vitro* des ovocytes d'épinoches non exposées. Les résultats obtenus montrent un endommagement de l'ADN proportionnel à la concentration d'exposition, avec une augmentation des dommages d'un facteur 3 entre les groupes contrôles et ceux exposés à 5  $\mu\text{M}$ . Parallèlement, le taux d'anomalies embryolaryvaires (par exemple: œdèmes, cyphose, lordose, Figure 1) augmente en fonction de la concentration testée, passant de 10% chez les poissons contrôles à plus de 75% chez les poissons issus de spermatozoïdes exposés à 5  $\mu\text{M}$ . Cette première expérimentation démontre, chez l'épinoche, la pertinence d'évaluer le lien existant entre l'intégrité du génome des gamètes et la qualité de la descendance.

## Confirmation *in vivo* au laboratoire

Une seconde expérimentation a été réalisée dans des conditions plus réalistes d'un point de vue biologique en exposant des épinoches mâles et/ou femelles en période de reproduction, à différentes concentrations de MMS (*i.e.* 0,05, 0,5 et 5  $\mu\text{M}$ ) sur une période comprise entre 18 et 58 jours [D]. Lorsque les poissons atteignent leur maturité, les cellules germinales (spermatozoïdes ou ovocytes) sont collectées et utilisées pour réaliser une fécondation *in vitro* et mesurer le niveau d'endommagement de l'ADN des spermatozoïdes. Un endommagement de l'ADN spermatique proportionnel à la concentration et au

Figure 1

Anomalies morphologiques identifiées chez des larves d'épinoches à trois épines. De haut en bas: larve témoin, larve présentant une anomalie squelettique, larve présentant des œdèmes.

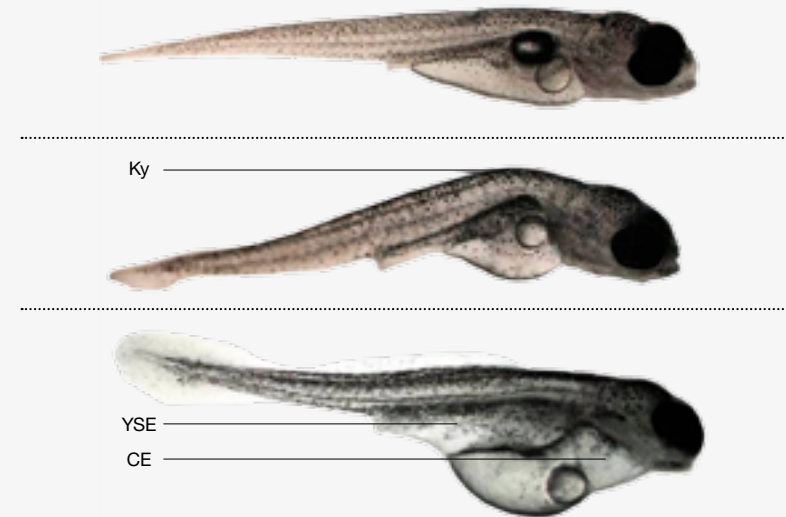
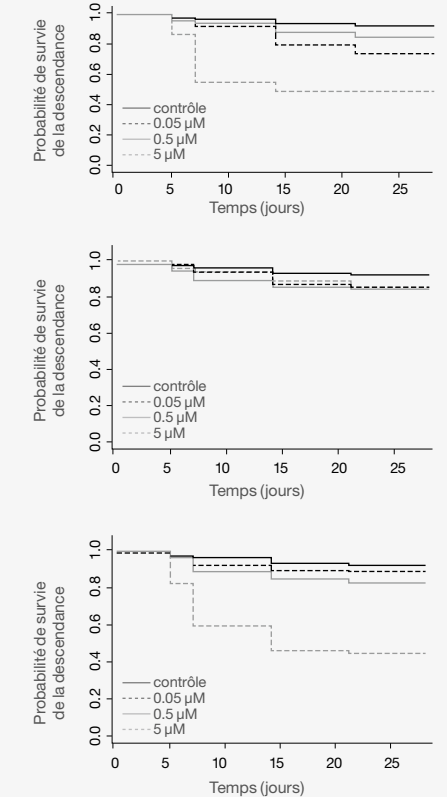


Figure 2

Courbes de survie de Kaplan-Meier présentant la probabilité de survie des larves d'épinoches issues de parents exposés ou non au MMS. De haut en bas: mâle exposé et femelle non exposée, mâle non exposé et femelle exposée, mâle et femelle exposés.



temps d'exposition des organismes est mis en évidence parallèlement à une diminution de la probabilité de survie des larves issues de parents exposés au MMS. Cette expérimentation permet, de plus, d'investiguer plus précisément la part de chaque géniteur dans les altérations de la descendance et montre que les altérations de l'ADN spermatiques jouent un rôle majeur dans la transmission d'aberrations génétiques Figure 2. Ce résultat confirme l'existence d'un lien entre endommagement génotoxique au niveau des gamètes et perturbation de la descendance, et alimente un faisceau de preuves obtenu chez différentes espèces [E, F].

## Une pertinence environnementale à évaluer

Les résultats acquis au laboratoire confirment l'existence d'un lien entre l'exposition à des molécules génotoxiques et les

altérations de la descendance, qui pourrait expliquer les perturbations populationnelles observées dans certains cours d'eau. La pertinence environnementale de cette hypothèse reste encore à évaluer dans des contextes de contamination environnementalement pertinents. Des premiers travaux ont été menés dans ce sens en utilisant des épinoches collectées dans plusieurs cours d'eau et tendent à montrer *in situ* l'existence de ce lien chez des poissons autochtones de cours d'eau soumis à un stress génotoxique [G]. Ce travail doit désormais se poursuivre afin de confirmer la pertinence écologique de cette relation. Pour ce faire, des polluants environnementaux génotoxiques pourraient être utilisés en remplacement du MMS. De même, l'utilisation des mésocosmes permettrait d'allier réalisme écologique et maîtrise de l'exposition, et ainsi de mieux identifier une éventuelle relation.

## Références

- [A] Devaux A., Fiat L., Gillet C. *et al.* Reproduction impairment following paternal genotoxin exposure in brown trout (*Salmo trutta*) and Arctic charr (*Salvelinus alpinus*). *Aquatic Toxicology*, 2011, 101, pp. 405-411.
- [B] Sanchez W., Katsiadaki I., Piccini B. *et al.* Biomarker responses in wild three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.) as a useful tool for freshwater biomonitoring: A multiparametric approach. *Environment International*, 2008, 34, pp. 490-498.
- [C] Santos R., Palos-Ladeira M., Besnard A. *et al.* Relationship between DNA damage in sperm after *ex vivo* exposure and abnormal embryo development in the progeny of the three-spined stickleback. *Reproductive Toxicology*, 2012, 36, pp. 6-11.
- [D] Santos R., Palos-Ladeira M., Besnard A. *et al.* Parental exposure to methyl methane sulfonate of three-spined stickleback: contribution of DNA damage in male and female germ cells to further development impairment in progeny. *Ecotoxicology*, 2013, 22, pp. 815-824.
- [E] Lacaze E., Geffard O., Goyet D. *et al.* Linking genotoxic responses in *Gammarus fossarum* germ cells with reproduction impairment, using the Comet assay. *Environmental Research*, 2011, 111, pp. 626-634.
- [F] Lewis C., Galloway T. *Reproductive consequences of paternal genotoxin exposure in marine invertebrates*. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43, pp. 928-933.
- [G] Santos R. *Un biomarqueur de génotoxicité chez l'épinoche (Gasterosteus aculeatus): application au biomonitoring et étude de sa valeur prédictive en écotoxicologie*. Thèse de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon, spécialité Environnement industriel et urbain, 2013, p. 224.

## ABSTRACT

Many environmental pollutants are genotoxicants and can induce genetic damages in wild organisms. If genetic damage occurs in somatic cells, deleterious effects are restricted to the exposed organisms but when

it affects germ cells, it may increase the risk of progeny defects as clearly pointed out in humans and aquatic species. Hence, identification of genetic risks related to environmental genotoxicants is a crucial point. In this context, INERIS and the UMR 5023 of the University of Lyon investigate the relationship between DNA damage of germ cells and progeny survival or development abnormalities. For this purpose, the three-spined stickleback is used as model fish

species. *Ex vivo* and *in vivo* experiments highlight that exposure to MMS, a model genotoxicant, affects significantly sperm DNA integrity and increases mortality during embryo-larval stages and abnormality rate at hatching. Field studies were also performed to address this relationship in wild sticklebacks but further studies are needed to confirm the ecological relevance of this hypothesis.





## Modélisation de la perturbation de la synthèse des hormones ovariennes par les produits chimiques chez les mammifères

Ces dernières années, des études épidémiologiques menées dans différents pays ont montré une augmentation d'incidence de certaines affections, telles que des altérations des fonctions de reproduction et des cancers hormono-dépendants. Le rôle des hormones stéroïdes sexuelles dans ce type d'affection est établi depuis longtemps par l'étude de modèles animaux. Par ailleurs, certains produits chimiques, dits perturbateurs endocriniens (PE), sont capables d'interférer avec la synthèse de ces hormones et affectent expérimentalement la capacité de reproduction des animaux. Il est donc important de pouvoir prédire, avant toute exposition humaine, la capacité des produits chimiques à perturber les cycles hormonaux naturels. Cependant, les tests *in vitro* – rapides et dispensant de l'expérimentation animale – ne sont pas capables de mimer la complexité des régulations hormonales *in vivo*. C'est pourquoi l'INERIS, dans le cadre d'une thèse menée par Nadia Quignot [A], s'est intéressé dans une première étape au couplage de modèles mathématiques et de l'expérimentation *in vitro* pour la prédiction des effets de PE sur un mammifère, le rat. Les modèles sont censés tenir ici le rôle intégrateur que les relations entre cellules, tissus et organes jouent dans le corps entier. Ces modèles doivent donc être capables de simuler la réponse d'un organe ou d'une fonction (ici la synthèse d'hormones stéroïdes) sur la base des perturbations observées *in vitro* au niveau de simples cellules. Aux États-Unis, l'EPA (*Environmental Protection Agency*) a mis en place un programme de recherche similaire sur le poisson pour prédire les effets des PE sur les écosystèmes aquatiques.

### Références

[A] *Perturbateurs endocriniens et déséquilibre de la balance androgènes/œstrogènes: évaluation intégrée*. Thèse de doctorat, Université Paris V, soutenance le 5 décembre 2011.

Quignot N, Bois FY. *A Computational Model to Predict Rat Ovarian Steroid Secretion from In Vitro Experiments with Endocrine Disruptors*. Plos One, 2013, 8(1): e53891, doi:10.1371/journal.pone.0053891.

CONTRIBUTEUR



Frédéric Bois

### Modéliser l'impact de substances à activité PE

L'objectif précis de l'étude menée par l'INERIS était donc de modéliser l'impact de substances à activité PE sur la balance hormonale régulée par deux enzymes: le cytochrome P450 aromatasé et la 17 $\beta$ -hydroxystéroïde déshydrogénase, afin de mettre en place un outil prédictif.

Expérimentalement, nous avons d'abord quantifié la stéroïdogénèse après traitement *in vitro* de cellules ovariennes de la granulosa de rats par des PE (atrazine, bisphénol A, méthoxychlor, vinclozoline et létrozole). Les effets de l'administration de ces mêmes produits sur l'animal entier adulte ont aussi été observés. Les mêmes biomarqueurs (analyse d'expression de gènes par RT-qPCR et analyse d'activité enzymatique) ont été suivis *in vitro* et *in vivo*. *In vivo*, différents effets physiopathologiques ont été enregistrés après exposition aux PE (poids relatifs d'organes dits «hormono-dépendants», détermination de la cyclicité œstrale).

Un modèle mathématique mécaniste, de type biologie systémique, a été développé pour simuler les dernières étapes de la stéroïdogénèse dans les cellules de la granulosa de l'ovaire, *in vitro* ou *in vivo*, en présence de stéroïdes précurseurs ou de produits PE. Pour transposer le modèle à l'ovaire entier et tenir compte des cycles hormonaux, un modèle physiologique simplifié de l'ovaire a été couplé au précédent. Les équations différentielles correspondant à ces modèles ont été résolues à l'aide du logiciel GNU MCSim. Les paramètres du modèle *in vitro* ont été calibrés par une méthode numérique bayésienne avec le même logiciel.

Les résultats de prédiction du cycle de l'œstrone et de l'œstradiol par le modèle calibré sont tout à fait satisfaisants (Figure 1). Pilotée par les cycles d'hormone folliculo-stimulante (FSH), l'androstènedione et la testostérone, la production des hormones œstrogéniques, qui conditionnent la fertilité de l'animal, est bien simulée qualitativement et quantitativement. L'objectif principal du couplage modèle mathématique-observations *in vitro* est de prédire les perturbations du cycle hormonal chez l'animal suite à l'exposition à un produit PE. La Figure 2 compare les prédictions obtenues par le modèle mathématique avec nos données expérimentales obtenues sur l'animal entier. La comparaison est faite à un seul temps du cycle pour la rendre plus lisible. Les altérations constatées chez

l'animal suite à l'exposition à l'atrazine et au létrozole sont bien prédites par le modèle. Il faut insister sur le fait que, ici, aucun ajustement du modèle n'a été fait à ces données *in vivo*. Il s'agit de pures prédictions, comme ce serait le cas pour des substances nouvelles. Ce traitement statistique du modèle permet d'avoir une idée de la précision des prédictions obtenues.

### Conclusion

Cette recherche aboutit au développement d'un outil prédictif de la perturbation du cycle hormonal, et donc potentiellement de la fertilité, chez un mammifère. Le détour par le rat était une étape obligée de la validation scientifique du modèle, car il n'existe pas de données expérimentales humaines. Le but ultime serait de développer cet outil pour prédire les effets chez la femme, en se passant complètement d'expérimentations animales. Ce modèle permet d'intégrer des mesures de transcriptomique (mRNA), de protéomique (concentrations d'enzymes) ou de métabolomique (hormones) faites sur cellules *in vitro*, et de les transposer à l'organisme entier. Cependant, pour le moment, il ne permet que de prédire des altérations se produisant rapidement après l'exposition. Pour pouvoir prédire l'effet d'expositions répétées sur plusieurs cycles, il vaudrait mieux décrire les rétrocontrôles se produisant au niveau du système nerveux central. En tout cas, il s'agit d'une étape importante pour la prédiction des effets des perturbateurs endocriniens sur la capacité de reproduction des personnes exposées à de tels produits.

Figure 1

Simulation par le modèle du cycle hormonal chez le rat femelle adulte. Les cercles pleins correspondent aux moyennes arithmétiques avec écart-type des valeurs expérimentales, les courbes correspondent aux prédictions moyennes du modèle mathématique, avec en grisé la distribution des prédictions.

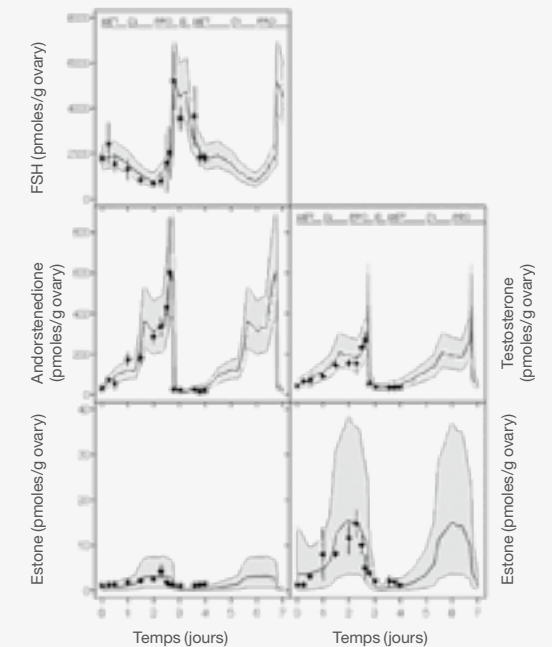
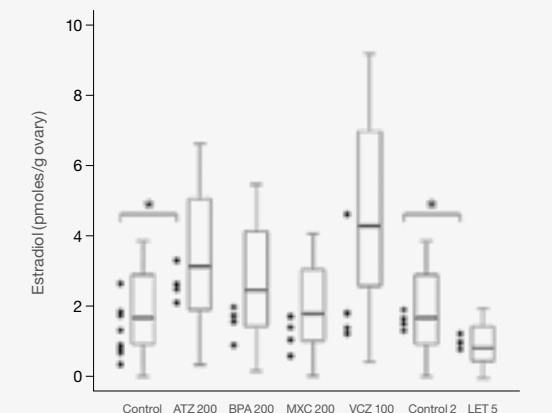


Figure 2

Prédictions (barres verticales) des effets de l'atrazine (ATZ), du bisphénol A (BPA), du méthoxychlor (MTX), de la vinclozoline (VCZ), ou du létrozole (LET) sur la production d'œstradiol, 8 heures après l'œstrus (le deuxième contrôle, non traité, est propre au létrozole). Les barres reflètent l'incertitude sur les prédictions. Les données expérimentales sont représentées par des points.



### ABSTRACT

A finely tuned balance between estrogens and androgens controls reproductive functions, and the last step of steroidogenesis plays a key role in maintaining that balance. We know by now that some environmental

contaminants may have endocrine disrupting effects. Interfering with steroidogenic enzymes, for example, may influence steroid secretion and thus lead to reproductive toxicity. Yet, predictions of such toxic effects on the basis of *in vitro* data are a challenge, because the complexity of the endocrine system is not yet captured by *in vitro* assay systems. To predict hormonal balance disruption on the basis of data on aromatase activity and mRNA level modulation obtained

*in vitro* on granulosa cells, we developed a mathematical model for the last gonadal steps of the sex steroid synthesis pathway. The model can simulate the ovarian synthesis and secretion of estrone, estradiol, androstenedione, and testosterone, and their response to endocrine disruption. The model was shown to correctly predict ovarian estradiol concentrations after exposure of female rats to atrazine and letrozole.



## Améliorer les connaissances sur le devenir et les effets des médicaments dans l'environnement

### Références

- [A] Heberer T., J. Hydrol. 266, 2002, pp. 175-189.
- [B] Oaks J.L. et al. Nature 427, 2004, p. 630.
- [C] Kidd K.A. et al. PNAS 2007, 104 (21), pp. 8897-8901.
- [D] Cosnefroy A. et al. Toxicological Sciences, 2012, 125(2), pp. 439-449.
- [E] Tong S.K. et al. Genesis, 2009, 47 (2), pp. 67-73.
- [F] Brion F. et al. PLoS One, 2012, 7(5), e36069.
- [G] Hinfray N. et al. Endocrinology, 2011, 174 (3), pp. 309-317.
- [H] Baudiffier D. et al. Toxicology, 2012, 298, pp. 30-39.
- [I] Hinfray N. et al. Environmental Toxicology, 2006, 21 (4), pp. 332-337.
- [J] Bellet V. et al. Water Research, 2012, 46 (6), pp. 1912-1922.
- [K] Creusot N. et al. 22nd Setac Europe Annual Meeting «Securing a sustainable future: integrating science, policy and people», 20-24 may 2012, Berlin.
- [L] Sanchez W. et al. Environment International, 2011, 37 (8), pp. 1342-1348.

Parmi les substances émergentes, il est maintenant admis que les substances actives pharmaceutiques et leurs métabolites sont impliqués dans la contamination des masses d'eau. Les premières publications démontrant leur présence dans les milieux aquatiques datent des années quatre-vingt. Depuis, avec les progrès de l'analyse physico-chimique, la présence de nombreuses classes de médicaments a été mise en évidence dans l'environnement, comme les contraceptifs, les bêtabloquants, les antiépileptiques, les anti-inflammatoires, les antibiotiques, à des concentrations allant du ng/L au µg/L dans les eaux de surface ou souterraines [A]. Plusieurs sources de contamination sont clairement identifiées incluant les rejets des stations d'épuration urbaines, des établissements de soins, des élevages ainsi que des établissements industriels [Figure 1]. Dans les écosystèmes aquatiques, ces substances chimiques induisent des effets sur les espèces autochtones en interagissant avec des processus physiologiques variés, comme la synthèse des hormones, la reproduction ou les mécanismes de défense contre le stress oxydant. Des études récentes montrent que des expositions chroniques à différents principes actifs sont susceptibles d'affecter les populations. On peut citer par exemple les impacts du diclofénac sur la population de vautours en Inde [B] ou de l'éthinylestradiol sur le vairon tête de boule [C]. Les connaissances scientifiques sur ce sujet restent toutefois parcellaires devant la diversité des molécules et de leurs mécanismes d'action. Face aux préoccupations grandissantes autour de la contamination des milieux par les médicaments et des effets associés, les ministères en charge de l'écologie et de la santé ont mis en place un plan d'action sur les résidus de médicaments dans l'eau. L'un des objectifs de ce dernier est d'approfondir les connaissances sur le devenir et les effets des médicaments dans l'environnement afin d'améliorer l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux de ces molécules. L'INERIS s'est engagé dans cette thématique à travers un certain nombre d'études à différents niveaux d'organisation biologique allant de l'étude du mécanisme d'action des substances sur des organismes non-cibles jusqu'à des études d'impact de rejets industriels sur les populations de poissons.

CONTRIBUTEUR



Jean-Marc Porcher

### Caractérisation *in vitro/in vivo* des substances pharmaceutiques sur le système endocrinien

L'établissement de modèles *in vitro* avec gène rapporteur dans des lignées poisson comme la lignée ZFL (lignée dérivée d'hépatocytes de poisson zèbre) offre un outil de choix pour cribler et étudier l'activité de polluants chimiques sur les récepteurs nucléaires stéroïdiens dans le contexte cellulaire spécifique du poisson zèbre. L'intérêt de ce modèle a précédemment été montré à travers l'étude de l'activation sélective des récepteurs des œstrogènes de poisson zèbre (zFER) par des ligands chimiques dans différentes lignées exprimant le gène rapporteur luciférase sous contrôle des différents sous-types de zFER [D]. L'INERIS, en collaboration avec l'équipe de P. Balaguer (Inserm U896, Montpellier), envisage de développer plus avant le modèle ZFL afin de disposer d'un ensemble cohérent de lignées « gène rapporteur » exprimant des récepteurs de poisson. Une fois établis, ces nouveaux modèles *in vitro* seront validés avec un panel de substances de référence et d'échantillons environnementaux afin d'évaluer leur application potentielle, d'une part, pour le criblage de molécules dans un contexte réglementaire (*i.e.* en lien avec les lignes directrices de l'OCDE sur l'évaluation des perturbateurs endocriniens) et, d'autre part, pour la détection dans l'environnement de molécules actives sur ces récepteurs. À l'aide de la lignée de poisson zèbre transgénique cyp19a1b-GFP, développée et caractérisée en partenariat avec l'université de Taiwan et l'Irset<sup>(1)</sup> [E], l'INERIS a mis au point un test sur embryon basé sur l'activation de la GFP sous le contrôle du promoteur du gène cyp19a1b strictement ER-régulé. Ce test rapide, sensible et spécifique, qui permet de détecter *in vivo* l'activation du gène de l'aromatase dans le cerveau des poissons au cours de leur développement, réagit à un large panel de ligands [F]. Ce test sur embryon est utilisé pour caractériser le potentiel perturbateur endocrinien de polluants aquatiques émergents. Parmi eux, un projet spécifique a été engagé dans le cadre du programme ANR-Contaminants environnement et santé (ANR PROOFS, coordinateur F. Brion) sur les progestatifs de synthèse. Outre le gène de l'aromatase B, l'Institut a d'ores et déjà démontré que d'autres gènes cibles de la stéroïdogénèse, impliqués dans la biosynthèse des androgènes et des œstrogènes gona-

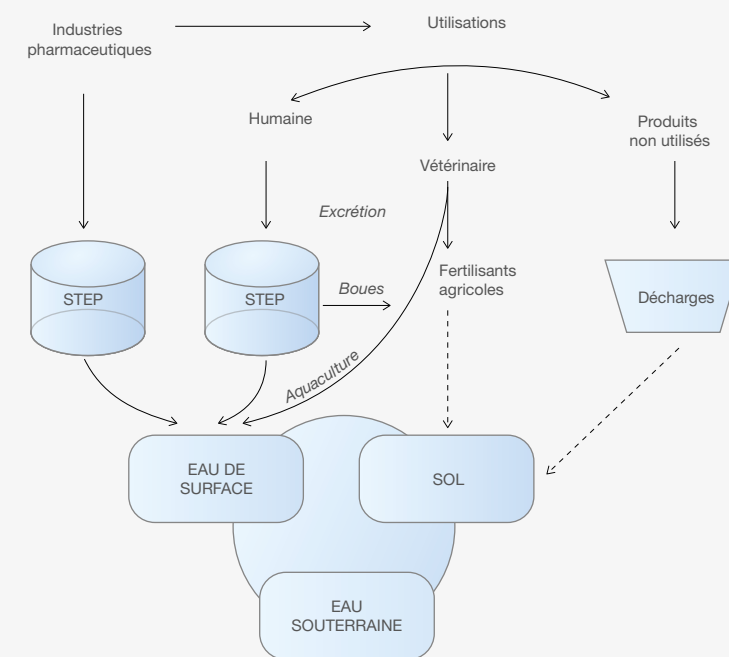
diques, étaient des cibles moléculaires de composés PE. C'est le cas des gènes cyp17a1 [G], cyp11c1 [H] ou cyp19a1a [I]. À ce jour, trois lignées de poissons zèbres exprimant des rapporteurs fluorescents respectivement sous le contrôle du promoteur du gène cyp11c1, cyp17a1 et cyp19a1a ont été développées et sont en cours de caractérisation afin de déterminer dans quelle mesure ces lignées peuvent être utilisées pour étudier l'impact de composés chimiques, dont certains pharmaceutiques. Au cours de l'année 2013, deux lignées exprimant la GFP sous le contrôle du promoteur cyp17a1 et sous le contrôle du gène gsdf (un gène régulé par les androgènes) devraient être construites. À terme, l'INERIS devrait disposer de cinq lignées complémentaires de poissons zèbres transgéniques. Les effets des médicaments mis en évidence sur des organismes modèles dans le cadre d'étude de recherche ou de procédures d'évaluation des substances médicamenteuses peuvent être confrontés aux effets évalués sur des organismes non modèles dans des conditions plus réalistes d'exposition. C'est l'un des objectifs du programme DOREMIPHARM financé par l'Agence nationale de sécurité du médicament, qui vise à évaluer, en laboratoire mais également en mésocosmes, les effets de molécules médicamenteuses préoccupantes vis-à-vis de différentes fonctions physiologiques (*i.e.* reproduction, gestion de l'énergie, immunité, transmission de l'information), chez l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*) et la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*).

### Comprendre la contamination des milieux et ses effets

Parallèlement, les bio-essais développés initialement dans le cadre de l'évaluation du danger des substances (lignées cellulaires et lignées de poissons transgéniques) sont intégrés dans une démarche bioanalytique en couplage avec des outils physicochimiques, dans un contexte de biosurveillance des milieux aquatiques. Un axe important de développement concerne l'utilisation de ces bio-essais dans une démarche EDA et pour la détection de composés perturbateurs endocriniens sur des extraits organiques issus de matrices environnementales complexes (sédiments, extraits de POCIS) (programmes européens EDA-EMERGE et SOLUTIONS). L'implication de l'INERIS dans différents projets collaboratifs lui a permis d'appliquer ses outils et sa démarche dans différents contextes environnementaux: caractérisation de l'état de contamination de différents sites et stations d'épurations urbaines (P190-ECOPI), efficacité de traitements tertiaires et de stations pilotes pour le traitement d'eaux usées (ANR-ECOTECH ECHIBIOTEB, ANR-CD21 PANACEE), effet du rayonnement UV et solaire sur la contamination d'effluents (Anses-TOXSTEP). Parmi les résultats significatifs issus de ces projets, notons l'identification de nouveaux types de PE tels que les androgènes dans des stations d'épuration urbaines [J] ou encore des stéroïdes synthétiques dans une rivière en aval d'un rejet industriel [K]. Suite à la mise en évidence d'effets de type perturbateurs endocriniens chez des poissons vivants dans un cours d'eau recevant les effluents d'un établissement impliqué dans la fabrication de matières premières pharmaceutiques [L], une

Figure 1

Sources potentielles de contamination des milieux par des substances pharmaceutiques.



action a été initiée afin d'évaluer les impacts potentiels autour d'autres sites industriels. Les campagnes d'échantillonnages réalisées dans ce contexte ont mis en évidence des effets biochimiques ou histologiques en adéquation avec l'activité des sites étudiés. Cette étude se poursuit afin de proposer, *in fine*, une stratégie de surveillance des effluents intégrant une dimension relative aux effets biologiques.

### Conclusion

Les résultats obtenus par l'INERIS et ses partenaires contribuent à une meilleure identification des dangers liés aux substances médicamenteuses et pourront ainsi nourrir les travaux qui seront menés au niveau européen pour la mise en œuvre d'une approche stratégique de la pollution de l'eau par les produits pharmaceutiques.

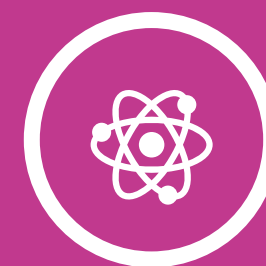
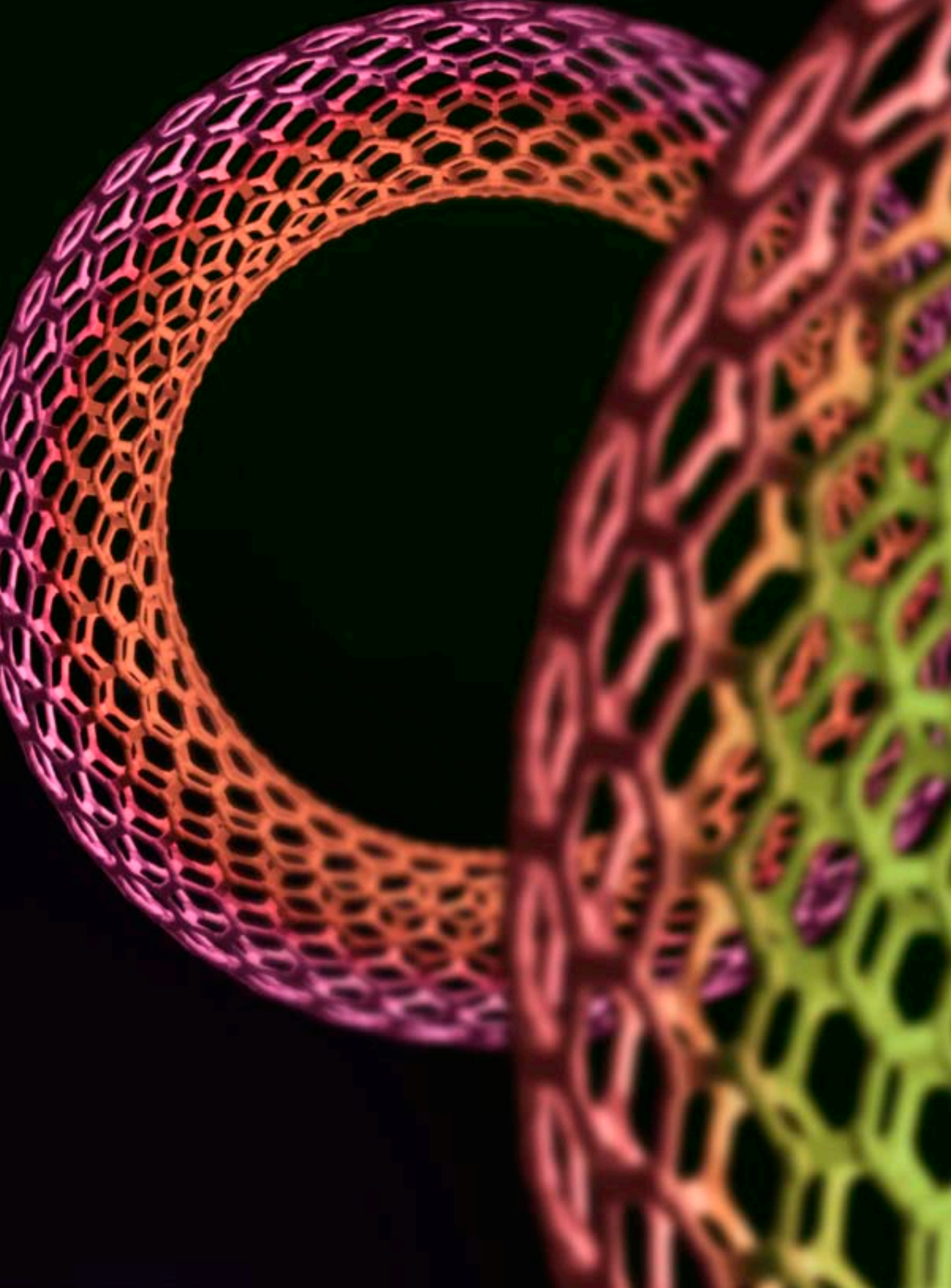
### ABSTRACT

Recently, considerable interest has developed regarding the presence of pharmaceuticals in the environment, but so far the potential ecological effects associated with the presence of these compounds have been largely ignored. The information available on the ecotoxicology of these compounds is weak, and traditional endpoints in current test regimes do not capture the typical mode of action of these biologically active substances. INERIS Risk Chronic Division is engaged in this area through different programs from mechanistic studies of the mode of action of certain class of contaminants to evaluation of the impact of industrial effluents to the ecosystem, especially fish populations.

### NOTE

1. Institut de recherche sur la santé, l'environnement et le travail.





## NANOTECHNOLOGIES

**38** Développer des outils de métrologie innovants basés sur des diagnostics laser

---

**40 FOCUS.** La sécurité incluse dans les nano-objets dès leur conception: *Nanosafety by design*

---

**41** Effet d'une exposition répétée au dioxyde d'azote et/ou à des nanoparticules de carbone sur la fonction pulmonaire, la réactivité bronchique et l'inflammation chez le rat sensibilisé à l'ovalbumine

---

**43 FOCUS.** Preuves expérimentales de la présence de colloïdes et nanoparticules dans 25 lixiviats de déchets

---

**44** Les chambres d'émission, un outil innovant pour étudier les sources de particules

---



# Développer des outils de métrologie innovants basés sur des diagnostics laser

CONTRIBUTEUR



Christophe Dutouquet

Les nanotechnologies sont présentées comme l'industrie du XXI<sup>e</sup> siècle. Les matériaux nanostructurés sont le plus souvent élaborés à partir de briques élémentaires que sont les nanoparticules manufacturées. Cette nanostructuration confère à ces matériaux des propriétés inédites d'un très grand intérêt pour de nombreuses applications industrielles. La production de nanoparticules manufacturées est donc appelée à croître. Les besoins en nanométrie (*in situ* et si possible en temps réel) devraient donc s'accroître en conséquence pour répondre à des problématiques de surveillance des ambiances de travail et de contrôle des procédés.

## Développer une métrologie innovante

Dans ce contexte, des travaux ont été engagés par l'INERIS dans le cadre du programme ANR NANOCARA (caractérisation globale en ligne des nanoparticules produites par des procédés en phase gazeuse). L'objectif de ce projet était de développer des outils de métrologie innovants basés sur des diagnostics laser. Ces développements doivent permettre, à terme, le suivi en ligne et en temps réel sur site de la taille, de la morphologie, de la concentration et de la composition chimique élémentaire de nanoparticules, de leurs agrégats et agglomérats. Dans ce cadre, des expériences préliminaires couplant la technique LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) avec une cellule plasma RF (radiofréquence) à basse

pression visant à identifier la composition chimique élémentaire de particules composites et, plus tard, leur stoechiométrie, ont été réalisées par l'INERIS en partenariat avec le laboratoire Gremi (Groupe de recherche sur l'énergétique des milieux ionisés) et la compagnie Cilas (Compagnie industrielle des lasers).

## Les techniques LIBS et plasma radiofréquence à basse pression

Les instruments LIBS et cellule plasma RF sont présentés sur les Figures 1 et 2. La technique LIBS consiste à focaliser un faisceau laser impulsif sur un échantillon à analyser [A, B, C]. Au point de focalisation, la matière est très fortement chauffée, provoquant l'allumage d'un plasma transitoire très chaud avec une température initiale des électrons et du gaz d'environ 15000 K 1 µs après son allumage puis un refroidissement en quelques dizaines de microsecondes dans l'air à pression atmosphérique. La lumière émise par ce dernier peut être analysée par spectroscopie d'émission. Tous les éléments chimiques présents dans le matériau sondé peuvent être identifiés dans une large gamme de pression, et leurs concentrations respectives déterminées.

La cellule plasma RF cubique d'environ 10 cm de côté contient deux électrodes en forme de disques de 6 cm de diamètre écartés d'une distance de 5 cm et reliés à un générateur radiofréquence (13,56 MHz). Elle est pourvue de quatre visées optiques pour les diagnostics laser. Un gaz est introduit en flux dans la cellule à pression réduite (1 mbar). Lorsque le générateur est activé, il se crée un plasma froid continu et stable avec des électrons très chauds (> 15000 K) alors que le gaz reste à température ambiante. Lorsque des particules sont injectées dans ce type de plasma, elles présentent la propriété d'y être piégées en lévitation [D].

## Les résultats

Des agglomérats de SiC<sub>x</sub> et des particules d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de tailles respectives d'environ 1 et 0,35 µm ont été introduites dans la cellule plasma RF sous air. Les particules piégées sont irradiées par des impulsions laser nanosecondes très énergétiques conduisant à la création d'un microplasma ayant permis d'identifier les éléments Al et Si. Les résultats obtenus

ont occasionné un dépôt de brevet [E]. Les éléments C et O n'ont pas été détectés, mais la faisabilité a été démontrée [F]. L'évolution temporelle du microplasma ainsi que sa température ont pu être évaluées [Figure 3]. La durée de vie de celui-ci est très courte du fait de l'expansion de la matière vaporisée à pression réduite, soit quelques microsecondes. Sa température 100 ns après le tir laser a été évaluée à quelques milliers de kelvins tout au plus en raison de la présence de raies moléculaire de N<sub>2</sub><sup>+</sup>. C'est environ trois à cinq fois moins qu'à pression atmosphérique. Ainsi, l'analyse n'est pas réalisée sur un flux d'aérosol [A, B, C] dont une fraction est évacuée sans être analysée. L'intérêt d'un tel dispositif réside dans le piégeage des particules dans le plasma radiofréquence dont elles ne peuvent s'échapper une fois injectées.

## Conclusion

Les résultats obtenus, bien que qualitatifs, ont démontré les potentialités d'un tel couplage pour l'identification d'éléments composants des agrégats de nanoparticules composites. Au-delà des problématiques liées aux nanoparticules, des particules organiques (contenant C, H, O et N) pourraient être analysées sans interférences avec ces mêmes éléments naturellement présents dans l'air en utilisant des gaz inertes, tels Ar ou He, pour la génération du plasma RF. De futures expériences sont envisagées pour optimiser les limites de détection et obtenir des résultats quantitatifs sur des problématiques telles que le contrôle de procédé ou la surveillance de l'air.

## Collaboration

Avec le laboratoire Gremi (Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés) et la compagnie Cilas (Compagnie industrielle des lasers), tous deux situés à Orléans.

## ABSTRACT

The LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*) technique has shown its potential in many fields of applications including that of aerosol analysis. The latter is usually carried out on the particle flow, thereby allowing quantitative detection in various experimental conditions such as ambient air analysis or exhaust stack monitoring. A possible alternative method for particle analysis has been experimented combining a low pressure RF (Radio Frequency) plasma discharge with the LIBS technique. Such approach has two peculiar features in comparison to usual LIBS analysis. First, the particles injected in the RF plasma discharge are trapped in levitation. Second, the analysis is performed at a reduced pressure (≈ 1 mBar). The use of such particle trap could allow improving particle sampling, making organic particle analysis possible (by using an inert gas for RF plasma ignition) and even (depending on the pressure) obtaining a better signal to noise ratio. Detection of the elements nanoparticle agglomerates were made of following their injection in the RF discharge has demonstrated the feasibility of such approach. Future experiments are intended to explore its potentialities when tackling issues such as process control or ambient air monitoring.

Figure 1

Photo du couplage du montage LIBS avec la cellule plasma radiofréquence (RF).

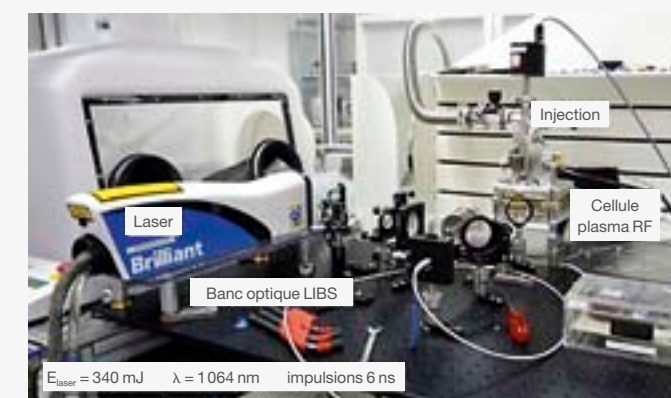


Figure 2

Schéma du montage du couplage d'un montage LIBS avec la cellule plasma radiofréquence (RF).

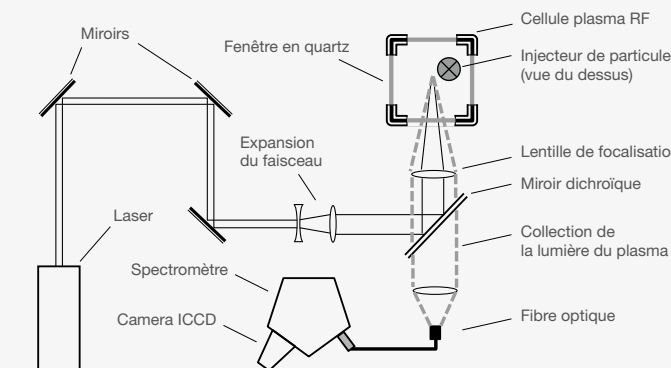
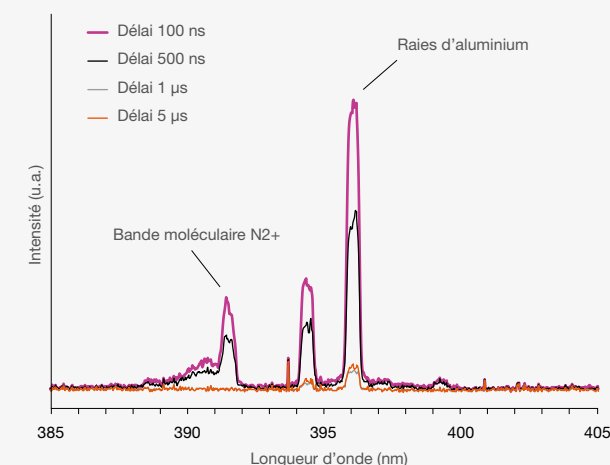


Figure 3

Évolution temporelle des raies d'aluminium et d'azote moléculaire ionisé en fonction du délai entre le tir laser et le déclenchement de l'enregistrement de la caméra CCD intensifiée.



## Références

[A] R'Mili B., Dutouquet C., Sirven J. B., Aguerre-Charliot O., Fréjafon E. *Journal of Nanoparticle Research* 13, 2011, pp. 563-577.

[B] Amodeo T., Dutouquet C., Le-Bihan O., Attoui M., Fréjafon E. *Spectrochimica Acta Part B* 64, 2009, pp. 1141-1152.

[C] Amodeo T., Dutouquet C., Tenegal F., Guizard B., Maskrot H., Le Bihan O., Fréjafon E. *Spectrochimica Acta Part B* 63, 2008, pp. 1183-1190.

[D] Mikikian M., Boufendi L., Bouchole A., Thomas H. M., Morfill G. E., Nefedov A. P., Fortov V. E. and the PKE-Nefedov team, *New J. Phys.* 5 19, 2003, pp. 1-12.

[E] Brevet INERIS-Gremicilas déposé à l'INPI intitulé « Méthode et système de détection et/ou d'analyse de particules dans un plasma froid », 2012.

[F] Dutouquet C., Wattiaux G., Meyer L., Fréjafon E., Boufendi L. *Spectrochimica Acta Part B* 83-84, 2013, pp. 14-20.



## La sécurité incluse dans les nano-objets dès leur conception : *Nanosafety by design*

CONTRIBUTEUR



Jacques Bouillard

En raison du nombre croissant d'applications et d'utilisations des nanomatériaux qui présentent un avantage industriel et concurrentiel certain, la question des risques/impacts sur l'environnement et la santé humaine est d'actualité.

La compréhension des phénomènes liés aux dangers de ces nanomatériaux reste encore incomplète, si bien que pour répondre à l'apport massif de ces nouveaux produits sur le marché, les études systématiques et rapides des risques par criblage à haut débit sont préconisées, car l'évaluation *a priori* du danger de ces matériaux de par leur nature et/ou leur définition n'est pas encore techniquement faisable. C'est typiquement le cas pour les nanomatériaux plastiques ou composites pour lesquels la qualification du relargage de nano-objets durant leur cycle de vie ou de fin de vie est un facteur de risque important. À cet effet, l'INERIS construit des outils spécifiques tels que des chambres d'émission opérant à températures ordinaires et des fours de combustion opérant à hautes températures, permettant la qualification et/ou la quantification rapide de relargage de

nano-objets issus de nanomatériaux soumis à des contraintes mécaniques ou thermiques [A, B]. Dans le cas où le matériau relargue [Figure 1], il sera considéré comme non sécurisé de par sa conception. Dans le cas contraire, il pourra être considéré comme sécurisé (*Nanosafe by design*). Dans cette démarche, les exigences réglementaires ne sont plus seulement traitées en fin de chaîne (*end of pipe*) du produit mais, très tôt, en phase de conception. La nanosécurité par conception (*nanosafety by design*) est donc un changement profond dans les phases de recherche et de développement de ces nouveaux produits. Dans cette nouvelle démarche [Figure 2], l'INERIS se propose d'apporter aux industriels ses compétences tant sur le plan expérimental que sur le plan phénoménologique.

### Références

[A] Bouillard J., Frejafon E., R'Mili B., Fleury D., inventeur INERIS, assignee. *Device for the characterization of the particulate release from combustion or thermal constraints upon materials containing nano-objects*. France, patent French FR 2976078, European Patent EP 2530450. 2011, May 2011.

[B] Bouillard J., R'Mili B., Moranviller D., Vignes A., Le Bihan O., Ustache A. et al. *Nanosafety by design: risks from nanocomposite/nanowaste combustion*. *Journal of Nanoparticle Research* C7, 2013, 1519.15(4), pp. 1-11.

Figure 1

Effet d'une contrainte thermique sur des granules de plastique chargés de nanotubes de carbone.

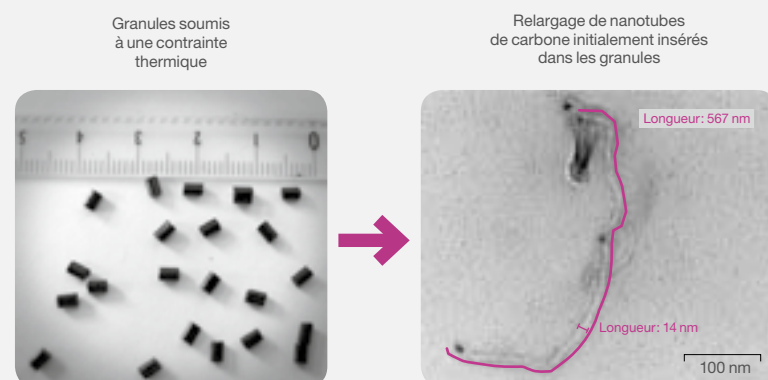
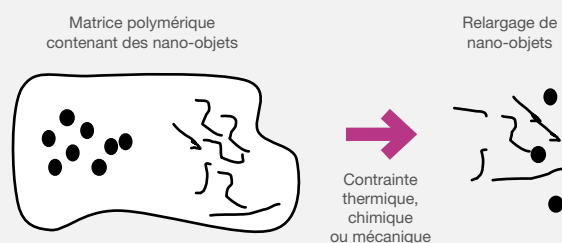


Figure 2

Comment prédire et évaluer le relargage sous contraintes thermiques, mécaniques ou chimiques de nano-objets insérés dans un nanomatériau dans le cadre d'une démarche de *nanosafety by design*?



## Effet d'une exposition répétée au dioxyde d'azote et/ou à des nanoparticules de carbone sur la fonction pulmonaire, la réactivité bronchique et l'inflammation chez le rat sensibilisé à l'ovalbumine [A]

CONTRIBUTRICE



Ghislaine Lacroix

### NOTES

- (1) Liquide de lavage broncho-alvéolaire.
- (2) Tumor necrosis factor.
- (3) Interféron.

L'asthme constitue l'une des pathologies chroniques les plus fréquentes dans le monde. Le GINA (*Global Initiative for Asthma*) et l'OMS (Organisation mondiale de la santé) estiment que l'asthme touche environ 300 millions de personnes dans le monde [B]. L'association épidémiologique entre la pollution atmosphérique liée aux particules fines et aux gaz polluants, et l'incidence et la morbidité de l'asthme a été démontrée par plusieurs études [C, D, E], mais le mécanisme par lequel l'exposition aux polluants atmosphériques augmente l'incidence de l'asthme n'est pas connu.

Des études d'exposition humaine contrôlée, des modèles animaux et des études *in vitro* suggèrent l'implication des polluants atmosphériques non seulement dans l'aggravation de l'asthme et des allergies, mais aussi très probablement dans leur développement. Deux mécanismes principaux ont été proposés pour expliquer l'effet des polluants atmosphériques sur la santé respiratoire et allergique:

- 1) une potentialisation de la réponse allergique par les polluants atmosphériques suite à l'exposition à un allergène, appelé « effet adjuvant » [F];
- 2) une induction de l'inflammation des voies aériennes résultant d'un stress oxydant généré par les polluants [F, G].

Il existe peu de données dans la littérature sur l'interaction des particules fines et des polluants gazeux. En particulier, nous ne

savons pas comment des mélanges de polluants gazeux et particulaires peuvent moduler la réponse immunitaire et affecter la sévérité de l'inflammation pulmonaire allergique ou la réactivité bronchique. Peu d'études ont évalué les effets de l'exposition combinée aux particules et aux polluants atmosphériques gazeux et, à notre connaissance, il n'existe aucune donnée sur l'effet de l'exposition combinée au dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) et aux nanoparticules de carbone (CNP) dans les modèles expérimentaux d'asthme allergique chez l'animal.

L'objectif de ce travail, qui a fait l'objet d'une thèse de doctorat [H], était donc d'étudier l'effet de l'exposition combinée au NO<sub>2</sub> et aux CNP durant la période de sensibilisation à l'allergène chez le rat Brown Norway. Les effets de cette interaction ont été évalués sur la fonction, la morphologie et l'inflammation pulmonaire ainsi que sur la réactivité bronchique.

Les rats ont été exposés soit à de l'air, soit à 10 ppm (19 mg/m<sup>3</sup>) de NO<sub>2</sub>, six heures par jour, cinq jours par semaine pendant quatre semaines. Durant cette période, certains animaux ont été sensibilisés à l'ovalbumine (OVA), les autres ont reçu un placebo. Enfin, certains animaux ont été exposés par voie intratrachéale à des CNP (Degussa-FW2: 13 nm de diamètre, Evonik Industries, Essen, Allemagne, 0,5 mg/kg à J0, J7 et J14) suspendues dans du sérum physiologique contenant du surfactant synthétique (véhicule), les autres n'étant instillés que par le véhicule. Toutes les combinaisons étaient donc représentées, allant d'animaux exposés à l'air et non sensibilisés à des animaux sensibilisés et exposés au NO<sub>2</sub> et aux CNP.

### Les principales observations

- L'exposition au NO<sub>2</sub> pendant quatre semaines augmente considérablement l'inflammation allergique pulmonaire chez les animaux sensibilisés à l'OVA, avec une augmentation de l'infiltration cellulaire dans le lavage broncho-alvéolaire, de l'expression de diverses cytokines dans le sérum et de la réactivité des voies aériennes à la provocation spécifique et non spécifique.

- L'exposition aux CNP une fois par semaine pendant l'exposition au NO<sub>2</sub> était caractérisée par une augmentation des polynucléaires neutrophiles et des macrophages alvéolaires dans le LLBA<sup>(1)</sup>, et l'élévation des taux de TNF<sup>(2)</sup>-α et d'IFN<sup>(3)</sup>-γ dans le sérum. ➔

### Références

[A] Layachi S., Rogerieux F., Robidel F., Lacroix G., Bayat S., *PLoS One* 7(9), 2012, p. 28.

[B] Kim H. Y. et al. *Nat Immunol*, 2010, 11, pp. 577-584.

[C] Brunekreef B. et al. *Res Rep Health Eff Inst*, 2009, (139), pp. 5-71.

[D] Kelly F. J., Fussell J. C., 2011, *Clin Exp Allergy* 41(8), pp. 1059-1071.

[E] Grigg J. *Paediatric Asthma*, 2012, 56, pp. 134-142.

[F] Bonay M., Aubier M. *Med Sci*, 2007, 23(2), pp. 187-192.

[G] Baeza A., Marano F. *Med Sci*, 2007, 23(5), pp. 497-501.

[H] Layashi S. Thèse soutenue le 10 octobre 2012, Université de Picardie Jules-Vernes, Amiens, Biologie Santé, 190 pages.

► • L'exposition concomitante aux CNP et au NO<sub>2</sub> lors de la sensibilisation à l'OVA a atténué la réactivité des voies respiratoires à la fois à la métacholine et à l'allergène, et a diminué le taux des cytokines responsables de l'allergie dans le sérum des animaux NO<sub>2</sub>+OVA+CNP par rapport aux animaux NO<sub>2</sub>+OVA.

• La sensibilisation à l'OVA, mais aussi l'exposition au NO<sub>2</sub> et aux CNP modifient le volume gazeux suggérant un ralentissement de la croissance, comparé aux rats témoins exposés à l'air et traités avec du sérum physiologique, suggérant un ralentissement de la croissance pulmonaire.

**Conclusion**

Les résultats de cette étude suggèrent un effet immunomodulateur des CNP sur l'action pro-inflammatoire de l'exposition au NO<sub>2</sub> chez les rats sensibilisés, se traduisant par une diminution de l'intensité de la réponse allergique induite par l'exposition des rats sensibilisés au NO<sub>2</sub>. Par ailleurs, il apparaît que le NO<sub>2</sub>, les CNP et la sensibilisation à l'OVA peuvent tous ralentir considérablement la croissance pulmonaire homogène chez le rat jeune. Ce modèle pourrait être utilisé pour étudier l'effet des polluants environnementaux sur le développement pulmonaire.

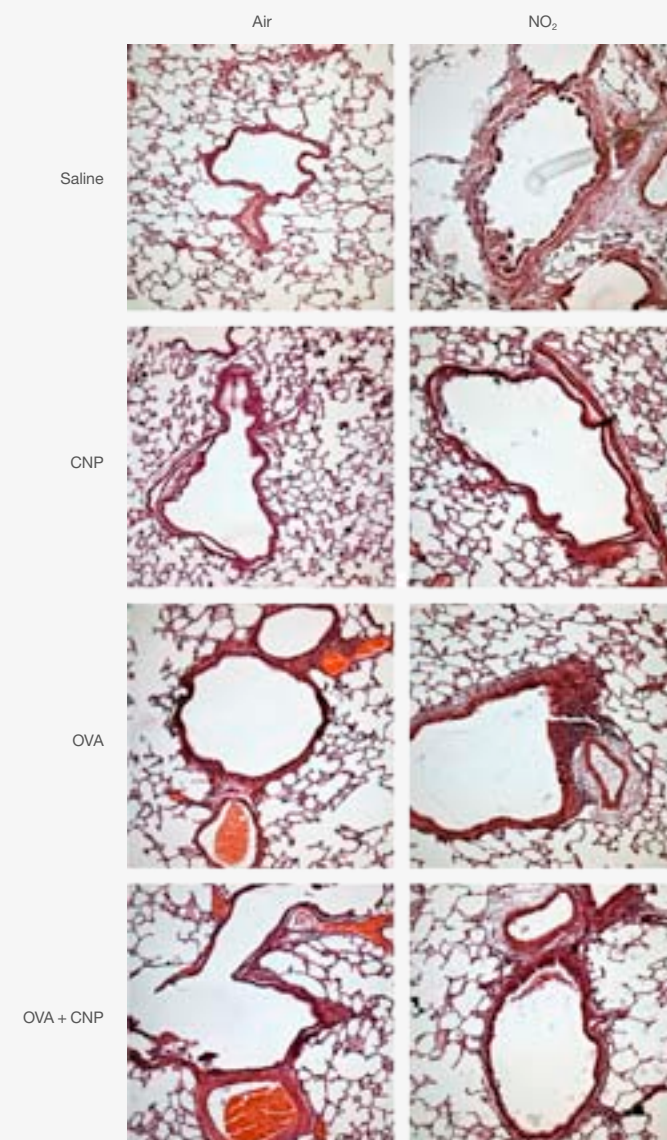
**ABSTRACT**

The interaction of particulate and gaseous pollutants in their effects on the severity of allergic inflammation and airway responsiveness are not well understood. We assessed the pulmonary effects of exposure to

NO<sub>2</sub> in the presence or absence of repetitive treatment with carbon nanoparticle (CNP) during allergen (ovalbumin) sensitization and challenges in Brown-Norway (BN) rats. groups of control and OVA-sensitized rats were exposed to NO<sub>2</sub> (10 ppm, 6 h / d, 5d / 7) for 4 weeks, to CNP (Degussa-FW2, 13 nm) or to both pollutants. Our results show that NO<sub>2</sub> exposure significantly increases lung inflammation, airway responsiveness, and expression of Th2-type cytokines in sensitized animals. CNP led only to lung inflammation, and expression of Th1 cytokines, without significant change in bronchial reactivity. Sensitized animals simultaneously exposed to NO<sub>2</sub> and CNP had a less pronounced airway hyperresponsiveness than those exposed to NO<sub>2</sub> alone, and decreased Th2 cytokines. We conclude that exposure to CNP could have an immunomodulatory effect on inflammation induced by NO<sub>2</sub> exposure in allergen-sensitized BN rats.

**Figure 1**  
Histologie pulmonaire après les différentes conditions expérimentales

L'infiltration inflammatoire est importante dans la sous-muqueuse bronchique, avec la présence de sécrétions de mucus dans la lumière bronchique chez les animaux sensibilisés à l'ovalbumine (OVA). Ces caractéristiques sont aggravées chez les animaux exposés au NO<sub>2</sub>. Chez les animaux traités par les nanoparticules de carbone (CNP), on note la présence de macrophages ayant des granulations noirâtres, mais avec une infiltration cellulaire péribronchique moins prononcée par rapport aux animaux sensibilisés à l'OVA.



## Preuves expérimentales de la présence de colloïdes et de nanoparticules dans 25 lixiviats de déchets

**CONTRIBUTEURS**



Pierre Hennebert  
Olivier Aguerre-Chariol

L'émission potentielle de colloïdes (particules de phase dispersée de taille de 1 nm à 1 µm dans une autre phase, ici aqueuse, ou encore entités organiques ou inorganiques assez petites pour rester dans une colonne d'eau, mais assez grandes pour avoir une structure ou des propriétés supramoléculaire, par exemple électrique ou de surface) et de nanoparticules (objets produits intentionnellement ou non ayant au moins une dimension < 100 nm) de 25 lixiviats de déchets industriels et municipaux, sols, sédiments et lixiviats de décharge a été étudiée.

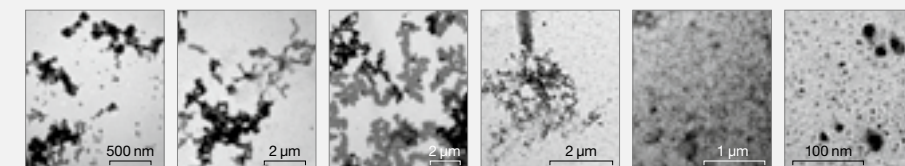
Les lixiviats sont préparés par microfiltration (450 nm) et ultrafiltration (± 3 nm) tangentielle en cascade et analysés par ICP-MS, COTmétrie, zétamétrie, granulométrie par spectrométrie de corrélation de photon et microscopie électronique à balayage avec sonde élémentaire (TEM-EDS). La teneur dissoute d'un élément est sa teneur dans l'ultrafiltrat (les ions ou molécules sont individualisés). La teneur colloïdale ou nanoparticulaire d'un élément est la différence de teneur entre microfiltrat et ultrafiltrat.

Pour certains lixiviats des déchets, les particules ont un potentiel zêta (potentiel électrique) assez fort pour rester en suspension. Les éléments Mn, As, Co, Pb, Sn, Zn sont toujours sous forme colloïdale, et les COT, Fe, P, Ba, Cr, Cu, Ni sont en partie sous forme colloïdale pour plus de la moitié des échantillons. Les micro-polluants (As, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Sb, Sn, V et Zn) ont tous été trouvés au moins une fois sous une forme colloïdale supérieure à 100 µg.l<sup>-1</sup>. En particulier les formes colloïdales de Zn étaient toujours de loin plus concentrées que sous la forme dissoute. Il y a toujours au moins un élément détecté comme colloïdal dans un lixiviat. La méthode TEM-EDS a montré des nanoparticules manufacturées (polymère organique, TiO<sub>2</sub>, des particules de Sr, La, Ce, Nd) et ses résultats doivent être comparés aux résultats d'ICP-MS. La fraction colloïdale du lixiviat des déchets doit être prise en compte dans les études d'émission et le transfert des contaminants dans l'environnement.

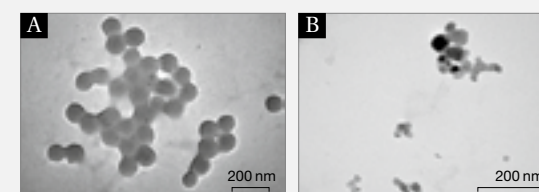
**Référence**

Hennebert P., Avellan A., Yan J., Aguerre-Chariol O., *Experimental evidence of colloids and nanoparticles presence from 25 waste leachates*, Waste management, 2013, 33(9), pp. 1870-1881.

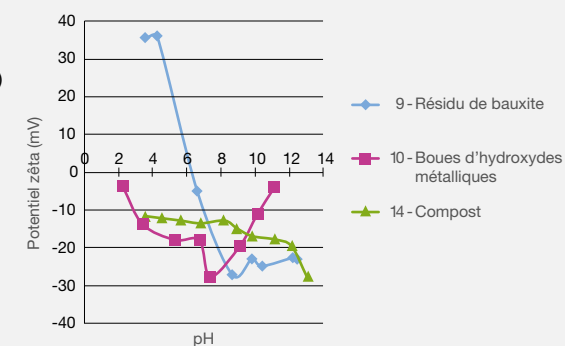
**Figure 1**  
Images MET (de gauche à droite et de haut en bas): mâchefer industriel, résidus d'épuration de fumée d'incinération d'ordures ménagères, mâchefer d'incinération d'ordures ménagères, sédiment, lixiviat de décharges, résidus d'épuration de fumées d'incinération de déchets industriels.



**Figure 2**  
Nanoparticules manufacturées de polymère organique de taille de 80 à 100 nm (sédiment de bassin d'autoroute - A) et nanoparticules de TiO<sub>2</sub> de taille de 10 à 50 nm (sédiment de bassin portuaire de réparation navale de Méditerranée - B).



**Figure 3**  
Potentiel zêta (potentiel électrique) en fonction du pH pour trois lixiviats de déchet.





# Les chambres d'émission, un outil innovant pour étudier les sources de particules

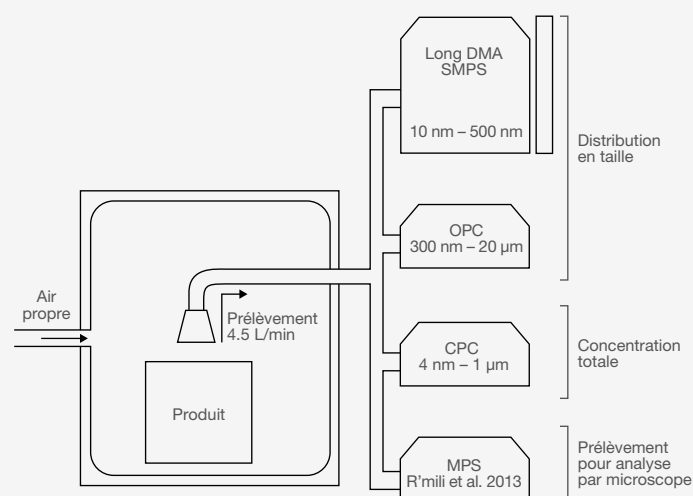
**CONTRIBUTEUR**

  
**Olivier Le Bihan**

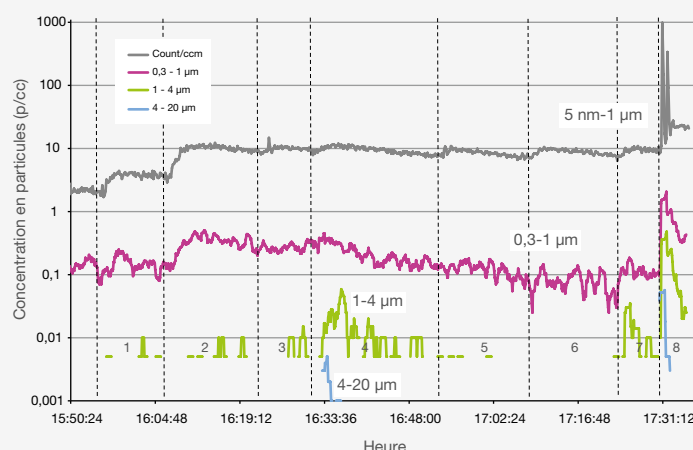
Nombre de produits qui nous entourent sont l'objet de sollicitations mécaniques (ponçage, perçage, découpe, friction, etc.) pouvant mener à l'émission de particules inhalables. Ceci vaut tout autant dans la vie professionnelle qu'au niveau domestique. La demande sociétale implique que ce risque soit pris en compte lors de la conception de ces produits, tout particulièrement dans un domaine en plein développement comme celui des nanomatériaux. Pour cela, il est nécessaire de s'appuyer sur des dispositifs expérimentaux à même de produire des données de manière économique, mais aussi spécifique, en distinguant bien cet aérosol des particules ambiantes.

**Développer un concept innovant**  
L'INERIS, en partenariat avec l'Université de technologie de Compiègne (UTC), s'est investi sur ce sujet dès 2007. Le concept de départ est celui des chambres d'émission utilisées pour déterminer les émissions en composés organiques volatils (COV) des matériaux de construction. Le principe est le suivant **Figure 1** : le produit et la sollicitation considérés (par exemple le ponçage d'une surface) sont représentés de la manière la plus fidèle possible au sein d'une chambre hermétique, alimentée par un air dénué de particules et équipée d'un spectre large d'appareils de caractérisation des aérosols. La sollicitation est mise en

**Figure 1**  
Présentation du principe de chambre d'émission **[C]**.



**Figure 2**  
Évolution de la concentration en nombre en fonction du temps, par gammes de taille, lors de la sollicitation mécanique d'une pièce métallique recouverte d'un film nanostructuré **[B]**.



## Références

**[A]** R'mili B., Le Bihan O., Dutouquet C., Aguerre-Chariol O., Frejafon E., *Particle Sampling by TEM Grid Filtration*, *Aerosol Science and Technology*, 47:7, (2013), 767-775.

**[B]** Le Bihan O., Shandilya N., Gheerardyn L., Guillon O., Dore E., Morgeneyer M., *Investigation of the Release of Particles from a Nanocoated Product*, *Adv. in Nanopart.*, 2, 2013, 39-44.

**[C]** Le Bihan O., Morgeneyer M., Shandilya N., Aguerre-Chariol O., Bressot C., *Handbook on Safe Use of Nanomaterials: Chapter 9.2 - Emission chambers, a method for nanosafety*, Elsevier 2013 (in press).

œuvre : une caractérisation de l'aérosol (concentration, taille) est menée en temps réel **Figure 2**, et des prélèvements sont réalisés afin d'effectuer une analyse différée, notamment par microscopie à transmission **[A]**, ce qui permet, par exemple, d'étudier la nanostructure **Figure 3**.

## Résultats

La mise en œuvre de cette technique a montré qu'il est possible d'atteindre un bruit de fond proche de zéro. Cela permet une caractérisation réellement spécifique de l'aérosol émis par la source étudiée; il a même été possible de considérer des émissions particulièrement faibles. Cette méthode a été mise en place pour répondre à différentes sollicitations en hygiène industrielle (produits réglementés ou émergents **[B]**). Elle est utilisée de manière indépendante ou en association avec des mesurages au poste de travail, les essais en chambre d'émission facilitant la réalisation d'études paramétriques. Elle est également employée comme un outil d'aide à la conception de nouveaux produits, tout particulièrement dans le domaine des nanomatériaux, pour l'automobile et le bâtiment notamment. C'est le cas du projet européen Sanowork pour lequel sont considérées des sollicitations telles que la découpe, le broyage et l'abrasion, sur des produits contenant des nanotubes de carbone ou des fibres nanostructurées de polyamide. Ce retour d'expérience a permis la réalisation d'un document de synthèse **[C]**.

## Perspectives

Ces travaux ont mis en évidence l'existence, d'un point de vue macroscopique, d'une relation entre l'énergie mise en œuvre au sein du couple produit-sollicitation, d'une part, et l'émission de particules dans l'air, d'autre part. Cette approche dite « énergétique » a donné naissance à un travail de doctorat (2012-2014) **Tableau 1**.

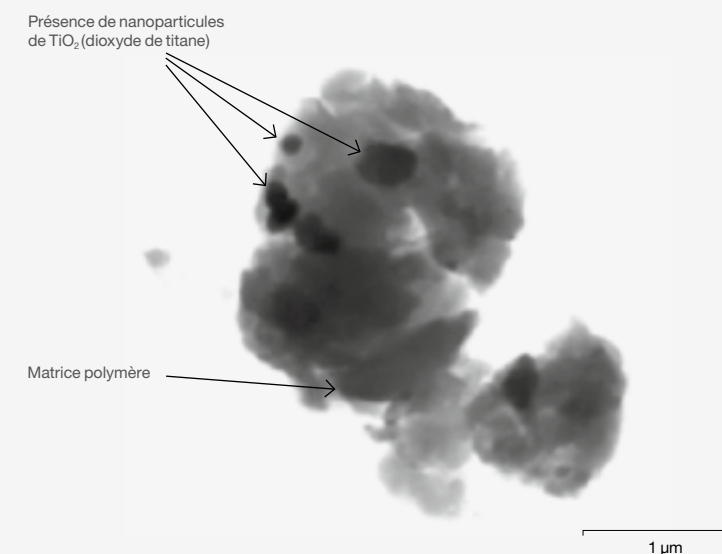
**Tableau 1**

Estimation de l'énergie d'usure et concentration en nombre de particules associée **[B]**.

| Test    | Énergie (J) | Concentration totale en nombre (#/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|-------------|---|
| Chute   | 0,2         | 10  |
| Rayures | 0,32        | 12  |
| Sciage  | 0,48        | 300   |
| Meulage | 8           | 100 000   |

**Figure 3**

Exemple d'observation d'une particule par microscopie électronique à transmission.



## ABSTRACT

Mechanical solicitations (scratching, drilling, sanding, etc.) are largely used in the professional and domestic fields, and can lead to inhalable aerosol particles release. To tackle this problem, especially for emerging areas as nanomaterial science, further information and data are required. Measurements can be taken on site, and studies can be carried out in the lab. For the latter, the emission chamber is a high performance tool that may be used under specific conditions.

The operating principle of an emission chamber is very simple **Figure 1**. Clean and particle free air is led through a conduit to the sealed chamber. The testing sample kept in this enclosed space is then stressed in various ways (using mechanical abrasion, etc.). The air is evacuated to particle analysers (size distribution, sampling for analysis by microscopy, etc.). Since 2007, this method has been applied successfully by INERIS to a large scale of fields (e.g buildings and automotive). Nanomaterials are considered e.g in the frame of the FP7 SANWORK project through abrasion tests on CNT and Polyamide fibers containing composites.





## SITES ET TERRITOIRES

### RISQUES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

**48** Impact du prélèvement sur la qualité des données de la surveillance

**50** Dérivés oxygénés et nitrés des hydrocarbures aromatiques polycycliques en phase particulaire: granulométrie et devenir dans l'atmosphère

**52** Effets d'une exposition chronique à des ondes radiofréquences sur l'équilibre énergétique chez des rats en développement

**55 FOCUS.** Modèles de qualité de l'air: les nouveaux outils d'aide à la décision

**56** Développement d'un modèle multimédia stochastique pour évaluer l'exposition spatialisée de la population à l'échelle régionale

**58** Pollution atmosphérique et climat: construction d'une nouvelle chaîne de modélisation

**61 FOCUS.** Évaluer l'oxydation du méthane par une approche isotopique pour les biogaz des installations de stockage de déchets non dangereux

### RISQUES INDUSTRIELS

**62** Quel retour d'expérience sur le retour d'expérience ?

**64** Modélisation numérique des réservoirs soumis aux explosions et impacts

### RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

**66** Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'envoyage

**68** Outils numériques et géophysiques appliqués à la prédiction de la sismicité dans les mines profondes

**70** Retour d'expérience sur la catastrophe de Coalbrook

**73** Nouveaux dispositifs pour caractériser rapidement le retrait-gonflement des argiles



# Impact du prélèvement sur la qualité des données de la surveillance



La directive 2000/60/CE vise à atteindre un bon état des masses d'eaux en 2015 pour l'ensemble des milieux aquatiques européens. À l'intérieur de ce cadre réglementaire, la qualité et la maîtrise des données acquises ont une importance capitale, non seulement pour comparer des résultats à des valeurs seuils, mais également pour identifier avec un degré de confiance suffisant les tendances des niveaux des concentrations en polluants. Les notions de comparabilité des données et d'estimation des incertitudes de mesures sont abordées par les laboratoires à travers notamment la participation aux essais d'aptitude analytique. Cependant, de tels essais portant sur les aspects « échantillonnage » sont pour l'instant encore rares. Depuis 2007, le consortium Aquaref s'est focalisé sur l'amélioration et l'harmonisation des pratiques d'échantillonnage. Un essai collaboratif sur l'échantillonnage d'eau en plan d'eau a été organisé en 2010 pour étudier l'impact des opérations de prélèvement sur la qualité des résultats d'analyse. Coordinateur et promoteur de l'étude, l'INERIS a réalisé, en partenariat avec le LNE<sup>(1)</sup> et l'Inra<sup>(2)</sup>, ces travaux financés par l'Onema<sup>(3)</sup>.

## Méthodologie

L'étude a porté sur les métaux, les nutriments et quelques pesticides. Le lac de Paladru, en Isère, a été retenu du fait de sa morphologie, de son accessibilité et de la présence des subs-

tances visées. Dix organismes de prélèvement ont participé à cet essai. Ils ont été sélectionnés en partenariat avec les agences de l'eau, en priorisant les préleveurs retenus pour le réseau de surveillance des plans d'eau. Chaque organisme a transmis, préalablement à l'essai, la liste du matériel et leurs pratiques d'échantillonnage.

Avant départ sur le lieu de prélèvement, des blancs de système de prélèvement ont été effectués par chaque participant pour les métaux. L'objectif était de vérifier l'absence de contamination du matériel spécifique aux participants, mais également de tester la capacité à réaliser « en routine » ce type de contrôle qualité sur site.

Les opérations d'échantillonnage ont duré une journée, le 22 juin 2012. Chaque organisme a réalisé, selon sa procédure habituelle, des prélèvements en double. Le flaconnage ainsi que le transport et l'analyse de la totalité des échantillons ont été pris en charge par l'INERIS afin de réduire les risques de contamination et d'estimer la variabilité liée à l'échantillonnage par rapport à celle de l'analyse. L'estimation de la variabilité liée à l'échantillonnage a été obtenue par comparaison entre la variabilité globale obtenue par l'approche NF ISO 5725-5 et la variabilité analytique déterminée le jour de l'essai. Elle a été obtenue par la somme quadratique :

$$(\text{variabilité globale})^2 = (\text{variabilité échantillonnage})^2 + (\text{variabilité analytique})^2$$

## NOTES

- (1) Laboratoire national de métrologie et d'essais.
- (2) Institut national de la recherche agronomique.
- (3) Office national de l'eau et des milieux aquatiques.

## Photos 1

Exemples de système de prélèvement d'eau pour la surveillance des plans d'eau.



## Références

- Cotman M., Pintar A. *Sampling uncertainty of wastewater monitoring estimated in a collaborative field trial*. TrAC Trends in Analytical Chemistry 2013, 51, pp. 71-78.
- 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.
- Miege C., Mazzella N., Schiavone S., Dabrin A., Berho C., Ghestem J. P., Gonzalez C., Gonzalez J.-L., Lalère B., Lardy-Fontan S., Lepot 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.

## Principaux résultats

Le questionnaire d'enquête et les observations de terrain ont mis en évidence des pratiques et des matériels variés (Photos 1). Par exemple, la nature des systèmes de prélèvement n'est pas toujours appropriée à la recherche de micropolluants. Les valeurs quantifiées dans les blancs de systèmes de prélèvement mettent en évidence l'absence de nettoyage du matériel avant un départ sur site et/ou un relavage très important de métaux par les outils utilisés. Plus de 50% des métaux sont retrouvés dans les blancs. Les métaux les plus quantifiés sont le zinc (64,2 µg/l), l'aluminium (38,9 µg/l) et le plomb (7,5 µg/l). En particulier, pour le zinc (Figure 1), 9 participants sur 10 présentent une contamination dans leur système de prélèvement. Tous les préleveurs utilisant des matériaux en PVC ou en silicone présentent des teneurs non négligeables en métaux dans leur blanc.

Les résultats montrent que la variabilité liée à l'échantillonnage représente plus de 90% de la variabilité globale (48,9%) pour les paramètres azotés et phosphorés, les pesticides (DEA) et certains métaux (Al, Co, Ni) (Figure 2). En revanche, pour d'autres paramètres (Ca, Mg, Na), les pratiques d'échantillonnage n'influencent pas les résultats, la variabilité globale provient majoritairement de la variabilité analytique.

## Conclusion et perspectives

Cet essai a montré l'impact des opérations de prélèvement sur la qualité des données pour certaines substances. La variabilité liée aux opérations de prélèvement est significative, et parfois plus importante que celle observée sur l'analyse, en cohérence avec des essais collaboratifs antérieurs. L'analyse des blancs de système de prélèvement permet de démontrer des contaminations avant même le démarrage de l'échantillonnage. Cet essai a conforté les missions d'Aquaref d'harmonisation des pratiques au niveau national afin de réduire l'impact sur la qualité des données.

Ces travaux ont conduit à poursuivre ce type d'essais collaboratifs sur des matrices différentes (rejet canalisé piloté par l'INERIS en 2012, sédiment prévu en 2014), à intégrer de nouvelles recommandations dans les prescriptions techniques nationales et à mettre en place des référentiels de formations « échantillonnage ».

Figure 1

Comparaison des concentrations de zinc mesurées dans le blanc du matériel (avant échantillonnage) et dans l'échantillon collecté (LQ: 0,54 µg/l).

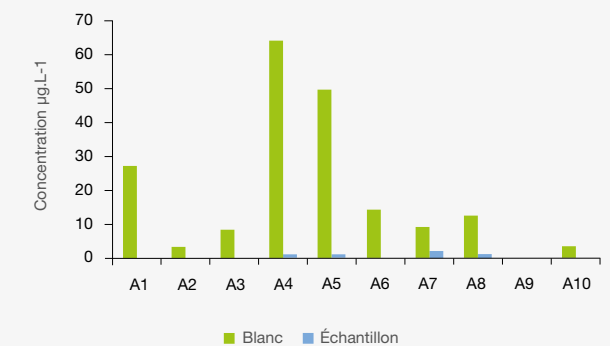
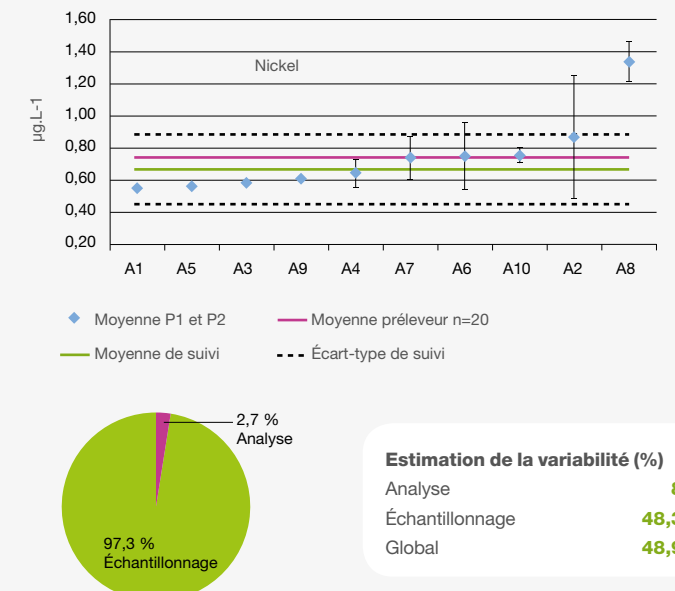


Figure 2

Résultats obtenus par les participants pour le nickel et estimation de la variabilité « échantillonnage ».



## ABSTRACT

A collaborative sampling trial was performed by AQUAREF (French national reference laboratory for water and the aquatic environment) at Paladru Lake, Isère, France. This trial was the first national test aiming at improving

knowledge of the effect, in lake water, of sampling on global variability. Ten sampling teams regularly involved in Water Framework Directive monitoring of lake water were asked to participate, in agreement with the Regional Water Agencies. All the samples were collected and analyzed by INERIS in order to minimize the analytical impact on global variability. Overall results for a few metals (cobalt and nickel) showed predominance (>90%) of sampling uncertainty compared

to analytical variability. For other metals (zinc, lead and aluminium), the initial blank tests showed possible contamination of sampling systems, and really pointed to the importance of blank sampling. Finally, this trial highlighted the need for general guidelines for sampling that could minimize the risk of misclassification of lake-water status.

# Dérivés oxygénés et nitrés des hydrocarbures aromatiques polycycliques en phase particulaire : granulométrie et devenir dans l'atmosphère

CONTRIBUTEUR



Alexandre Albinet

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés réglementés dans l'air ambiant en raison de leurs propriétés cancérigènes et mutagènes avérées. Ces composés, émis par tous les processus de combustion, peuvent réagir avec les oxydants atmosphériques ( $O_3$ ,  $NO_2$ , OH,  $NO_3$ ,  $N_2O_5$ , etc.) et former des dérivés oxygénés (OHAP) et nitrés (NHAP) qui semblent plus toxiques que les HAP parents. Le travail présenté ici est centré sur l'étude des sources et le devenir dans l'atmosphère des HAP et de leurs dérivés par l'intermédiaire de deux approches complémentaires : expérimentations en laboratoire en conditions contrôlées et études de terrain.

## Expérimentations en laboratoire

La réactivité des composés aromatiques polycycliques (CAP) adsorbés sur des particules naturelles d'air ambiant exposées à différents oxydants ( $O_3$ , OH,  $NO_2/O_3$ ) a été étudiée. Ces expériences ont permis de suivre la dégradation/formation des HAP, OHAP et NHAP. Les résultats obtenus ont montré que le benzo[a]pyrène (B[a]P), seul HAP réglementé, était le HAP le plus réactif (dégradation d'environ 50 %) avec identification seule de la formation de 6-nitrobenzo[a]pyrène. Bien que ce dernier ne justifie que 0,4 % de la quantité de B[a]P dégradé, aucun autre produit de dégradation du B[a]P n'a été observé. En présence d' $O_3$ , la formation significative de cétones a été

observée. Cependant, les quantités formées ne peuvent être expliquées par la seule dégradation des HAP parents. Ces résultats montrent que les HAP dérivés peuvent être formés via la réaction d'autres composés que les HAP parents. L'oxydation des HAP méthylés identifiés dans les émissions véhiculaires pourrait être une source potentielle de OHAP cétones. La formation importante de NHAP a été observée en présence de tous les oxydants, y compris lors des réactions en présence d' $O_3$ . Ce dernier résultat suggère que les espèces nitrées déjà associées aux particules ( $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ) ou formées par ozonation de la matière organique azotée réagissent avec les HAP pour conduire à la formation de NHAP. Enfin, l'ensemble des résultats obtenus a montré la dépendance de la réactivité hétérogène des HAP avec la nature du substrat. Ainsi, il semble essentiel de poursuivre les études de réactivité en utilisant des particules naturelles en complément essentiel des études réalisées sur des particules modèles (silice, graphite, etc.).

## Études de terrain

Deux études de terrain ont été ensuite réalisées afin d'évaluer les concentrations particulières de 17 HAP, 9 OHAP et 18 NHAP sur deux sites de typologies différentes (trafic et péri-urbain) de la région parisienne. Afin d'étudier les différences de processus chimiques entre le jour et la nuit, les prélèvements ont été réalisés sur un pas de temps de douze heures. Les concentrations observées étaient dix fois plus importantes sur le site trafic pour tous les composés et plus importantes de nuit sur les deux sites (excepté pour les NHAP). Aucune différence majeure de profil et d'espèces majoritaires n'a été observée entre les deux sites pour les HAP et OHAP. À l'inverse, le 1-nitropyrene (source diesel) était le NHAP le plus concentré sur le site trafic, alors que le 2-nitrofluoranthène (composé secondaire) était le NHAP le plus abondant sur le site péri-urbain. L'étude du ratio 2-nitrofluoranthène/1-nitropyrene (2-NFlt/1-NP) a montré une formation locale importante d'espèces secondaires sur le site péri-urbain, principalement la nuit. L'analyse détaillée des résultats a montré que l'humidité de l'atmosphère et la pluie modifient différemment les profils chimiques des HAP et NHAP par rapport aux profils des OHAP. La différence d'échelle de solubilité de ces molécules entre les composés légers ( $MW \leq 228 \text{ g mol}^{-1}$ ) et les composés lourds ( $MW \geq 273 \text{ g mol}^{-1}$ ) explique les

## Références

- Ringuet J., Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E. *Diurnal/nighttime concentrations and sources of particulate-bound PAHs, OPAHs and NPAHs at traffic and suburban sites in the region of Paris (France)*. Science of The Total Environment, 437, 297–305, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.07.072, 2012a.
- Ringuet J., Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E. *Reactivity of polycyclic aromatic compounds (PAHs, NPAHs and OPAHs) adsorbed on natural aerosol particles exposed to atmospheric oxidants*. Atmospheric Environment, 61, 15–22, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.07.025, 2012b.
- Ringuet J., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., Albinet A. *Particle size distribution of nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (NPAHs and OPAHs) on traffic and suburban sites of a European megacity: Paris (France)*. Atmos. Chem. Phys., 12(18), 8877–8887, doi:10.5194/acp-12-8877-2012, 2012c.

Figure 1

Exposition de particules naturelles à l'ozone ( $[O_3] = 1 \times 10^{14} \text{ molécules.cm}^{-3}$ ). Évolution temporelle des concentrations normalisées ( $C_t/C_0$ ) en HAP, NHAP et OHAP (valeurs médianes,  $n = 3$ ).

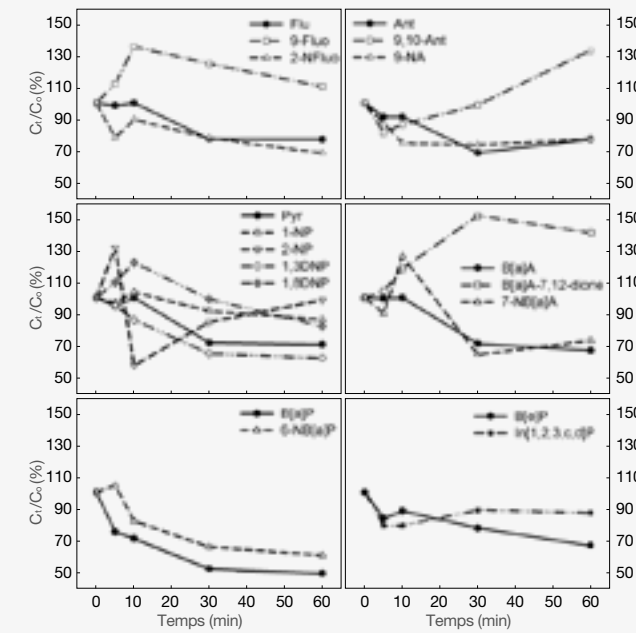
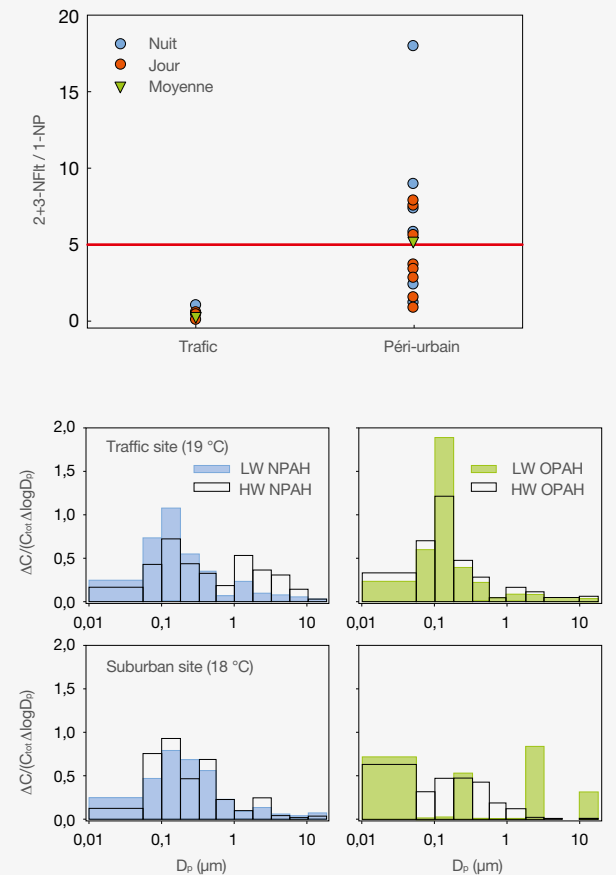


Figure 3

Distribution en taille des  $NHAP_{LW}$  ( $MW \leq 223 \text{ g.mol}^{-1}$ ), des  $NHAP_{HW}$  ( $MW \geq 247 \text{ g.mol}^{-1}$ ) et des  $OHAP_{LW}$  ( $MW \leq 208 \text{ g.mol}^{-1}$ ), des  $OHAP_{HW}$  ( $MW \geq 230 \text{ g.mol}^{-1}$ ) sur les sites trafic, urbain et péri-urbain, avec la température moyenne de prélèvement.

Figure 2

Ratios diurne et nocturne du 2+3-nitrofluoranthène/1-nitropyrene (2+3-NFlt/1-NP) sur les sites trafic et péri-urbain (Paris). Un ratio inférieur à 5 indique une émission directe des NHAP, un ratio supérieur à 5 indique une formation secondaire des NHAP par réaction en phase gazeuse.



observations faites. L'étude des relations entre les différents composés ciblés vis-à-vis d'autres polluants a enfin montré que la remise en suspension des particules présentes sur la chaussée est une source importante de particules sur le site trafic. La distribution en taille des NHAP et les OHAP a été étudiée sur les deux sites. Les résultats ont montré qu'ils sont largement associés (> 85 %) aux particules fines ( $D_p < 2,5 \mu\text{m}$ ) et mettent en avant l'intérêt de leur étude d'un point de vue sanitaire. Des distributions en tailles différentes entre les deux sites ont été observées pour les NHAP et OHAP. La distribution bimodale ( $D_p = 0,14$  et  $1,4 \mu\text{m}$ ) sur le site trafic (notamment pour les NHAP) est en lien avec les émissions véhiculaires et la remise en suspension des particules. Les distributions en tailles plus étalées sur le site périurbain s'expliquent par les phénomènes importants de volatilisation/réadsorption au cours du vieillissement des particules dans l'atmosphère. Enfin, les résultats ont montré que la combinaison de l'étude de la distribution en taille de certains composés d'origine connue (primaire: 1-NP; secondaire: 2-NFlt) et des profils chimiques des OHAP et NHAP permet d'obtenir des informations sur leurs origines primaires et/ou secondaires.

## ABSTRACT

To better understand the source and fate in the atmosphere of PAH derivatives, two complementary approaches were used: laboratory reactivity experiments in controlled conditions and field studies. Reactivity studies were carried out by exposing natural ambient air particles to oxidants ( $O_3$ , OH and  $NO_2/O_3$ ). Large decays of PAHs were observed and B[a]P appeared as the most reactive. The formation of oxygenated PAHs (OPAHs) and nitrated PAHs (NPAHs) was showed. However, quantities formed were not

sufficient to explain the total amount of PAHs that reacted, highlighting the formation of other compounds not detected in this work. Field campaigns were performed on two different sampling sites around Paris. Concentrations were 10 times higher at the traffic site than at the suburban one. OPAHs and PAHs major compounds were similar at both sites, in contrary to NPAHs. The traffic site was influenced by primary emissions, whereas high amounts of secondary species were quantified at the suburban site. Particle size distribution of OPAHs and NPAHs showed their strong association to the finest particles ( $D_p < 2,5 \mu\text{m}$ ), highlighting the interest of their study considering sanitary impacts.



# Effets d'une exposition chronique à des ondes radiofréquences sur l'équilibre énergétique chez des rats en développement

CONTRIBUTEUR



René de Sèze

Les effets d'une exposition continue aux radiofréquences sur les fonctions de l'équilibre énergétique du jeune rat ont été étudiés: le sommeil, la thermorégulation et la prise alimentaire. Le niveau d'exposition simulé dans l'étude correspond à celui rencontré à proximité des antennes-relais. Vingt-quatre rats mâles, âgés de 3 semaines, ont été acclimatés aux conditions de l'étude pendant trois semaines, puis ont été équipés de capteurs physiologiques.

## Exposition

L'étude a été réalisée dans deux chambres climatiques, dont l'une est équipée de quatre antennes radiofréquences, émettant un champ continu à une fréquence de 900 MHz et une intensité de 1 V/m. Le débit d'absorption spécifique (DAS) des animaux exposés est inférieur à 0,5 MW/kg.

Le champ électrique a été mesuré par un dosimètre dans chaque cage, à l'intérieur de la chambre d'exposition (Figure 1) et dans chaque chambre avec un analyseur de spectre et un champmètre large bande.

Les animaux ont été exposés ou non pendant cinq semaines, à une température de 24 °C. La sixième semaine, les paramètres physiologiques et comportementaux ont été mesurés à 24 °C puis à 31 °C.

L'étude s'est déroulée dans des conditions d'environnement contrôlées: cycle jour/nuit de douze heures, humidité de l'air moyenne (40 %), ventilation contrôlée, pas de nuisance sonore (< 65 dB). Une nourriture équilibrée et de l'eau ont été fournies à volonté.

## Mesure des paramètres physiologiques

Les jours d'étude, les enregistrements ont été effectués pendant six heures entre midi et 18 heures. La température a été mesurée en région sous-cutanée de la queue (équivalente à la température cutanée chez l'homme) et au niveau du crâne. Afin de confirmer un phénomène observé de tonus vasoconstricteur, une étude additionnelle a été réalisée sur cinq rats exposés et cinq non exposés en injectant aux animaux un agent pharmacologique inhibiteur spécifique du tonus vasoconstricteur périphérique, la prazosine. La quantité de nourriture ingérée pendant la période d'étude a été mesurée.

Le sommeil a été étudié par polysomnographie, qui associe un électromyogramme des muscles de la nuque (le sommeil paradoxal se différencie du sommeil lent par le relâchement du tonus musculaire), un électroencéphalogramme (EEG; enregistrement de l'activité électrique du cerveau – les stades de sommeil se différenciant par la fréquence et l'amplitude des ondes EEG) et un électro-oculogramme (permettant d'identifier le stade de sommeil paradoxal, présentant des mouvements oculaires rapides ou *Rapid Eye Movement sleep* – REM sleep, en anglais).

## Résultats

**Concernant la régulation thermique:** à 31 °C, la température caudale des animaux exposés est plus faible de 1,2 °C que celle des animaux témoins (Figure 2). Cet effet n'apparaît pas à

24 °C. Il semble qu'à 31 °C, le tonus vasoconstricteur périphérique persiste chez les animaux exposés, alors qu'il est complètement inhibé chez les animaux non exposés.

L'injection du vasodilatateur prazosine a permis de vérifier sur quelques animaux que ce maintien du tonus vasoconstricteur chez les animaux exposés disparaît. Ceci suggère que le mécanisme d'action est plutôt périphérique et non au niveau du système nerveux central.

**Concernant le comportement alimentaire:** les rats dorment le jour, mais s'alimentent un peu lors de micro-éveils. À 31 °C, les animaux contrôles ne mangent presque plus pendant la période d'enregistrement, tandis que les animaux exposés continuent à manger un peu. Ceci ne se produit pas à 24 °C (Figure 3).

## Référence

Pelletier A., Delanaud S., Décima P., Thuroczy G., De Sèze R., Cerri M., Bach V., Libert J.-P., Loos N. *Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic*

*fields on energy balance in developing rats.* Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(5), pp. 2735-2746.

Figure 1

Mesures de dosimétrie effectuées dans les cages (numérotées de 1 à 8) de chaque rat du groupe contrôle (cercle blanc) et du groupe exposé (cercle noir) durant six heures.

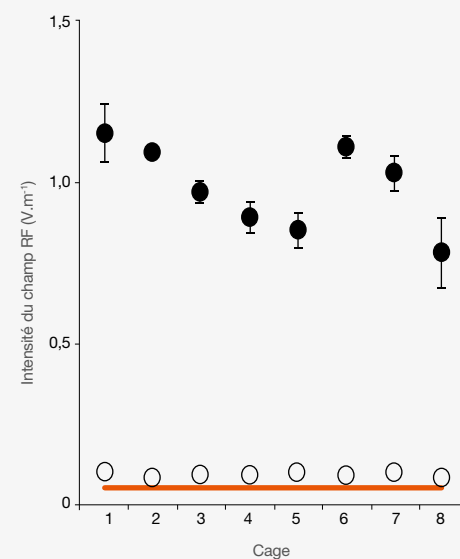


Figure 2

Valeurs moyennes ± SEM des températures corticale (carrés, en haut) et caudale (ronds, en bas) mesurées à 24 °C et à 31 °C de température d'air chez les animaux exposés aux ondes radiofréquences (symboles orange) et ceux du groupe contrôle (symboles verts). Les comparaisons intergroupes liées aux ondes radiofréquences sont indiquées: \*\* p<0,05, ainsi que celles entre les deux ambiances thermiques (24 °C vs 31 °C): ### p<0,001.

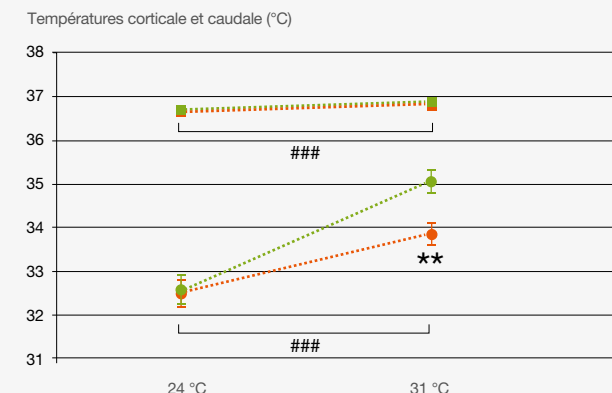
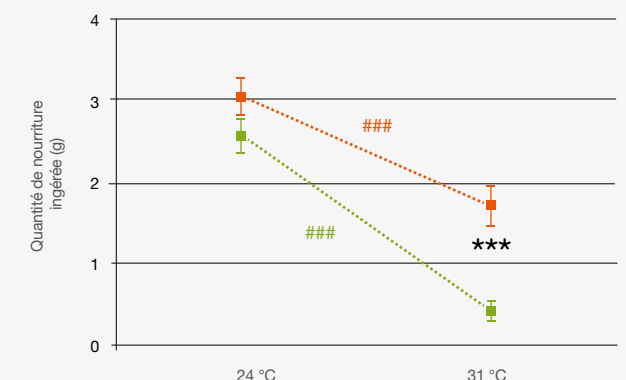


Figure 3

Valeurs moyennes ± SEM des paramètres caractérisant la prise alimentaire à 24 °C et 31 °C de température d'air chez les animaux exposés et ceux du groupe contrôle. Les signes # indiquent les différences significatives dues à la température ambiante (« effet Ta ») et le signe \* à l'exposition aux radiofréquences (effet RF) p<0,001.





➔ **Concernant le sommeil :** l'étude montre aussi une fréquence plus élevée (nombre/unité de temps) des épisodes de sommeil paradoxal (SP) à 24 °C et à 31 °C de température d'air pour les animaux exposés aux ondes radiofréquences (orange) et ceux du groupe contrôle (vert).  
\* p<0,05 (à 31 °C) et \*\*\* p<0,001 (à 24 °C).

#### Discussion - Conclusion

À une température en limite supérieure de zone de neutralité thermique (31 °C), les animaux préalablement exposés de façon chronique à des champs radiofréquences mettent en œuvre des processus d'économie d'énergie. Les conditions d'obtention de l'effet et les effets observés ne démontrent pas d'emblée un risque pour la santé humaine. On peut imaginer que les mécanismes d'économie d'énergie mis en œuvre, s'ils se prolongeaient sur une période plus longue, pourraient éventuellement conduire à une augmentation de la masse corporelle, mais cela nécessite d'être vérifié.

À noter que les phénomènes d'augmentation de fréquence des épisodes de sommeil paradoxal et de maintien du tonus vasoconstricteur sont tous deux contrôlés par le système orthosympathique.

La fragmentation du sommeil paradoxal (SP) correspond à des épisodes plus courts et plus nombreux (associés à des micro-éveils) sans modifier la durée totale du stade de SP; c'est un

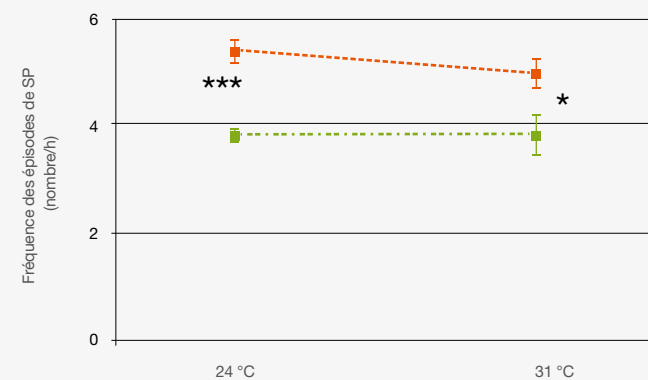
réflexe archaïque dit « d'état d'alerte » chez les mammifères permettant la survie de l'espèce vis-à-vis d'un signal environnemental perçu comme étant dangereux, telle l'approche d'un prédateur. Les paramètres habituellement perturbés lors de troubles du sommeil, comme la durée totale du sommeil, les réveils répétés, les difficultés à se rendormir, etc., ne sont pas modifiés dans cette étude, et ne montrent pas qu'une exposition chronique peut perturber le sommeil.

were exposed to continuous RF for 5 weeks at 24°C and compared with non-exposed animals (N=11). At the beginning of the 6th week of exposure, functions were recorded for 6 h, first at air temperature (Ta) of 24°C and then at 31°C. The frequency of rapid eye movement sleep episodes was greater in the exposed group, independently of Ta (+42.1% at 24°C and +31.6% at 31°C). Other effects of exposure were dependent on Ta. At 31°C, RF-EMF-exposed rats had a lower subcutaneous tail temperature

(-1.2°C) than controls at all sleep stages; suggestion of peripheral vasoconstriction was confirmed with the vasodilator prazosin. Daytime food intake was also increased (+0.2 g.h<sup>-1</sup>). RF-EMF modifies the vasomotor tone through peripheral α- adrenoceptors. Vasoconstriction restricts body cooling, as energy intake increases. Exposure then induces energy-saving processes without strongly disturbing the sleep pattern.

Figure 4

Moyennes ± SEM des paramètres caractérisant l'état de sommeil paradoxal (SP) à 24 °C et à 31 °C de température d'air pour les animaux exposés aux ondes radiofréquences (orange) et ceux du groupe contrôle (vert).  
\* p<0,05 (à 31 °C) et \*\*\* p<0,001 (à 24 °C).



#### ABSTRACT

Main functions involved in body energy homeostasis (feeding, sleep and thermoregulation) were studied in rats chronically exposed to Radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) (900 MHz, 1 V.m<sup>-1</sup>). Juvenile male Wistar rats (N=13)

## Modèles de qualité de l'air : les nouveaux outils d'aide à la décision

CONTRIBUTRICE



Laurence Rouil

Le domaine de la gestion et de la surveillance de la qualité de l'air connaît une mutation importante de ses moyens d'évaluation. La mise en œuvre en 1996 de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (dite loi Laure), transposant la Directive européenne 96/62/CE sur l'évaluation et la gestion de l'air ambiant, a permis à la France de déployer un réseau de surveillance parmi les plus complets et les plus performants en Europe. Il est opéré par 26 Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Même si l'analyse des tendances des niveaux de concentration sur de longues périodes fournit un indicateur indéniablement pertinent sur l'impact des stratégies de contrôle de la pollution, il n'en demeure pas moins ponctuel.

Les progrès technologiques basés sur une masse considérable de travaux de recherche dans le domaine de la simulation numérique de la qualité de l'air et la maturité grandissante des modèles en font désormais des outils opérationnels de base, là où ils ne constituaient qu'un complément d'information il y a seulement quelques années. La modélisation numérique connaît un véritable essor sur des applications ciblées telles que :

- la cartographie des champs de pollution pour représenter l'exposition à la pollution ;
- la prévision de court terme pour faciliter la communication vers le public et envisager des mesures de gestion d'urgence ;
- la prévision prospective de l'impact de scénarios de réduction des émissions dans une logique de gestion sur le plus long terme.

Les systèmes de modélisation opérationnels sont conçus pour affiner la prédiction des situations futures en tirant les leçons du passé. L'analyse systématique des écarts entre simulations et observations permet de les qualifier ou non pour la prise de décision et la simulation de scénarios prospectifs. Les systèmes dédiés à la cartographie de situations passées intègrent désormais les observations pour améliorer les simulations

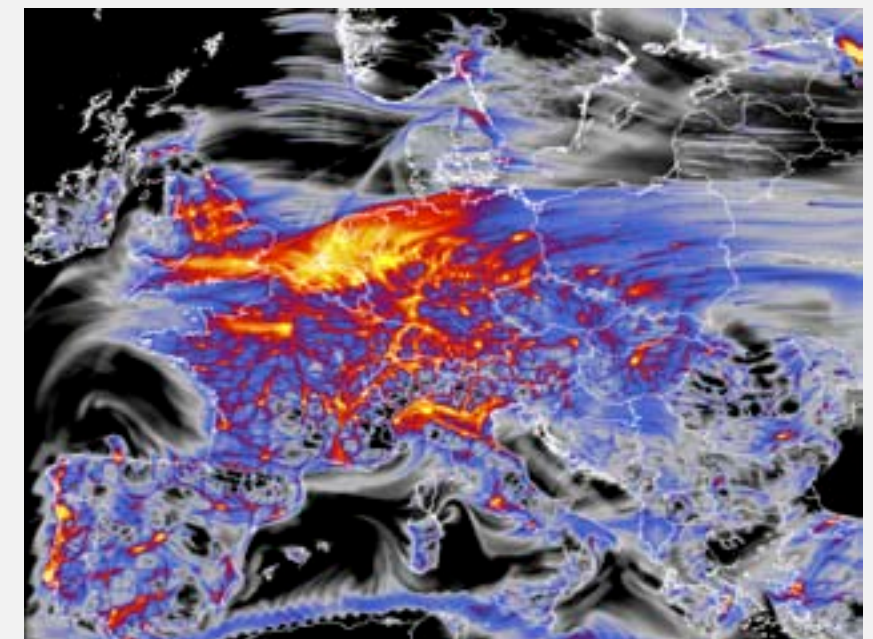
par des techniques d'assimilation des données qui s'avèrent très performantes. Les cartes ainsi produites constituent la meilleure représentation possible des phénomènes de pollution. Les travaux de recherche de l'INERIS sur le modèle de qualité de l'air CHIMERE, codéveloppé avec le CNRS, sont motivés par ces objectifs. Les performances actuelles du modèle et les progrès considérables sur la précision et la qualité des simulations en font un réel outil d'appui pour la définition de stratégies de gestion de la qualité de l'air à moyen et long termes, voire aux échelles climatiques.

#### Référence

Rouil L. *Les modèles régionaux et les modèles urbains : nouveaux outils d'aide à la décision*. Pollution atmosphérique, novembre 2012, pp. 119-121.

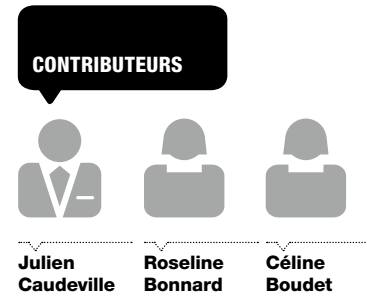
Figure 1

Simulation de la qualité de l'air à haute résolution sur la vague de pollution de janvier 2009.





# Développement d'un modèle multimédia stochastique pour évaluer l'exposition spatialisée de la population à l'échelle régionale



Le constat des inégalités environnementales et la reprise de la thématique dans les politiques publiques (axe prioritaire du second Plan national santé environnement) nécessitent la construction d'outils de diagnostic pour orienter les mesures de gestion permettant de contrôler ou de réduire les expositions en vue de garantir un niveau de « dégradation » et de risque non préoccupant. L'objectif de cette étude est de construire, dans un système d'information géographique (SIG), des bases de données environnementales spatialisées par milieu au niveau régional. Ces bases de données sont utilisées pour estimer l'exposition des populations à différents polluants. L'étude vise à identifier des zones de surexposition potentielle des populations aux polluants chimiques et leurs déterminants (types de polluant, voies d'exposition, classes de population à risque) par l'analyse des variations de l'indicateur environnemental. Un modèle multimédia d'exposition est utilisé pour le calcul des doses d'exposition de populations cibles liées à l'ingestion de produits d'alimentation, d'eau de consommation, et à l'inhalation de contaminants atmosphériques. Utilisant les équations de transfert et l'architecture du modèle développé par l'INERIS (Modul'ERS), la composante spatiale a été apportée à l'outil de calcul par son couplage avec un SIG. Pour cette étude, le modèle évalue la dose journalière d'exposition pour des mailles de 1 km<sup>2</sup> sur l'ensemble de la région Nord-Pas-de-Calais.

## Études croisées

La Figure 1 présente le schéma conceptuel des voies d'exposition et des transferts pris en compte dans le modèle. Certaines données d'entrée correspondent aux bases de données environnementales spatialisées par milieu après traitement. Pour chacune des substances prises en compte, les concentrations doivent être définies dans chaque média environnemental (sol, air, eau de surface, eau de consommation). La construction de ces variables résulte de plusieurs étapes: l'identification des sources de données, l'analyse de la qualité et de la représentativité des bases de données, leur prétraitement, la construction de données *ad hoc* (interpolation, modélisation, avis d'expert), leur discrétisation sur la maille d'étude (homogénéisation, agrégation ou désagrégation des données) et leur intégration

dans le module de calcul. Des scénarios d'exposition sont construits de manière à caractériser des groupes de référents (classe d'âge, localisation, comportement alimentaire, durée d'exposition, etc.). Pour intégrer l'incertitude paramétrique, la plate-forme est également reliée à un module probabiliste (Crystal Ball). On affecte aux paramètres les plus sensibles (facteurs de transfert) des distributions statistiques et on effectue, par procédure Monte-Carlo (tirages aléatoires d'une valeur dans la distribution de chacun des paramètres), des simulations de calcul en grand nombre pour obtenir les doses journalières d'exposition (DJE) sous la forme de courbes d'isodose ou de distributions de probabilité à partir desquelles l'incertitude peut être analysée. Dans cet article, sont présentés les résultats de modélisation de l'indicateur d'exposition aux éléments traces métalliques (ETM) sur la région Nord-Pas-de-Calais pour le cadmium, le plomb et le nickel. Des travaux similaires ont été menés sur l'ensemble du territoire français.

## Référence

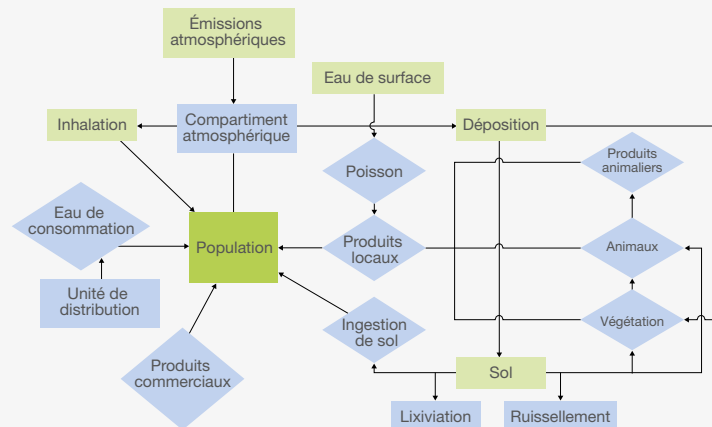
Caudeville J., Bonnard R., Boudet C., Denys S., Goavert G., Cicolella A. *Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale.* Science of the total environment, 2012, 432, pp. 297-308.

Pour le cadmium Figure 2, la carte présente deux zones où les indicateurs spatialisés du risque sont élevés. Les valeurs les plus fortes correspondent à des grandes sources de pollution bien identifiées en Région Nord-Pas de Calais (au centre dans le bassin minier: Metaleurop et Umicore). Dans cette zone, les concentrations de cadmium sont très élevées (7 mg.kg-1 en moyenne dans la maille la plus contaminée) et peuvent présenter un risque par ingestion de fruits et légumes locaux Figure 3. La structure spatiale des cartes de risque reflète l'influence d'une série complexe de facteurs démographiques, comportementaux et environnementaux qui varient dans l'espace et interagissent avec les différentes échelles spatiales. Néanmoins, la visualisation donne la possibilité d'identifier des structures spatiales simples caractérisées par une échelle locale et régionale portées par la concentration du polluant dans les sols de surface.

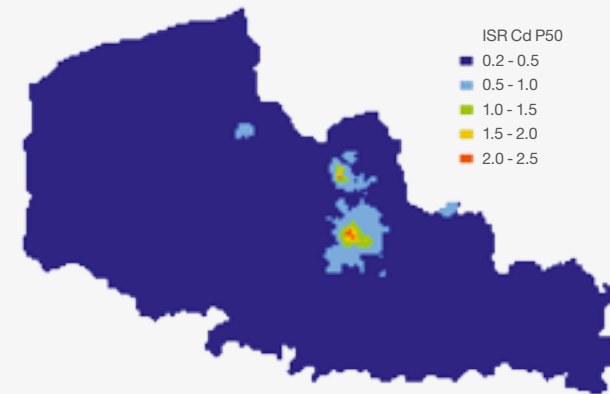
## Conclusion

Les résultats permettent de caractériser les déterminants de l'exposition (zones et populations vulnérables, part locale et ubiquitaire, voie d'exposition et polluant). Cependant, l'utilisation de données de formats et de sources différentes, non spécifiquement adaptées pour ce type d'étude, génère de nombreuses incertitudes sur l'ensemble de la chaîne de calcul. L'utilisation de ces résultats dans un cadre de gestion doit être accompagnée de cartes de variables supplémentaires pour faciliter la caractérisation de la densité d'information et du type de données à partir desquelles les DJE ont été construites en vue d'interpréter la représentativité des prédictions: par exemple, la variance de krigeage pour les sols, le nombre d'échantillons et l'écart-type pour les eaux, les zones d'émission pour les dépôts. Ces cartes peuvent également servir à orienter des collectes de données supplémentaires ou des campagnes de terrain dans les zones de densité d'information faibles, ou contribuer à mieux caractériser celles où une surex-

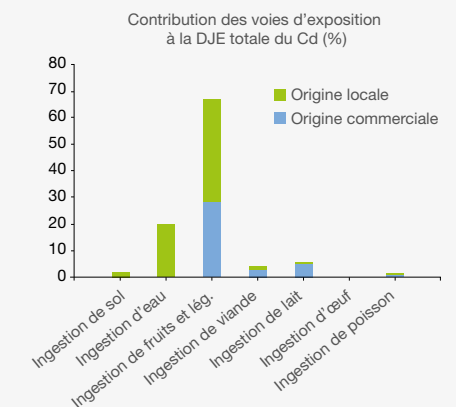
**Figure 1**  
Schéma conceptuel des voies d'exposition et des transferts pris en compte dans le modèle.



**Figure 2**  
Cartographie des indicateurs spatialisés du risque (ISR, 50<sup>e</sup> percentile) pour la classe d'âge des 2 à 7 ans en Nord-Pas-de-Calais pour le cadmium.



**Figure 3**  
Histogrammes des contributions relatives des voies d'exposition à la dose journalière d'exposition (DJE) totale différenciées selon leur provenance pour le Nord-Pas-de-Calais pour le cadmium.



## ABSTRACT

Analyzing the relationship between environment and health has become a major preoccupation for public health in France as evidenced by the national action plans for health and environment. The aim of the study is to develop

a spatial stochastic multimedia exposure model for detecting vulnerable populations and analyzing exposure determinants at a fine resolution and regional scale. A multimedia exposure model was developed by INERIS to assess the transfer of substances from the environment to human. The RESPIR project adds a spatial dimension by linking a GIS (Geographic Information System) to the model. Tools are developed using modeling, spatial analysis and geostatistic methods to build interesting variables on a 1 km<sup>2</sup> regular grid.

As application, INERIS performed a risk assessment of exposure to metals (cadmium, lead and nickel). The modeling was performed on a region of France (Nord-Pas-de-Calais). The considered exposure pathways include inhalation and ingestion. The two largest risk values correspond to an ancient industrial site (Metaleurop) and to the Lille city agglomeration. In these areas, cadmium, vegetation ingestion and soil contamination are the principal determinants of the computed risk.

position de la population est suspectée. Des cartes seront également construites pour un éventail plus vaste de polluants (polluants organiques persistants, autres éléments, traces métalliques etc.) et sur l'ensemble du territoire français.

## Collaboration

Gérard Govaert, Joint research unit UMR 6599, Heudiasyc (Heuristic and Diagnoses of Complex Systems), Université de technologie de Compiègne et CNRS.

# Pollution atmosphérique et climat : construction d'une nouvelle chaîne de modélisation

## NOTES

(1) Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

(2) *Coordinated Regional Climate Modelling Experiment.*

(3) *Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project.*

(4) <http://www.top500.org/list/2013/06/>

**M**ême si leurs impacts respectifs se caractérisent généralement par des échelles de temps et d'espaces différentes, qualité de l'air et climat restent intimement liés, autant par les processus géophysiques qui les régissent (phénomènes météorologiques et composition chimique de l'atmosphère) que par les stratégies de gestion et d'atténuation qui les concernent (stratégies d'économie d'énergie ou transition vers de nouvelles sources d'énergie). Ces interactions multiples appellent des approches intégrées afin de s'assurer que les mesures de réduction d'émissions de polluants conçues aujourd'hui demeurent efficaces à l'avenir, dans un contexte climatique différent. De telles approches intégrées doivent aussi permettre d'identifier les mesures de gestion les plus coût-efficaces et qui auraient des effets positifs tant sur la qualité de l'air que sur le réchauffement climatique.

## Une nouvelle chaîne de modélisation atmosphérique

Afin d'évaluer l'efficacité des politiques environnementales à l'horizon 2050, une nouvelle chaîne de modélisation de l'atmosphère a été construite. Elle est centrée sur le modèle de qualité de l'air CHIMERE [A] utilisé et développé par l'INERIS, notamment pour les prévisions quotidiennes de PREV'AIR ([www.prevoir.org](http://www.prevoir.org)). Pour passer d'une prévision à l'horizon de quelques jours, à une projection concernant le milieu du siècle, le modèle a été adapté pour être utilisé en conjonction avec :

- **le modèle climatique de circulation générale couplée océan/atmosphère** de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) utilisé pour le 5<sup>e</sup> Assessment Report du GIEC<sup>(1)</sup> paru en septembre 2013;
- **un modèle climatique régional** proposant un zoom sur l'Europe (mis en œuvre conjointement par l'IPSL et l'INERIS dans le cadre du programme CORDEX<sup>(2)</sup>);
- **un modèle de chimie atmosphérique globale** afin de prendre en compte l'évolution de la pollution distante (opéré par l'IPSL pour le projet international ACCMIP<sup>(3)</sup>). La constitution d'une telle chaîne de modèle est un défi de calcul inédit. La seule partie concernant la modélisation de qualité de l'air européenne (CHIMERE) représente environ 200000 heures de calcul (soit vingt ans si un seul ordinateur avait été utilisé) pour un volume de données de l'ordre de 50000 Go. Une telle initiative a pu être conduite avec succès grâce à l'expertise en calcul haute performance acquise via la participation de l'INERIS au Centre de calcul recherche et technologie (CCRT) hébergé au CEA et qui opère le 15<sup>e</sup> plus important calculateur mondial<sup>(4)</sup>.

## Projections pour 2050

La carte des maxima d'ozone pour la situation actuelle (historique, en haut à gauche de la Figure 1) reproduit les caractéristiques habituelles avec un gradient nord-sud prononcé, mis à part les principales zones polluées d'Europe de l'Ouest. D'ici 2050, dans le cas du scénario d'atténuation, les efforts relatifs à l'efficacité énergétique impactent indirectement les émissions des précurseurs de l'ozone, et la baisse d'ozone est généralisée. La diminution des niveaux d'ozone est beaucoup plus limitée pour le scénario de base (qui correspond à une situation dite « *business as usual* »). Une analyse de ➤

## CONTRIBUTEURS



Augustin Colette

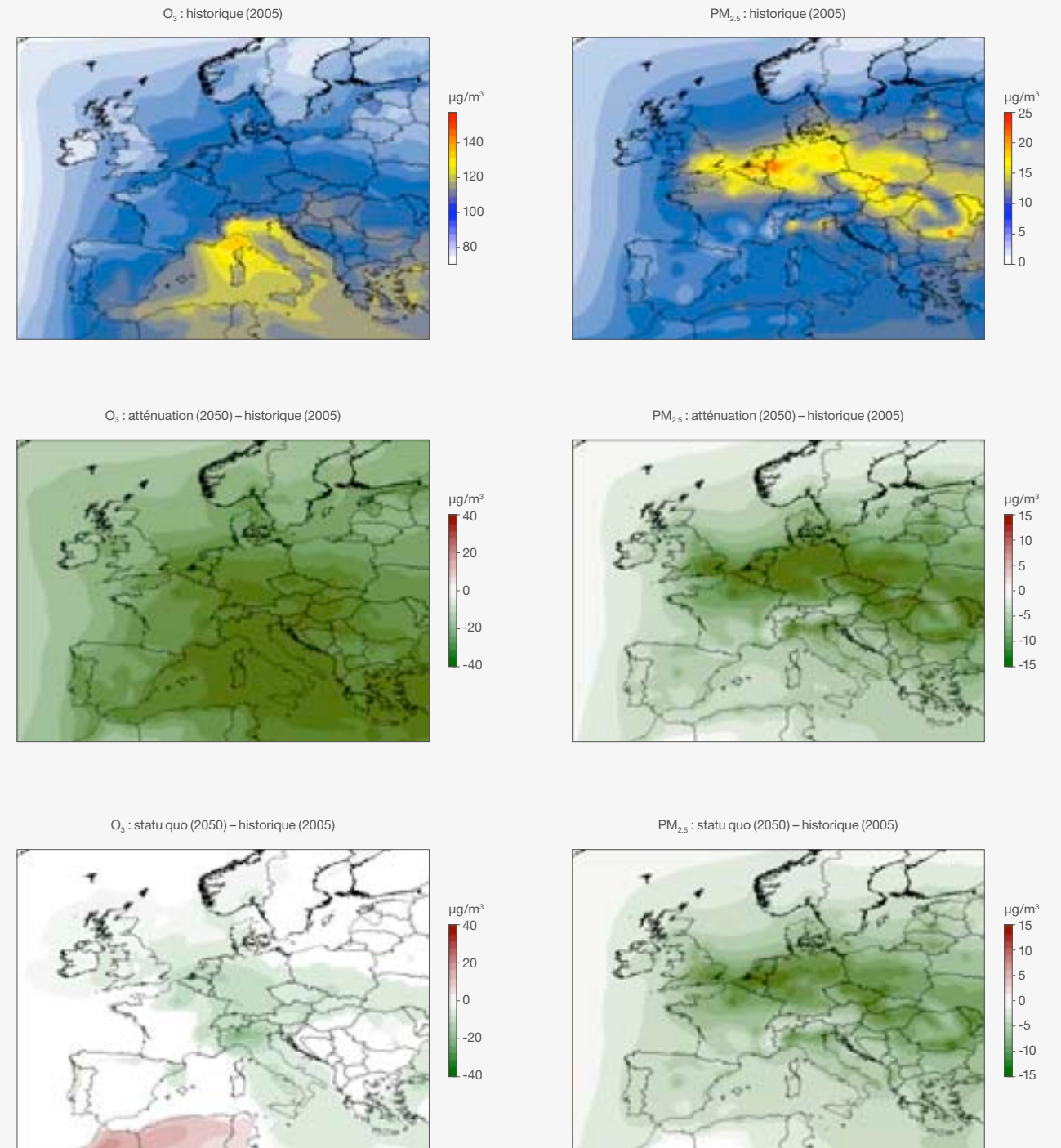
Laurence Rouil

Bertrand Bessagnet

Simone Schucht

Figure 1

Ozone (moyenne des maxima journaliers sur les trois mois d'été, à gauche) et particules (moyenne annuelle de PM<sub>2.5</sub>, à droite). La première ligne décrit la situation actuelle (historique), et les suivantes la différence – par rapport à l'historique – pour deux réalisations différant par leurs politiques climatiques (atténuation et *statu quo* ou *business as usual*) pour 2050 qui intègrent les impacts du climat global, du climat régional, des émissions de polluants locales et du transport à longue distance.



## Références

[A] Menut L., Bessagnet B., Khvorostyanov D., Beekmann M., Colette A., Coll I., Curci G., Foret G., Hodzic A., Mailler S., Meleux F., Monge, J. L., Pison I., Turquety S., Valari M., Vautard R. and Vivanco M. G. *Regional atmospheric composition modelling with CHIMERE*, Geosci. Model Dev. Discuss., 2013, 6, pp. 203-329.

Colette A., Bessagnet B., Vautard R., Szopa S., Rao S., Schucht S., Klimont Z., Menut L., Clain G., Meleux F., Curci G. and Rouil L. *European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios*, Atmos. Chem. Phys., 2013a, 13, pp. 7451-7471.

Colette A., Rouil L., Bessagnet B., Schucht S., Szopa S., Vautard R. and Menut L. *Pollution atmosphérique et climat*, Pollution atmosphérique, juin 2013, pp. 78-84, 2013b.





► décomposition montre que les émissions de précurseurs sont suffisamment significatives pour conduire à une réduction des maxima d'ozone. Même si ce scénario ignore la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique, il suppose que la législation européenne relative à la qualité de l'air sera bien implémentée, ce qui semble ici être suffisamment efficace pour réduire l'exposition aux pics d'ozone. En revanche, les émissions non européennes et l'évolution du climat global constituent des pénalités très importantes, qui contrebalancent la baisse imputable aux émissions européennes pour ce scénario *business as usual*.

La situation actuelle et l'évolution future des particules fines sont données sur les panneaux à droite de la Figure 1. La simulation historique (en haut) reproduit bien les maxima sur les zones polluées d'Europe de l'Est, ainsi que pour la vallée du Pô, Paris, Londres et le Benelux. Comme pour l'ozone, les projections pour 2050 s'accordent sur une baisse des concentrations de particules fines. En termes d'exposition, les concentrations de PM2.5 pondérées par la densité de population décroissent de 60 % et 80 % pour les scénarios respectivement *statu quo* et atténuation. Si les deux trajectoires pour 2050 diffèrent légèrement, elles sont toutefois beaucoup plus proches que pour l'ozone, ce qui souligne l'importance des politiques de gestion de la qualité de l'air pour les particules. L'implémentation des politiques énergétiques liées au changement climatique a ici moins d'impact que pour l'ozone.

### Conclusion

Les chaînes de modélisation du climat et de la qualité de l'air atteignent un degré de maturité suffisant pour proposer des projections à l'horizon 2050 intégrant les principaux facteurs d'influence. Le travail présenté ici prend en compte les rôles :

- des politiques de gestion du climat et de la qualité de l'air (via les émissions de gaz à effet de serre et des polluants et précurseurs);
- du changement climatique global et sa déclinaison régionale sur l'Europe;
- de la chimie de l'atmosphère à l'échelle globale et européenne.

Il faut toutefois souligner que de telles études d'impact du changement climatique nécessitent une quantification des incertitudes associées. Le coût et la complexité des calculs nous ont conduits à sélectionner un seul modèle de climat, mais, à l'avenir, il sera essentiel de conduire des études d'ensemble en suivant les bonnes pratiques définies par le GIEC.

### Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien du programme Primequal du ministère chargé de l'Écologie et de l'Ademe via le projet SALUT'AIR ainsi que du GIS Climat-Environnement-Société via le projet ACHIA. Les travaux de modélisation ont été effectués sur les calculateurs du Centre de calcul recherche et technologie (CCRT).

### Collaboration

Sophie Szopa et Robert Vautard (LSCE/IPSL/CEA/CNRS/UVSQ).  
Laurent Menut (LMD/IPSL/CNRS/École polytechnique/UPMC).

### ABSTRACT

Climate change and air quality are closely related: through the policy measures implemented to mitigate these major environmental threats but also through the geophysical processes that drive them. We designed, developed and implemented

a comprehensive regional air quality and climate modelling system to investigate future air quality in Europe taking into account the combined pressure of future climate change and long range transport. Using the prospective scenarios of the last generation of pathways for both climate change (emissions of well mixed greenhouse gases) and air pollutants, we can provide a quantitative view into the possible future air quality in Europe. We find that ozone pollution will decrease substantially under

the most stringent scenario but the efforts of the air quality legislation will be adversely compensated by the penalty of global warming and long range transport for the business as usual scenario. For particulate matter, the projected reduction of emissions efficiently reduces exposure levels.

## Évaluer l'oxydation du méthane par une approche isotopique pour les biogaz des installations de stockage de déchets non dangereux

CONTRIBUTEUR



Olivier Bour

L'oxydation du méthane en CO<sub>2</sub> par les bactéries méthanotrophes présentes dans les sols est un mécanisme important de réduction des émissions de méthane des sols. Ce mécanisme aérobique, nécessitant la présence d'oxygène, permet ainsi de limiter fortement les émissions diffuses de méthane provenant des fuites de biogaz des alvéoles couvertes des installations de stockage de déchets non dangereux (ISDND). Celles-ci existent du fait, entre autres, des désordres mécaniques engendrés dans les couvertures (dont les tassements différentiels des déchets sous-jacents).

Une des méthodes pour évaluer l'efficacité de ce mécanisme biologique est l'utilisation de l'analyse des isotopes naturels de l'hydrogène, de l'oxygène et du carbone au sein du biogaz et de l'air atmosphérique. L'évaluation de l'importance relative des isotopes naturels du carbone ( $\delta^{13}C$ ) et de l'hydrogène ( $\delta^2H$ ) permet ainsi de disposer de signatures de l'origine du méthane et de ses transformations. Après sa formation, la signature isotopique du méthane évolue par les mécanismes tels que la diffusion et l'oxydation par des bactéries

méthanotrophes. Le processus d'oxydation, qui est observé lors de la migration du méthane, engendre ainsi un enrichissement en isotopes lourds du méthane restant du fait de la plus grande préférence des bactéries pour les liaisons avec les carbones légers.

Cette approche isotopique a été comparée à une méthode de bilan de masse en utilisant une chambre d'accumulation avec recirculation développée par l'INERIS. L'oxydation du méthane en CO<sub>2</sub> a été évaluée par le ratio de teneurs en méthane et en CO<sub>2</sub> du biogaz lors de la migration de celui-ci au sein des couvertures de sol, dans le cadre d'une collaboration entre l'INERIS et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Les deux méthodes ont mis en évidence une oxydation d'autant plus faible que les flux mesurés des fuites étaient importants, montrant ainsi la limitation du mécanisme biologique pour les fuites importantes de biogaz. Les enseignements de ces travaux sont utilisés dans la conception de fenêtre et d'anneau oxydant, systèmes de traitement passif du biogaz pour les ISDND.

### Référence

Widor Y. B., 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 ( $^{13}C$  &  $^{18}O$  &  $D$  CH<sub>4</sub>) approach. Waste Management, 2012, 32, pp. 1685-1692.

### Figures 1 et 2

Anneau oxydant autour d'un puits de captage permettant de concentrer les flux diffus de biogaz et de traiter le méthane par oxydation : massif de gravier assurant la diffusion (1), massif de traitement du méthane (compost calibré) (2).



## Quel retour d'expérience sur le retour d'expérience ?

CONTRIBUTEUR



Jean-Christophe  
Le Coze

Il existe depuis une dizaine d'années un sentiment de déjà-vu pour les observateurs des questions de sécurité industrielle. À la vague des grands accidents emblématiques et médiatisés des années 80 semble succéder celle des années 2000. Aux Tchernobyl, Bhopal, Piper Alpha, Challenger ou Zeebrugues, il est possible aujourd'hui de substituer les accidents plus récents de Columbia, Toulouse, Texas City, Deep Water Horizon, Fukushima ou encore du Costa Concordia. Ainsi, cet air de déjà-vu tient à la proximité dans le temps de plusieurs événements majeurs dans des domaines à risques différents [A]. Mais alors, pourquoi n'apprend-on pas du passé? Pourquoi le retour d'expérience ne permet-il pas d'éviter la répétition de ce type d'événements? La difficulté d'apporter une réponse à cette question est liée en grande partie à la fragmentation des savoirs et des études réalisées dans le domaine du retour d'expérience. En effet, celui-ci peut être étudié selon une multitude de points de vue. Or, pour comprendre les difficultés et limites du retour d'expérience, il convient non seulement de multiplier les angles d'interprétation, mais aussi de les combiner.

### Deux illustrations: la collecte d'informations et les politiques publiques

Les remontées d'information dans les systèmes à risque font face à des logiques contradictoires. D'un côté, pour beaucoup d'acteurs de la prévention, un des piliers de la sécurité est le respect des procédures. D'un autre côté, il est admis depuis quelques dizaines d'années que les procédures ne peuvent pas être suivies à la lettre. Pour reprendre la terminologie ergonomique, il existe toujours un écart entre le prescrit et le réel, ou encore entre le réglé et le géré. La réalité déborde les cadres et l'adaptation des individus (pilote, opérateur en salle de contrôle, etc.) est donc nécessaire. Cette contradiction complique les remontées d'information. C'est ce que Michal Tamuz a pu montrer en étudiant les systèmes de collecte d'information dans le domaine aérien aux États-Unis [B]. Si la remontée d'information est visée par les autorités de contrôle, tout écart à la règle est passible de sanctions et peut donner suite à une action judiciaire. Pourtant, tout écart de procédure est aussi une indication précieuse pour l'appréciation des situations réelles d'exploitation pour les compagnies. Équilibrer la remontée d'information face à cette contradiction constitue un enjeu et une difficulté qui se trouve à l'intersection de la société civile, des régulateurs, de la justice et des entreprises. Le deuxième exemple concerne les politiques publiques [C]. Thomas Birkland, politologue, montre qu'une catastrophe technologique, même médiatisée, n'aboutit pas nécessairement à des changements pertinents susceptibles de participer à la prévention de la récurrence des accidents. En effet, le passage de l'événement à l'analyse puis aux recommandations est en soi un processus indéterminé d'interactions, un construit, où les enjeux mettent en relation divers acteurs, dont les acteurs politiques mais aussi les médias, groupes de pression, associations et entreprises privées. Il s'opère une relation complexe dont les résultats ne sont jamais écrits à l'avance, même dans les systèmes au sein desquels existent des dispositions favorisant l'indépendance des bureaux d'investigation (l'exemple du bureau d'enquête transport NTSB – *National Transportation Safety Board*), aux États-Unis, étant souvent pris comme illustration [D]).

### Références

[A] Le Coze, J.-C. *New models for new times. An anti dualist move.* Safety Science, 2013a., 59, pp. 200-218.

[B] Tamuz M. *Learning disabilities for regulators. The perils of organizational learning in the air transportation industry.* Administration & Society, 2001, 33, (3), pp. 276-302.

[C] Birkland T. *Disasters, lessons learned, and fantasy documents.* Journal of Contingencies and Crisis management, 2009, 17, (3).

[D] Stoop J., Roed-Larsen S., 2010, *Public safety investigations – A new evolutionary step in safety enhancement?*, Reliability Engineering and System

Safety, 2011, 94, pp. 1471-1479.

[E] Le Coze J.-C. *What have we learned about learning? Post disasters reflections.* Safety Science, 51, 2013b, pp. 441-453.

### Mettre en perspective les avancées

En fait, il n'existe pas vraiment aujourd'hui dans la littérature de démarche d'ensemble du retour d'expérience sur le retour d'expérience. Les études qui sont menées sur ce thème sont bien souvent conduites de manière séparée, indépendante, sans chercher à restituer la problématique globale. Cette situation n'est évidemment pas propre à ce sujet, puisque la dynamique de la production scientifique d'une manière générale suit largement ce type de trajectoire. Cette dynamique appelle pourtant de temps à autre une prise de recul afin de mettre en perspective les avancées dans une vision plus large. Mais alors, comment aborder ce problème en ce qui concerne le retour d'expérience?

Pour cela, il est suggéré de distinguer, dans les différentes études aujourd'hui disponibles, plusieurs aspects [Figure 1]:

- **les acteurs** qui font l'objet de l'étude comme les inspecteurs des autorités de contrôle, les responsables sécurité des entreprises, les investigateurs professionnels, les consultants;
- **l'intensité des événements** considérés, dont les signaux faibles, les presque accidents, les incidents, les accidents ou encore les catastrophes;
- **les angles disciplinaires** privilégiés par l'étude, comme la psychologie, l'ergonomie, la sociologie, l'ingénierie ou encore les sciences politiques;
- **l'industrie** qui fait l'objet de l'étude, à savoir l'énergie, les transports (aviation, ferroviaire, maritime) ou la chimie;
- **les étapes** considérées, dont le report, la sélection, l'investigation, la dissémination, ou encore les recommandations et mises en œuvre;
- **les disciplines scientifiques** qui sont mobilisées, entre la psychologie, la sociologie, les sciences politiques ou les sciences de gestion.

### Conclusion

Ainsi, en mobilisant et en croisant grâce à ce cadre des études qui portent sur des dimensions différentes du retour d'expérience, il est possible de produire une vision plus panoramique que ne le permettent les études isolées, mais aussi d'envisager les comparaisons entre domaines [E].

Figure 1

Une vision d'ensemble pour structurer le retour d'expérience du retour d'expérience.



### ABSTRACT

The disasters of the past years in different high risk industries (e.g. aviation, offshore, nuclear) push for a moment of reflexivity about learning from accidents. In the aftermath of these events, one wonders whether learning from accidents remains a viable endeavour for companies and states or whether recurring technological disasters such as these seriously and definitely undermine any attempt to prove the feasibility of learning. Progress has certainly been made in the past, but apparently not enough so to be able to reach the highest safety levels,

even in systems with dedicated resources. As a result of the current situation, some have been able to argue that 'we don't learn about disasters'. Although appealing and right, this is a very generic statement. There are many studies addressing aspects of learning from accidents which are in a position to bring insights about the drawbacks of learning. But this wealth of research is also part of the problem. When one wants to step back and to look broadly at the topic, to understand the reason why 'we don't learn', one is left with a fragmented scientific literature covering a very large spectrum of interests and views on the subject. This short paper tackles this problem by designing a framework to organise the diversity of studies.



# Modélisation numérique des réservoirs soumis aux explosions et aux impacts



De 2008 à 2012, le projet VULCAIN a permis de développer des outils simples et fiables pour l'analyse de la vulnérabilité des réservoirs atmosphériques aux surpressions, améliorant ainsi l'évaluation des effets dominos liés aux explosions industrielles sur les sites de stockages **Figure 1**.

Depuis 2012, des travaux complémentaires en partenariat avec le laboratoire PRISME ont été réalisés. L'objectif de ces nouveaux travaux basés sur la modélisation numérique des phénomènes est de compléter le projet en intégrant aux modèles le comportement plastique des matériaux, la rupture de coques minces ou encore la cinétique de perte de confinement. Les modélisations avancées doivent également permettre d'intégrer des paramètres complémentaires susceptibles d'in-

fluencer le comportement de la structure tel que des conditions aux limites imparfaites, un comportement instable du liquide contenu ou des renforcements ponctuels du réservoir **Figure 2**. La démarche entreprise consiste tout d'abord à valider la modélisation numérique dynamique en comparant les résultats de modélisation et les essais réalisés dans le cadre de VULCAIN, puis à définir des critères d'endommagement alimentant les modèles simplifiés.

Les modélisations sont réalisées en deux phases :

- une première phase d'interaction fluide-structure correspondant à la modélisation de la propagation d'une onde de choc dans un milieu eulérien jusqu'à interaction avec un réservoir rigide. Cette étape vise à reproduire la réflexion de l'onde sur une surface cylindrique;

- une seconde phase de modélisation lagrangienne d'un réservoir métallique soumis au chargement de surpression asymétrique. Cette étape vise à modéliser le comportement mécanique du réservoir pour déterminer son niveau d'endommagement **Figure 3**.

Les modélisations eulériennes ont montré une capacité de reproduction des signaux de surpression limitée par la capacité de calcul. La modélisation complète du phénomène nécessite une finesse de maillage et un domaine de résolution très importants, complexes à reproduire intégralement pour des échelles industrielles. Cependant, des solutions analytiques de génération d'onde de pression en champ lointain couplées avec un modèle eulérien en champ proche d'une structure apportent des résultats très intéressants et constituent une alternative à une détermination analytique complexe de la pression de réflexion sur la structure.

Les modélisations mécaniques réalisées ont permis de valider la résolution dynamique explicite d'un modèle lagrangien de réservoir soumis aux effets d'une onde de surpression en termes de déplacement et de déformation plastique. Ces modélisations peu usuelles nécessitent néanmoins de respecter de nombreux critères afférents au chargement, aux caractéristiques matériaux et au maillage du réservoir.

Les travaux à venir s'intéresseront aux critères de rupture des réservoirs endommagés par une explosion et à l'influence du comportement du liquide contenu.

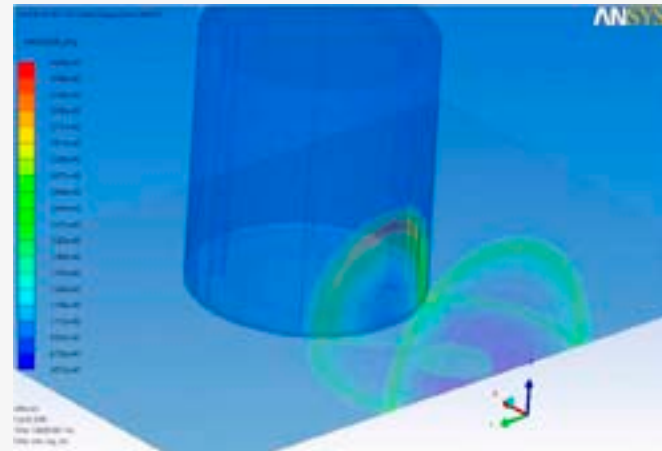
**Figure 1**

Photographie d'un réservoir atmosphérique flambé (Toulouse) – Essai de flambement des réservoirs soumis à une explosion (VULCAIN).



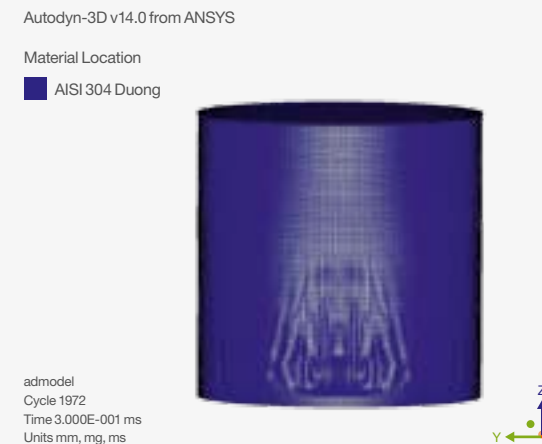
**Figure 2**

Prédiction numérique de la réflexion d'une onde de choc sur un réservoir atmosphérique (Ansys-Autodyn).



**Figure 3**

Modélisation des éléments finis du comportement du réservoir soumis à une surpression (Ansys-Autodyn).



## Références

Duong D. H. *Étude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe*, Rapport de thèse, Université d'Orléans – Laboratoire PRISME, 2012.

Blanc L. *Étude numérique de l'interaction d'une onde de choc avec une structure*, Rapport de stage ingénieur-master, ENSI de Bourges, 2012.

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, 16 (9), pp. 1023-1041.

Duong D.-H., Hanus J.-L., Bouazaoui L., Regal 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, 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. Reliable tools to predict atmospheric oil tank blast resistance have been developed during the VULCAIN research project (2008-2012). Since then, some additional works were engaged involving advanced numerical eulerian and lagrangian models. Eulerian models of blast wave propagation show good agreement with the experimental data from VULCAIN but the results are limited by the processing capacity. Modeling of a real-scaled blast over

an atmospheric tank seems still difficult without very high processing calculators. As a solution, analytical evaluation of far-field pressure waves coupled with an eulerian model in the proximity of the structure can provide very interesting results for reflected overpressure. Lagrangian finite elements models of tanks subjected to the effects of overpressure provide good agreements in terms of displacement and plastic deformation with respect of specific criteria for loading, material and meshing. Further works will introduce fracture analysis and eulerian-lagrangian coupled simulations.

# Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage



Le sous-sol français renferme plus de 500 000 cavités naturelles et anthropiques, dont plusieurs dizaines de milliers de carrières souterraines, certaines ayant été réalisées dans la craie. Ces cavités ont généralement été creusées à sec, au-dessus du niveau des nappes phréatiques pour s'affranchir du coût d'un pompage. Des effondrements historiques (Château-Landon 1907, Clamart 1961) ont été associés à l'effet de l'eau. Dans un contexte où le battement des nappes peut se traduire par l'ennoyage ou le dénoyage de vides souterrains, la question de la stabilité de ces cavités se pose. Ce travail est réalisé dans le cadre du programme d'appui technique intitulé « Risques liés à la présence de cavités souterraines et versants rocheux instables » qui constitue l'un des objectifs de la Direction générale de la prévention des risques du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

## Rôle de l'eau dans les effondrements de carrières souterraines

Plusieurs effondrements meurtriers de carrières souterraines se sont produits en France au XX<sup>e</sup> siècle: Château-Landon en Seine-et-Marne (7 morts en 1910), Clamart dans les Hauts-de-Seine (30 morts en 1961), Chanteloup-les-Vignes dans les Yvelines (1 mort en 1991), Neuville-sur-Authou dans l'Eure (1 mort en 2001).

Afin d'améliorer la gestion de ce risque, l'INERIS étudie les mécanismes initiateurs de rupture en présence d'eau. Trois approches complémentaires ont été utilisées:

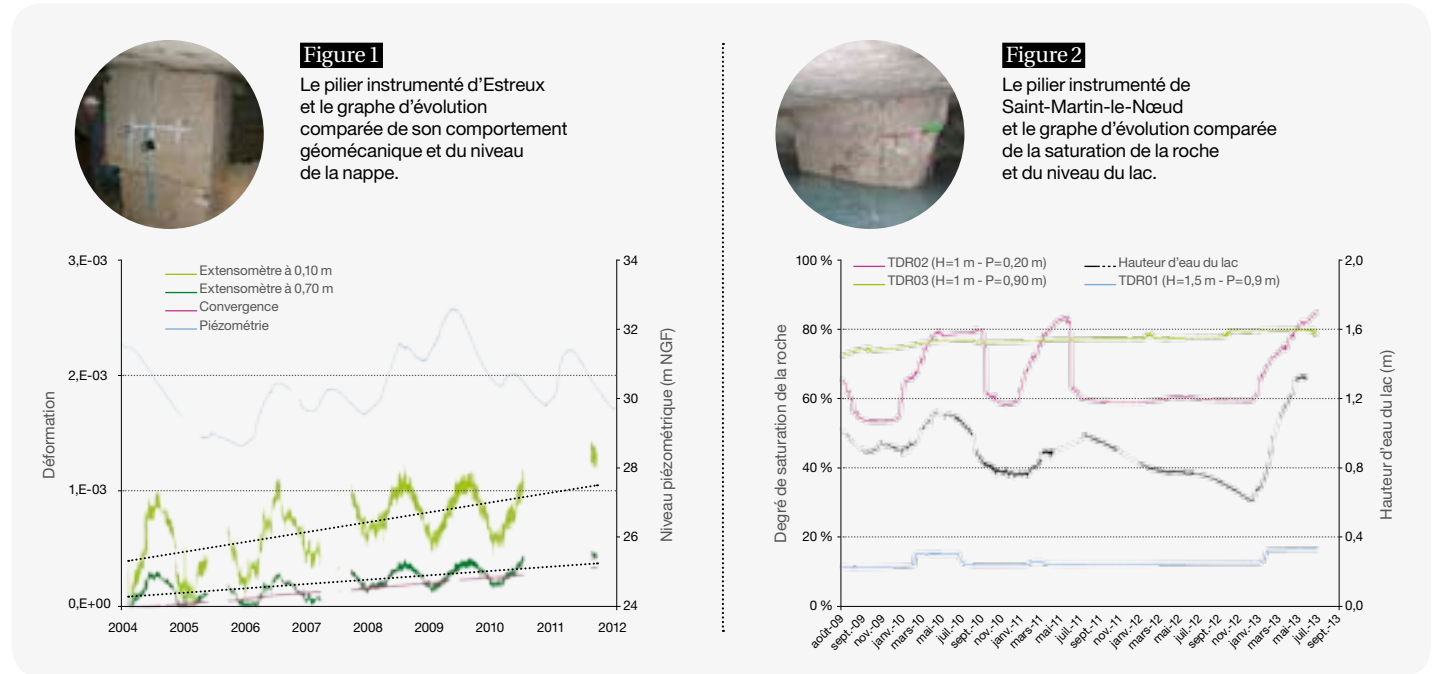
- l'identification de la sensibilité des roches susceptibles d'être à l'origine des effondrements;
- l'analyse par retour d'expérience des données d'effondrements suffisamment bien documentés;
- l'instrumentation de piliers au sein de carrières souterraines partiellement ennoyées.

Des tests de laboratoire, réalisés sur des échantillons prélevés dans plusieurs cavités ont montré que les craies pouvaient présenter des comportements très variés même si, généralement, elles s'avèrent très poreuses et sensibles à l'eau. La question se pose dès lors de savoir si le battement des nappes serait instable de fragiliser les piliers en contact avec l'eau souterraine. Le retour d'expérience a pour l'instant porté sur deux effondrements catastrophiques de carrières souterraines de craie, toutes deux abandonnées depuis plusieurs décennies:

- à **Château-Landon**, en réponse à une crue brutale et à de fortes précipitations, la nappe est brusquement montée et a envahi les parties basses de la carrière, conduisant à un effondrement en masse de 4 ha;
- à **Clamart**, où les conditions de stabilité de la carrière étaient déjà proches de la rupture durant l'exploitation, 3 ha se sont effondrés; le niveau le plus profond était alors ennoyé et de fortes précipitations ainsi qu'une fuite d'eau furent observées à la surface du site quelques jours avant la catastrophe, sans que l'on puisse toutefois préciser le rôle de ces événements.

### Sites expérimentaux de la craie du Bassin parisien

Du fait de la sensibilité particulière de la craie, l'INERIS a choisi d'instrumenter deux piliers situés dans des carrières souterraines de craie partiellement ennoyées: à Estreux, dans le



Nord, depuis 2004 et à Saint-Martin-le-Nœud, dans l'Oise, depuis 2009. Ces carrières, situées à 20 m de profondeur environ, ont été exploitées par la méthode des chambres et piliers, puis abandonnées au XIX<sup>e</sup> siècle. L'instrumentation porte sur les paramètres géomécaniques des piliers (convergence verticale, extension horizontale), sur la teneur en eau de la roche et sur le niveau de la nappe.

À Estreux, la carrière s'ennoye partiellement avec une fréquence voisine de cinq à dix ans. Hors période d'ennoyage, on observe que les variations de niveau de la nappe induisent une réponse géomécanique synchrone de la craie: la vitesse d'extension horizontale du pilier et, dans une moindre mesure, sa vitesse de convergence verticale fluctuent en lien avec le niveau d'eau **Figure 1**.

À Saint-Martin-le-Nœud, les parties basses de la carrière renferment plusieurs lacs souterrains pérennes où baignent des piliers. Le suivi porte sur l'un d'eux pour connaître l'impact du battement du lac sur la craie. On observe un gradient horizontal de saturation de la craie qui varie avec le niveau du lac: les fluctuations de ce dernier font varier la teneur

en eau de la roche jusqu'à au moins 0,20 m au sein du pilier **Figure 2**. Du fait d'une meilleure résistance de la roche qu'à Estreux, aucune variation significative des paramètres géomécaniques enregistrés ne semble être corrélée à l'évolution du niveau d'eau.

### Conclusion

Le retour d'expérience des effondrements catastrophiques, les mesures en laboratoire et les observations *in situ* constituent autant d'outils destinés à mieux comprendre pour pouvoir prédire le rôle de l'eau dans le déclenchement d'instabilités des carrières souterraines de craie. La question essentielle est de savoir, notamment dans un contexte de changement climatique, si le battement des nappes baignant ces cavités risque d'augmenter le niveau du risque associé.

### Remerciements

Nous remercions le Conservatoire d'espaces naturels de Picardie qui autorise l'accès à la carrière de Saint-Martin-le-Nœud, site majeur d'hivernage de chiroptères.

## Références

Gombert P., Auvray C., Lafrance N., Al Heib M., *In situ and laboratory tests to evaluate the impact of groundwater table fluctuations on stability of underground chalk mines in the Paris basin (France)*. Water Rock Interaction, 9-14 June 2013, Avignon, France.

Didier C. *Impact of climate change on the stability of underground shallow cavities. The case of a tragedy in France in relation with the Seine flooding in 1910*. ISRM International Symposium, 23-27 October 2010, New Delhi, India.

Gombert P., Charmaoui A., Didier C., d'Hotelans A. *Impact du changement climatique attendu sur la stabilité des cavités souterraines en France d'après l'étude des cavités artificielles*. IV Int. Symp. on karst, 27-30 April 2010, Malaga, Spain.

Gombert P., Damart V. *Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage*. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur, 4-6 juillet 2012, Bordeaux, France.

Charmaoui A., Gombert P., Al Heib M., Franck C., Didier C. *Impact of the Expected Climate Change on the Stability of Underground Cavities in France*, 2nd Int. Conf. on Climate Change, Impact and Responses, 8-10 July 2010, Brisbane, Australia.

Gombert P., Cherkaoui A., Al Heib M., Didier C., Bentivegna G. *Rôle des fluctuations piézométriques sur la stabilité des cavités souterraines de la craie du bassin Parisien dans le contexte d'un changement climatique*, 23<sup>e</sup> Réunion des sciences de la terre, 25-29 octobre 2010, Bordeaux, France.



In order to prevent mine collapses, INERIS studies the mechanisms that initiate rock failure under the influence of water level. Three complementary ways were developed: 1) identification of the behavior of water sensitive rocks, 2) feedback from previous mine collapses and 3) instrumentation of

pillars within partially flooded mines. The feedback from the abandoned Château-Landon chalk mine collapse (7 deaths in 1910) illustrates the key influence of the sudden water table rise: laboratory tests confirmed chalk mechanical properties are altered in the presence of water (Didier, 2010). The Clamart collapse (30 deaths in 1961) affected another abandoned chalk mine where stability conditions were close to failure during extraction. Although the water role appears less clear in this context, the deepest level was flooded at the time of the

collapse and heavy rain have been noticed a few days before the disaster. Concerning in situ experimental monitoring, geomechanical pillar parameters, rock water contents and groundwater table are performed. At Estreux site, the chalk mine is partially flooded every 5-10 years: the convergency and extension speed of the pillar varies with the water table. At Saint-Martin-le-Nœud site, a pillar located in an underground permanent lake shows a gradient of rock water content that fluctuates according to the lake level.



## Outils numériques et géophysiques appliqués à la prédiction de la sismicité dans les mines profondes

CONTRIBUTEUR



Marwan Al Heib

La méthode de longue-taille foudroyée est une des méthodes employées au cours des dernières années dans l'exploitation des mines de charbon européennes. Cette méthode a permis d'augmenter sensiblement le rendement des travaux (panneaux de 200 m de large et plus de 1 km de long). Les quartiers de mine sont formés de plusieurs panneaux, ces vastes surfaces exploitées induisant une redistribution du champ de contraintes initiales environnant.

En présence de failles importantes situées à proximité des chantiers, les variations de contraintes sont susceptibles d'induire un « rejeu » de ces failles à l'origine des phénomènes dynamiques potentiellement ressentis par les occupants de la surface. Les mines profondes correspondant à des contextes géologiques et d'exploitation sont globalement favorables à ce type de phénomènes (profondeur supérieure à 1 000 m, présence de failles, nombreux niveaux exploités, conditions géologiques complexes, etc.). En France, le développement d'outils de prévention et de suivi a été initié par l'INERIS pour assister Charbonnages de France dans la

gestion de la sismicité induite durant l'exploitation, avant d'être poursuivi pour mieux comprendre et prévoir la survenue d'événements sismiques dans le contexte de mines profondes en Europe et dans le monde.

### Phénomènes dynamiques et sismicité induite

La sismicité induite est caractérisée par le développement d'événements sismiques d'une magnitude comprise entre -0,2 et 4 sur l'échelle de Richter. Un phénomène dynamique résulte d'une rupture brutale du massif rocheux accompagnée de l'émission d'ondes sismiques. Ces dernières sont principalement ressenties dans le voisinage du foyer sismique (zones de rupture situées généralement dans une sphère de 2 km de rayon autour des quartiers exploités) où d'importants dégâts peuvent être observés dans les chantiers. Elles peuvent toutefois également être perceptibles en surface et être alors sources de nuisances (vibrations, bruits) ou de désordres (dommages aux biens). Plusieurs facteurs peuvent favoriser la génération d'une telle sismicité :

- profondeur importante, contraintes tectoniques initiales élevées et anisotropes, roches au comportement fragile (compétentes et résistantes) ;
- fracturation du massif, notamment si elle est parallèle à l'excavation ;
- zone exploitée à proximité d'une importante surface exploitée, etc.

### Méthodologie de prédiction de la sismicité induite

Pour améliorer les conditions d'exploitation des mines profondes, une méthodologie opérationnelle a été développée par l'INERIS. Elle associe la modélisation numérique, la surveillance sismique (incluant l'analyse des incidents et accidents) et les mesures des contraintes. Elle permet d'aider à la prédiction de la survenue et de l'intensité de phénomènes dynamiques. Deux échelles peuvent être considérées : la grande échelle est celle de l'exploitation (plusieurs kilomètres), l'échelle locale est celle de l'ouvrage (plusieurs mètres).

**Surveillance sismique** Les réseaux sismiques (local et global) constituent l'outil principal de gestion du risque de sismicité induite. Un réseau sismique doit systématiquement être

mis en œuvre pour assurer la surveillance de la sismicité associée à l'avancement de l'exploitation. Une transmission continue des données est assurée vers un site de traitement automatique des sismogrammes, permettant ainsi de déterminer les paramètres essentiels des événements : localisation du foyer, magnitude, énergie libérée et paramètres à la source. L'historique de la sismicité induite d'une zone permet de déterminer et de prédire le niveau de la sismicité et les mesures de mitigation envisagées de la prochaine exploitation. La localisation des événements et leurs caractéristiques constituent une source de données essentielles pour la calibration des modèles numériques.

### Modélisation numérique à l'échelle locale et globale

La modélisation numérique est un appui précieux à la planification des travaux miniers. On l'utilise notamment pour déterminer l'orientation optimale des panneaux, l'influence de l'exploitation sur les panneaux voisins et les ouvrages en surface, ainsi que la localisation des zones les plus susceptibles de présenter un comportement dynamique. Ce type d'outil présente de nombreux avantages : possibilité de simuler le processus d'extraction, flexibilité pour l'étude de différentes configurations, haute précision, etc.

La méthode dite de « déplacement de discontinuité » (DD) a été améliorée et appliquée par l'INERIS à la problématique de l'exploitation minière. Cette méthode, très utile pour les mines tabulaires, permet la prise en compte des failles à grande échelle et l'intégration au calcul d'un grand nombre de veines et de failles. Les zones de concentration de contraintes sont ainsi potentiellement identifiées. Les méthodes des éléments finis et des éléments distincts sont, pour leur part, employées dans le but d'identifier les mécanismes de rupture et la réponse du massif à l'échelle de l'ouvrage. Par conséquent, les problèmes à grande échelle peuvent être traités plus aisément. Les failles et les panneaux sont représentés sous la forme d'un plan. Deux codes de calcul (SUIT3D, FAULT3D) ont été développés par l'INERIS en collaboration avec l'Académie des sciences de Saint-Petersbourg (Russie).

La validation de la méthodologie développée est réalisée en s'appuyant sur de configurations simples. Des mesures de contraintes sont fortement recommandées

par cette méthodologie, notamment pour les mines susceptibles de générer une activité sismique. Elles sont réalisées en trois situations :

- concevoir un nouveau panneau ;
- contrôler l'évolution des contraintes en raison des activités minières ;
- comprendre l'apparition de conditions d'accident minier.

### Conclusion

Cette méthodologie opérationnelle a été appliquée aux mines de charbon françaises afin de mieux planifier les travaux miniers et de mieux prédire les conséquences de phénomènes dynamiques. Elle est également développée et améliorée grâce aux projets de recherche que l'INERIS mène avec ses partenaires européens. Les projets I2MINE (*Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future*) et RFCS (*Research Fund for Coal and Steel*) permettent de continuer son développement et son application aux nombreuses mines profondes à travers l'Europe.

## Références

Al Heib M. *Numerical and geophysical tools applied for the prediction of mine induced seismicity in French coalmines*. International Journal of Geosciences, 2012, 3 (24A), pp. 834-846

Abdul-Wahed M. K., Al Heib M., Senfaute G. *Mining-induced seismicity: seismic measurement using multiplet approach and numerical*

*modelling* – International Journal of Coal Geology, 2006, 66, pp. 137-147.

Renaud V., Driad L., Al Heib M., Noirel J. F. *Back-analysis of the rockburst in Frieda 5 and design program for panel in Seam 6 (HBL-France)*, «Rockbursts 2002», International symposium research and prevention

systems, Ustron, 12-15 November 2002.

Al Heib M., Sylla M., Josien J. P. *Numerical modelling and experience for design and mines control*. Application to Provence coalmines ISBM 2003, New Dehli, India, 1-5 November 2003. Ed. Ghose and Bose (Oxford & IBH publishing Co. Pvt. Ltd.), volume 2, pp 1617-1637.

## ABSTRACT

Active and disused mine workings may, in some specific contexts induced seismic activity. Trying to understand and, even more, predict this kind of events appears to be very complex. INERIS developed a

methodology based on coupling seismic analysis (monitoring) and numerical modelling. It enables to define the location of the tremors as well as the released induced stresses. This methodology appears to be efficient for detecting areas of coalmines prone to rockburst hazard as well as a powerful tool for assisting the planning of underground workings in complex geological and mining conditions.

## Retour d'expérience sur la catastrophe de Coalbrook

CONTRIBUTEUR



Christophe Didier

La compréhension et la maîtrise des phénomènes dangereux se sont toujours largement appuyées sur la notion de retour d'expérience, qui permet aux experts d'identifier les dysfonctionnements à l'origine des accidents et aux autorités de prendre des mesures permettant d'éviter que de tels événements ne se reproduisent. Pour consolider son expertise, l'INERIS systématisé autant que faire se peut ce type de démarche [A]. En étroite collaboration avec l'Université de Johannesburg (Pr. Nielen Van der Merwe), une analyse en retour d'expérience a ainsi été mise en œuvre sur la catastrophe de Coalbrook, en Afrique du Sud, qui reste l'une des plus dramatiques de l'histoire de l'industrie minière et qui a fait 437 morts à la suite de l'effondrement spontané de plus de 300 ha.

### Contexte

La géologie de la mine de Coalbrook, située à 100 km au sud de Johannesburg, se caractérise par une alternance de veines de charbon, de grès et de schistes surplombées par un puissant filon horizontal de dolérite (40 m d'épaisseur, 80 m à l'aplomb des chantiers, Figure 1). Les travaux, initiés en 1905, se sont tous développés au sein de la veine principale de charbon (6 m d'épaisseur, 140 m de profondeur).

Durant les trente premières années, l'exploitation permit d'assurer un taux de défrètement (noté  $\tau$ ) voisin de 50%. Pour augmenter la production, le schéma n'eut alors de cesse d'évoluer (diminution de la taille des piliers, recoupes des bandes vierges séparant les quartiers) pour atteindre un  $\tau$  voisin de 60% en 1950, date à laquelle une centrale thermique fut implantée dans le secteur. Pour assurer son alimentation, la production de la mine dut rapidement être multipliée par six. En dépit de conseils d'experts, l'ouverture ou hauteur exploitée des chantiers passa alors de 2,40 m à 4,30 m, voire localement à 5,50 m. Enfin, l'exploitant décida de tester la possibilité de « réexploiter » les anciens quartiers en surélevant les galeries initiales (exploitation conjuguée du bas-toit et d'une partie des piliers).

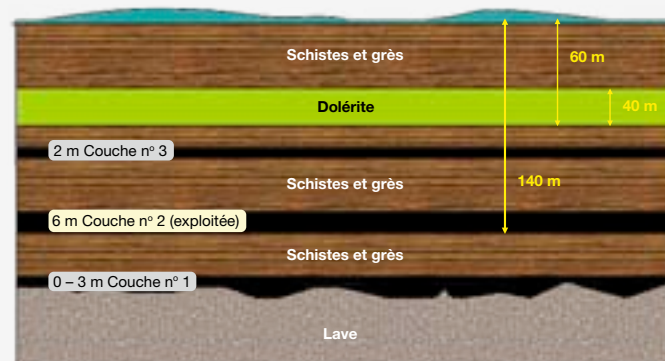
Une expérimentation fut donc entreprise dans le Quartier 10 (Figure 2). Le suivi du comportement de la zone fut limité à de simples observations visuelles. Après deux mois, aucun signe particulier n'ayant été observé, on conclut au succès de l'expérimentation et il fut décidé d'en généraliser le principe à l'ensemble des anciens chantiers de la mine.

### La catastrophe

Le 28 décembre 1959, le Quartier 10 s'effondra partiellement. Aucun mineur n'étant présent dans le secteur, il n'y eut ni victime ni dommage majeur dans les quartiers voisins. Au cours des trois jours qui suivirent, de forts craquements furent perçus en périphérie, puis tout cessa. La décision fut alors prise de redémarrer l'exploitation des anciens quartiers qui avait été momentanément suspendue en périphérie du désordre.

Vingt-quatre jours plus tard, le 21 janvier 1960, à 16 heures, des bruits sourds provenant du même quartier furent détectés, accompagnés d'une dégradation rapide des piliers environnants. Les responsables décidèrent d'évacuer les deux équipes les plus proches du Quartier 10. Peu après 19 heures, les mineurs en charge des travaux de réparation entrepris dans l'urgence, alertés par de nouvelles déflagrations, initièrent

**Figure 1**  
Contexte géologique de la mine de Coalbrook (exploitation menée en couche 2).



un repli avant d'être engloutis par « un ouragan de poussière accompagné de coups de tonnerre ».

L'effet de souffle balaya la mine avec une extrême violence. L'ensemble du personnel évacua peu à peu la mine, et ce n'est qu'une fois l'évacuation achevée que l'on réalisa qu'aucun des mineurs travaillant au sein des quartiers situés à l'est de la mine n'était remonté au jour. Les reconnaissances mirent en évidence que tous les accès menant à ces quartiers étaient effondrés, et tous les forages entrepris pour établir des puits de secours confirmèrent les signes d'un effondrement généralisé de l'ensemble du secteur. Les corps des 437 mineurs qui périrent dans l'effondrement ne furent jamais retrouvés.

### Les principales leçons tirées de la catastrophe

La catastrophe de Coalbrook fut un véritable choc dans la communauté minière internationale. La résistance insuffisante des piliers fut rapidement identifiée comme la cause principale de la catastrophe et, parmi les recommandations qui résultèrent de l'accident, l'une consistait à exiger, à l'avenir, une analyse argumentée des dimensions de piliers au regard du contexte d'exploitation. La priorité des travaux de recherche fut dès lors consacrée à l'établissement d'une méthodologie permettant de définir la résistance effective de piliers *in situ*.

Face aux difficultés de déterminer la résistance de blocs rocheux de grande taille, Salamon et Munro [B] s'orientèrent vers la prise en compte de l'effet d'élanement des piliers (rapport hauteur sur largeur) dans cette résistance. S'appuyant sur

une approche statistique du problème et sur une base de données de 27 piliers rompus et 92 piliers intacts provenant de différentes mines de charbon sud-africaines, les auteurs établirent une relation permettant, sur la base de retour d'expérience, de déterminer la résistance de piliers de charbon :

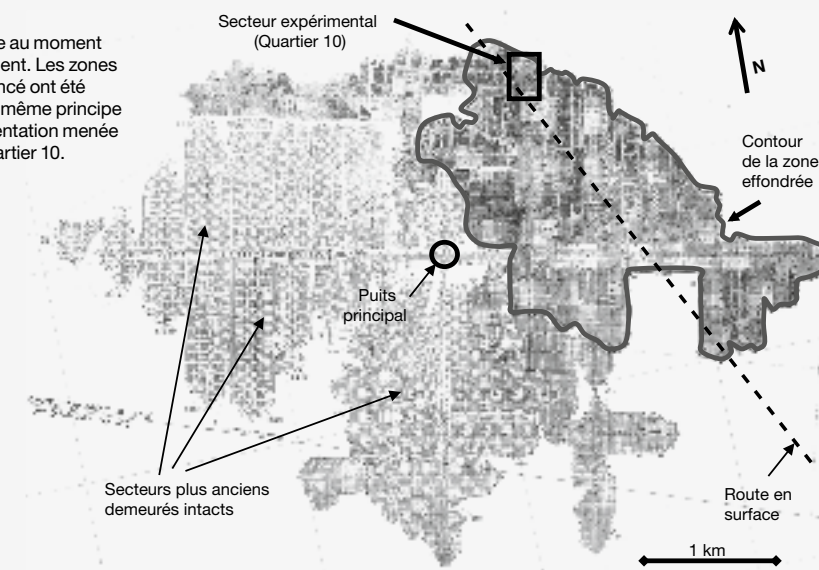
$$\sigma_p = 7,176 (w^{0,46}) / (h^{0,66})$$

Avec  $\sigma_p$  : résistance des piliers, en MPa  
 $w$  et  $h$ , respectivement largeur et hauteur des piliers, initialement en pieds

La formule de Salamon-Munro fut très vite largement adoptée et mise en pratique dans l'industrie minière sud-africaine et, plus largement, dans l'ensemble du monde anglo-saxon. Elle constitue encore aujourd'hui une référence dans la profession.

L'application de la formule aux piliers résiduels du Quartier 10 établit que ceux-ci étaient largement sous-dimensionnés pour supporter le poids des terrains de recouvrement. La « fausse » stabilité apparente du quartier expérimental s'explique donc par le rôle capital joué par le banc de dolérite (soulagement des piliers par transfert d'une partie du poids des terrains de recouvrement vers les bords fermes de l'exploitation). La rupture, d'abord partielle puis totale, de ce banc induisit un report brutal de l'ensemble du poids du recouvrement sur les piliers. La rupture de ces derniers, incapables de supporter cette mise en charge dynamique expliquerait l'effondrement spontané de l'ensemble du quartier jusqu'à alors stable.

**Figure 2**  
Plan de la mine au moment de l'effondrement. Les zones en gris plus foncé ont été reprises sur le même principe que l'expérimentation menée au sein du Quartier 10.



### Références

[A] Didier C., Van der Merwe N. *Analyse en retour d'expérience de deux effondrements miniers dans les mines de charbon : cas des mines de Coalbrook et Gardanne*. Revue française de géotechnique, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> trimestres 2010, n° 131-132, pp. 119-135.

[B] 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.

[C] Didier C., Van der Merwe N., Poulard F. *Back analysis on the pillars behaviour during the flooding of the Lorraine iron ore basin*. 1<sup>st</sup> International Congress on Mining Wastes and Closed Mines (GESRIM 2012), 3-6 April 2012, Marrakech, Morocco, pp. 56-58.

Van der Merwe N. *Beyond Coalbrook: what did we really learn?* J. S. Afr. Inst. Min. Metall., December 2006, volume 106, pp. 857-868.



► **Valorisation du retour d'expérience**

Christophe Didier et Nielen Van der Merwe [A] ont repris la démarche, en l'étendant à une rupture en masse s'étant développée au sein du bassin houiller de Provence en 1879. Dans les deux cas, les piliers étaient sous-dimensionnés pour garantir leur propre stabilité, et c'est la rupture du système « piliers déformables-toit raide » qui a engendré un effondrement généralisé de vastes quartiers d'exploitation. Cette analyse a également mis en évidence l'apport des outils de modélisation numérique, non disponibles à l'époque des premiers travaux de Salamon, pour analyser les conditions de stabilité du système « toit-piliers ».

Les mêmes auteurs ont également transféré la méthodologie au contexte du bassin ferrifère lorrain [C] afin d'établir une formule de résistance des piliers adaptée à ce contexte spécifique. Forts de cette formule empirique, une caractérisation de la sensibilité des ouvrages à la rupture est proposée, en intégrant notamment à l'analyse le facteur temporel au travers d'une approche probabiliste.

allows the experts to identify the causes of failures and/or accidents and the authorities to take measures to prevent such events not to occur any more. To consolidate its expertise INERIS systematises as much as possible this type of approach [A]. In close collaboration with the University of Johannesburg (Pr Nielen van der Merwe), a feedback

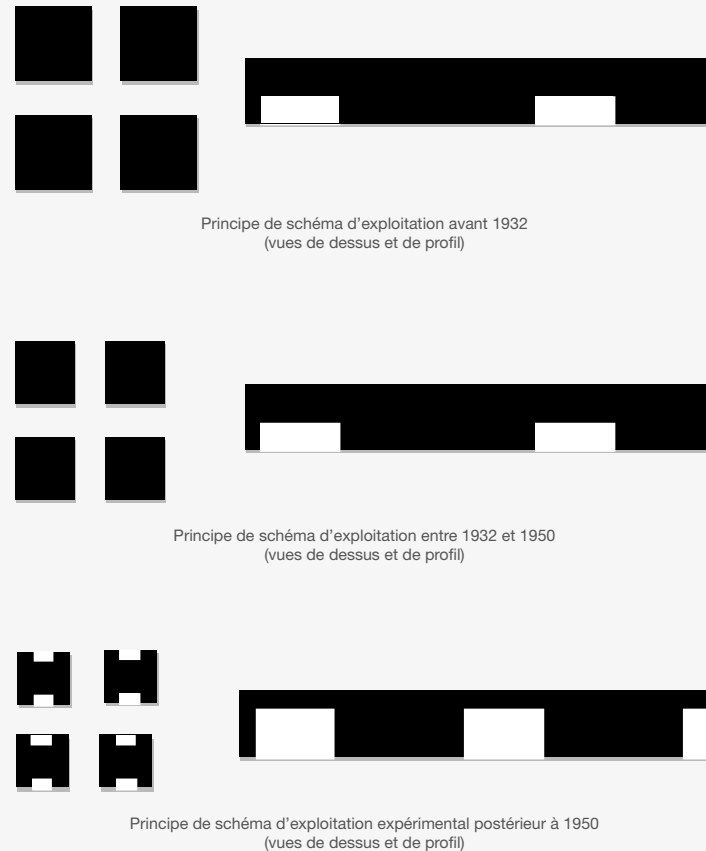
analysis has been implemented on the disaster of Coalbrook mine (South Africa), an accident which will remain, forever, one more dramatic in the history of the mining industry (437 deaths due to spontaneous collapse of more than 300 ha).

**ABSTRACT**

Understanding and management of hazards have always been largely supported by feedback analysis. This kind of process

**Figure 3**

Évolution dans le temps du schéma de dimensionnement des chantiers. Les échelles respectives (vues de dessus et de profil) sont respectées entre les deux schémas.



## Nouveau dispositif pour caractériser rapidement le retrait-gonflement des argiles

**CONTRIBUTEURS**



**Jean-Bernard Kazmierczak**  
**Tatiana Maison<sup>(1)</sup>**  
**Farid Laouafa**  
**Patrice Delalain**

Le retrait-gonflement des argiles est un phénomène naturel qui provoque des gonflements du sol lors des périodes pluvieuses et des tassements en cas de sécheresse. Lorsque ces mouvements ont lieu à proximité des fondations d'une maison individuelle, ils génèrent des tassements différentiels qui peuvent provoquer des désordres allant de la simple fissure à une altération fonctionnelle de l'habitation. Des essais de laboratoire permettent déjà de caractériser ce phénomène. Ils consistent à observer sur des éprouvettes pluricentimétriques la réponse d'un échantillon de sol à une imbibition ou à un séchage. Mais la cinétique du phénomène est très lente, et ces essais peuvent durer plusieurs semaines.

Pour remédier à cet inconvénient et comprendre plus finement les phénomènes en jeu, l'INERIS a développé un nouveau dispositif qui s'appuie sur des observations au microscope électronique à balayage environnemental (MEBE) et sur des mesures très rapides.

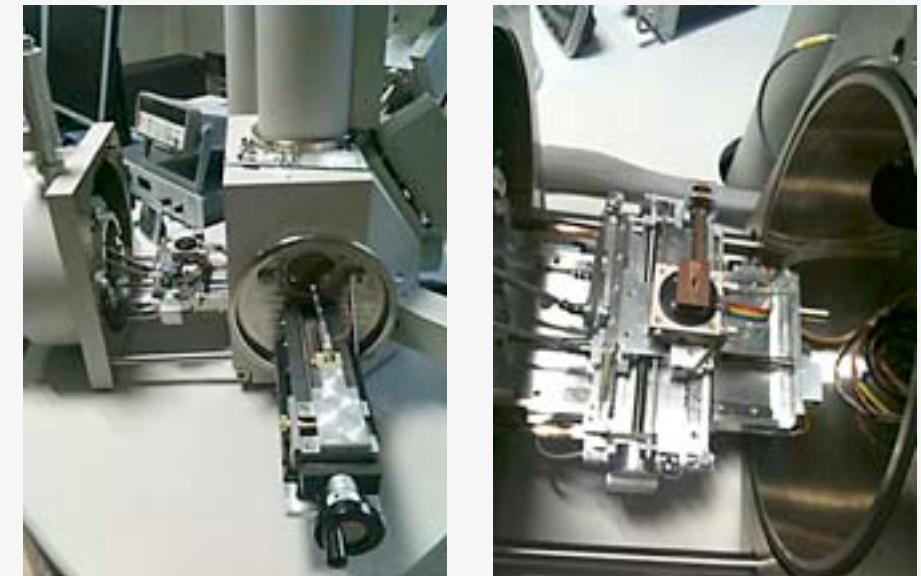
**NOTE**  
(1) Actuellement à l'Institut polytechnique LaSalle Beauvais.

**Description de l'essai**

L'essai consiste à faire varier au sein du MEBE Figure 1, en maintenant constante la température donnée (T) et la pression (P) dans la chambre, de manière à imposer un état hygrométrique connu (HR). À partir du diagramme de phases de l'eau (HR, T, P), on impose ainsi à l'échantillon des humidités relatives HR variant entre 0 % et 100 %.

**Figure 1**

Photographies du dispositif de caractérisation du retrait/gonflement des argiles.



➔ Pour chaque état hydrique caractérisé par HR, on observe la variation de la déformation surfacique et du poids de l'échantillon. Ces informations permettent de construire la courbe de variation de la déformation surfacique de l'échantillon  $\Delta S$  (%) en fonction de la teneur en eau  $w$  (%) à partir des courbes  $w=f(HR)$  (exemple en Figure 2) et  $\Delta S=g(HR)$ . Dans cet essai, la variation de poids de l'échantillon étant uniquement liée à sa variation de teneur en eau ( $w$ ), il devient alors possible de construire une courbe reliant la variation de volume de l'échantillon à sa variation de teneur en eau, sur la base d'un essai de très courte durée (une journée environ).

### Évaluation du retrait/gonflement à l'échelle d'un massif de sol

Pour exploiter pleinement cette nouvelle « information » expérimentale ( $\Delta S = f(W\%)$ ) et la relier au comportement du sol à l'échelle d'un ouvrage, un modèle analytique a été proposé. Il permet le calcul du tassement ou du gonflement d'un massif de sol soumis à des variations de teneur en eau.

Le principe de ce modèle est très simple. Il consiste à sommer analytiquement, sur toute l'épaisseur de la couche, les variations élémentaires de hauteur de chaque portion élémentaire de couche de sol. Ces variations élémentaires sont calculées sur la base de la variation de la teneur en eau à chaque profondeur du massif, via la courbe expérimentale  $\Delta S = f(\Delta w\%)$  obtenue précédemment.

Le modèle analytique développé se base sur les différentes hypothèses. Il considère tout d'abord que le mécanisme de retrait et de gonflement des sols argileux suit le même chemin de déformation et qu'il est indépendant de l'échelle d'observation [A, B, C], même si leur cinétique ne l'est pas. Il suppose par ailleurs que le phénomène de retrait ou de gonflement est peu dépendant de l'état de contrainte, dans la gamme de profondeur considérée (la pression de gonflement est considérée supérieure à l'état de contrainte aux faibles profondeurs).

Pour compléter la démarche engagée, une relation entre la variation de volume du sol en champ libre de toute contrainte et ses équivalents surfacique et linéique a pu être formulée (dans l'hypothèse d'une déformation oedométrique), et des profils types de pénétration de la sécheresse dans le sol ont été proposés.

### Conclusion

Ces différentes hypothèses permettent de calculer, à chaque profondeur, la variation d'épaisseur de la couche considérée en fonction des conditions hydriques. L'intégration de ces variations sur toute la hauteur de la couche renseigne alors sur les amplitudes de retrait ou de gonflement prévisibles en surface (exemple en Figure 3). Un lien entre le comportement microscopique (MEBE) et macroscopique (échelle de l'ouvrage) est ainsi proposé. Il s'appuie sur les observations faites sur plusieurs argiles dans le cadre de travaux de recherche menés par Maison [A, B, C].

### Références

[A] Maison T., Laouafa F., Fleureau J.-M. (2008). *Analyse à l'échelle micro et macroscopique des mécanismes de retrait et de gonflement des sols argileux*. Laboratoire central des ponts et chaussées. SEC 2008. Symposium international Sécheresse et Constructions, 1-3 septembre 2008, Marne-la-Vallée. Paris, LCPC, 2008, pp. 155-161.

[B] Maison T., Laouafa F., Fleureau J.-M., Delalain P. (2009a). *Analyse aux échelles micro et macroscopique des mécanismes de dessiccation et de gonflement des sols argileux*. Actes du 19<sup>e</sup> Congrès français de mécanique, 24-28 août 2009, Marseille.

[C] Maison T., Laouafa F., Fleureau J.-M., Delalain P. (2009b). *Microscopic analysis of shrinkage and swelling mechanisms in clayey soils/analyse microscopique des mécanismes de dessiccation et de gonflement des sols argileux*. Hamza M., Shahien M., El-Mossallamy Y. (Eds.). Proceedings of the 17th International Conference

on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5-9 October 2009, Alexandria, Egypt, Amsterdam, IOS Press, 2009, pp. 660-663.

Audiguier M., Geremew Z., Laribi S., Cojean R. *Caractérisation au laboratoire de la sensibilité au retrait-gonflement des sols argileux*, Rev. franç. Géotec, 2007, 120-121, pp. 67-82.

Fleureau J.-M., Kheirbek-Saoud S., Soemiro R., Taibi S. *Behavior of clayey soils on drying-wetting paths*, Can. Geotech., 1993, J., 30, pp. 287-296.

Kazmierczak J. B., Maison T., Delalain P., Laouafa F. « Dispositif et procédé de caractérisation d'un matériau », Brevet 10-54771, 14 juin 2011.

Makki L., Duc M., Droniuc N., Reiffsteck P., Maloula A., Magnan J. P. *Essai de retrait pour une meilleure classification de la sensibilité des sols à la sécheresse*, SEC2008, Paris, France, 1-3 septembre 2008, pp. 257-264, Éditions du LCPC.

Maison T., Laouafa F., Delalain P. *Mise au point d'un dispositif expérimental pour l'analyse du retrait-gonflement des sols argileux*, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.

Maison T., Laouafa F., Fleureau J.-M., Delalain P. (2010a). *Analyse au niveau microscopique du comportement hydrique d'agrégats argileux*, Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2010), 7-9 juillet 2010, Grenoble.

Maison T., Laouafa F., Fleureau J.-M. (2010b). *Volume changes of swelling clayey soils at microscopic scale level*, UNSAT 2010, 6-8 septembre 2010, Barcelona, Spain.

Montes-H. G. (2002.) *Étude expérimentale de la sorption d'eau et du gonflement des argiles par microscopie à balayage environnementale (ESEM) et l'analyse digitale d'images*, Strasbourg, École et observatoire des sciences de la terre.

Figure 2

Variation de la teneur en eau sous l'effet de l'humidification dans le MEBE pour une variété d'argile, la montmorillonite grecque, et en fonction du temps.

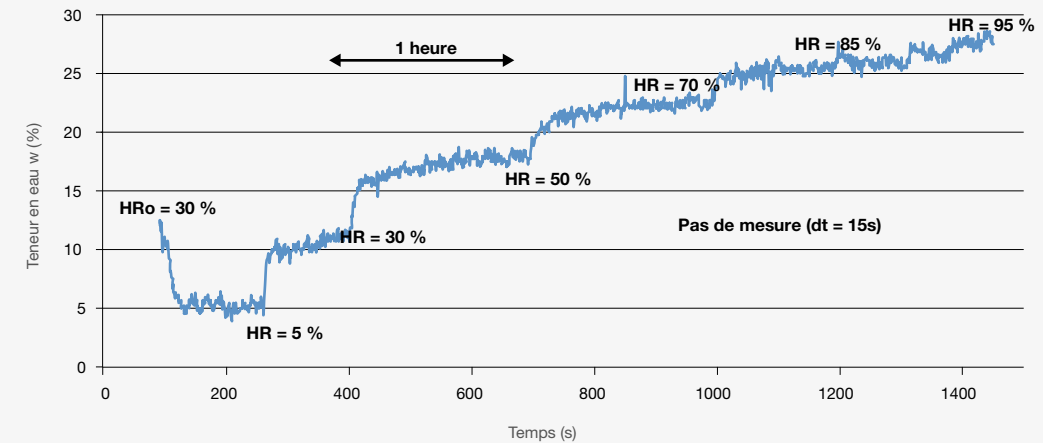
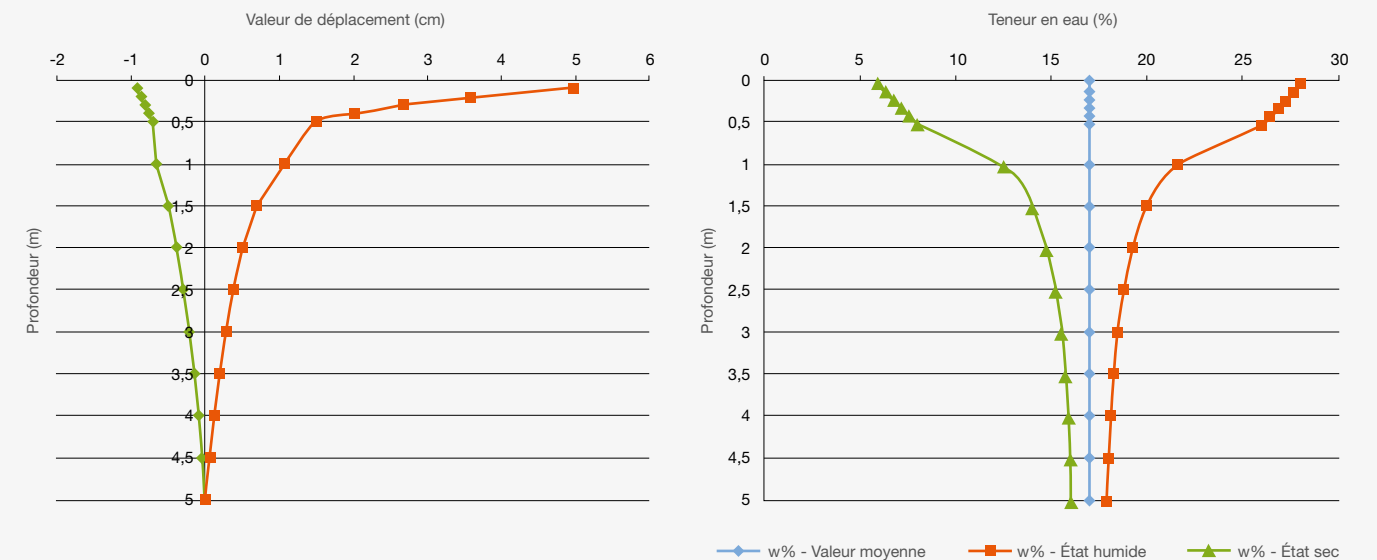


Figure 3

Estimation du retrait et du gonflement de la couche de montmorillonite grecque.



### ABSTRACT

Every year, the shrinkage and swelling of clays induce serious damages on housing structures. Their understanding

and their quantifying constitute two important objectives to reduce damages. In this context, a new device was developed to characterise the shrinkage and swelling behaviour of clayey materials within an Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM). It allows to determine the relationship between the volume variation of a micro-sample and its water content

variation in a very short time (a day). Associated with an analytical model based on standard profiles of drought penetration in the soil, this new test allows to estimate the amplitude of settlement and/or swelling at the house scale.





## Annexes

- 77 Programmes 190
- 78 L'INERIS partenaire de 42 programmes européens
- 79 Programmes de recherche
- 80 Autres programmes
- 81 Sujets de thèses sélectionnés en 2013
- 82 Gouvernance scientifique
- 83 Les commissions scientifiques
- 84 Les indicateurs du contrat d'objectifs 2011-2015
- 85 Publications

# Programmes 190

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

## LISTE AU 10 SEPTEMBRE 2013 DES AXES DE RECHERCHE EN COURS

### DIRECTION DES RISQUES CHRONIQUES

- Axes 1 & 2: Toxicologie et écotoxicologie expérimentale et prédictive. Recherche des effets toxiques et écotoxiques des substances (perturbateurs endocriniens, biosurveillance des milieux, nanotoxicologie et effets des ondes électromagnétiques)
- Axe 3: Évaluation intégrée et spatialisée des expositions et des risques: indicateurs d'inégalités environnementales
- Axe 4: Modélisation de la qualité de l'air: code de calcul « CHIMERE » et ses produits dérivés
- Axe 5: Chimie de l'environnement
- Axe 6: Procédés propres et valorisation
- Axe 7: Métrologie de l'environnement: nouveaux polluants et nouveaux instruments
- Axe 8: Analyses socio-économiques et modélisations intégrées

### DIRECTION DES RISQUES ACCIDENTELS

- Axe 1: Études de la dynamique des fuites et formation de nuages
- Axe 2: Plate-forme de modélisation numérique des effets des phénomènes dangereux pour l'évaluation des risques accidentels
- Axe 3: Développement de méthodes prédictives par modélisation moléculaire pour renseigner les propriétés physico-chimiques et la réactivité des substances dangereuses
- Axe 4: Risques liés aux nanoparticules et matériaux nanostructurés
- Axe 5: Étude des explosions en milieu complexe, du processus de combustion aux effets sur structures
- Axe 6: Risques, décision et incertitudes
- Axe 7: Organisation et sécurité: de l'évaluation des risques à la conception d'outils d'ingénierie
- Axe 8: Production de « bioflux » d'énergie (carburants, combustibles, chaleur, électricité) de matériaux, et de molécules intégrées dans des bio-raffineries à partir de la biomasse
- Axe 9: Études des risques liés au stockage d'énergie par batteries

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

- Axe 1: Efficacité et fiabilité des stockages souterrains
- Axe 2: Compréhension, modélisation et surveillance de la déformation et de la rupture des massifs rocheux
- Axe 3: Réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens aux aléas naturels et miniers



# L'INERIS partenaire de 42 programmes européens

(sur la période de juillet 2012 à fin 2013)

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>EDA-EMERGE</b>       | Innovative biodiagnosis meets chemical structure elucidation  |
| <b>TOSCA</b>            | Total Operation Management for Safety Critical Activities   |
| <b>SAFERA (montage)</b> | ERANET on Industrial Safety   |
| <b>MARINA</b>           | Managing Risks of nanomaterials   |
| <b>DEMCAMER</b>         | Design and manufacturing of catalytic membranes reactors by developing new nano-architected catalytic and selective membrane materials  |
| <b>SANOWORK</b>         | Safe Nano Worker  |
| <b>NECOBAUT</b>         | Innovative Automobile Electrochemical storage Applications Based on Nanotechnology  |
| <b>STABILID</b>         | Innovative Automobile Electrochemical storage Applications Based on Nanotechnology  |
| <b>HELIOS</b>           | High Energy Lithium-Ion Storage solutions   |
| <b>NANODEVICE</b>       | Portable easy to use device for measurement of airborne engineered nanoparticles in workplace air   |
| <b>ENVIROMONITOR</b>    | Demonstration of an on site environmental monitoring  |
| <b>OCTAVIUS</b>         | Optimising the integration of CO <sub>2</sub> capture into power plants   |
| <b>MACC2</b>            | Monitoring Atmospheric Composition and Climate  |
| <b>ATOPICA</b>          | Atopic diseases in changing climate, land use and air quality   |
| <b>APPRAISAL</b>        | Integrated assessment of air pollution supporting the revision of EU air quality legislation  |
| <b>ETC/ACM 2013</b>     | European Topic Centre on Air pollution and Climate change mitigation (calls 2013)   |
| <b>AQUAREHAB</b>        | Development of Rehabilitation technologies and approaches for multipressured degraded waters and the integration of their impact on river basin management                            |
| <b>NANO-STAIR</b>       | Establishing a process and a platform to support standardization for nanotechnologies implementing the STAIR approach   |
| <b>GREENLAND</b>        | Gentle remediation of trace element contaminated land   |
| <b>CITYCHLOR</b>        | Tackling urban soil and groundwater contamination caused by chlorinated solvents  |
| <b>NANOFOL</b>          | Folate based nanobiodevices for integrated diagnosis / therapy targeting chronic inflammatory diseases  |
| <b>DIESE</b>            | Determination of pertinent indicators for environmental monitoring: a strategy for EUROPE   |
| <b>COSMOS</b>           | Integrated in silico models for the prediction of human repeated dose toxicity of cosmetics to optimise safety  |
| <b>QNANO</b>            | A pan-European infrastructure for quality in nanomaterials safety testing   |
| <b>HEROIC</b>           | Health and Environmental Risks: Organisation, Integration and Cross-fertilisation of Scientific Knowledge   |
| <b>CALEIDOS</b>         | Chemical Assessment according to Legislation Enhancing the In silico documentation and safe use   |
| <b>4-FUN</b>            | The FUTURE of FULLY integrated human exposure assessment of chemicals: Ensuring the long-term viability and technology transfer of the EU-FUNded 2-FUN tools as standardised solution |
| <b>HELIX</b>            | The Human Early-Life Exposome – Novel tools for integrating early-life environmental exposures and child health across Europe   |
| <b>PREDICT-IV</b>       | Profiling the toxicity on new drugs: non animal approach integrating toxicodynamics and biokinetics   |
| <b>CARBOLAB</b>         | Improving the knowledge of carbon storage and coal bed methane production by "in situ" underground tests  |
| <b>MISSTER</b>          | Mine Shafts: improving security and new tools for the evaluation of risks   |
| <b>HUGE 2</b>           | Hydrogen oriented Underground Coal Gasification for Europe: environmental and safety aspects  |
| <b>COMEX</b>            | COMplex mining EXploitation: optimising mine design and reducing the impacts on human environment   |
| <b>I2 MINE</b>          | Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future  |
| <b>CO2QUEST</b>         | Impact of the quality of CO <sub>2</sub> on transport and storage behaviour   |
| <b>MARSITE</b>          | Long-term monitoring experiment in geologically active regions of Europe prone to natural hazards: the Supersite concept  |

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| <b>NANOREG</b>                  | Support for regulation needs in nanotechnologies  |
| <b>NANOMILE</b>                 | Engineered nanomaterials mechanisms of interaction with living systems and the environment: a universal framework for safe nanotechnology |
| <b>BIOHEALTH (BIOENERGY)</b>    | Health effect of particulate emissions from small scale biomass combustion  |
| <b>ENE-PME-TEST (BIOENERGY)</b> | Wood Combustion health related issues   |
| <b>INTEG-RISK</b>               | Early recognition, Monitoring and Integrated Management of Emerging, New technology Related Risks   |
| <b>SCAFFOLD</b>                 | Innovative strategies, methods and tools for occupational risks management of manufactured nanomaterials in the construction industry     |

## Programmes de recherche

soutenus par l'Agence nationale de la recherche – ANR (au 10 septembre 2013)

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>2008</b>                |   |
| <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 |
| <b>2009</b>                |   |
| <b>RISKMAT-SLAM</b>        | Risque naturel et gestion de crise  |
| <b>2010</b>                |   |
| <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>            | Prédiction des propriétés physico-chimiques des produits par modélisation moléculaire   |
| <b>TRISTAN</b>             | Structures intrinsèquement sûres aux tirs d'armes et aux engins improvisés  |
| <b>ECOTECH-ECHIBIOTECH</b> | Outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi de traitements avancés des eaux usées et des boues  |
| <b>2011</b>                |   |
| <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 iN'Teg-Risk                    |
| <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>SEED IMPACT EAU</b>     | Programme CIPRES (Caractérisation des impacts potentiels du stockage géologique du CO <sub>2</sub> sur la qualité de la ressource en eau souterraine)   |
| <b>POLYSAFE</b>            | Conduite en sécurité des réacteurs-échangeurs intensifiés continus en milieu polyphasique   |
| <b>2012</b>                |   |
| <b>PROOFS</b>              | Effet de ligands environnementaux du récepteur de la progestérone sur la reproduction du poisson  |
|                            | Programme piloté par l'INERIS.  |





# Autres programmes

(financements sur fonds publics) – en cours au 10 septembre 2013

| ADEME   |  |
|---|--|
| CYCLADE   | Développer un procédé de recyclage des batteries de véhicules électriques par hydro-métallurgie  |
| CARACITYCHLOR   | Outils de caractérisation des pollutions des COV dans les eaux souterraines et les sols  |
| ERANET BIOENERGY: EN-PME-TEST                               | Common European method for the determination of particulate matter emissions of solid fuel burning appliances and boilers  |
| ERANET BIOENERGY BIOHEALTH                                  | Health effects of particulate emissions from small scale biomass combustion  |
| CORTEA-EMBRUVE  | Amélioration de la connaissance des émissions atmosphériques liées au brûlage de véhicules   |
| CORTEA-EMNR   | Caractérisation des engins mobiles non routiers  |
| SALUT'AIR   | Changement climatique et stratégies de lutte contre le transport et la gestion des sites pollués   |
| 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  |
| 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  |
| CORTEA 2011   | Émissions matériaux  |
| CORTEA 2012 INACS   | Isotopie du nitrate d'ammonium: compréhension des sources  |
| CORTEA 2012 CHAMPROBOIS                                     | Transformation physico-chimique d'un aérosol de combustion de bois en champ proche de la source  |
| CORTEA 2013 – AFAC  | Actualisation des facteurs d'émission des polluants des foyers domestiques alimentés au bois   |
| NANOFlueGas   | Caractérisation et réduction des émissions particulières 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   |
| RSEIN 2012-2015   | Recherche santé environnement intérieur  |
| IZNOGOU   | Impacts des ZAPA, nouvelle génération d'outils de diagnostic et d'évaluation des bénéfices sanitaires et économiques attribuables aux restrictions de circulation                    |
| OSSIMED   | Outil spécifique au site de mesure et suivi des émissions diffuses   |
| CARACTÉRISATION DES SUBSTANCES ÉMERGENTES DANS LES COMPOSTS |  |
| 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   |
| ECOTECH-NANOFRESES  | Nanoparticules de fer pour la remédiation des eaux souterraines  |
| ACHIA   | Air pollution and climate change health impact assessment  |
| ÉTAT DE L'ART ÉMISSION COMBUSTION BIOMASSE                  |  |
| PassSolAir  | Capteurs passifs pour l'air du sol   |
| CORTEA IDENTECH   | Identification des technologies existantes permettant de réduire les émissions polluantes des foyers   |
| CORTEA EMICER   | Mesure et contrôle des émissions de poussières lors de la manutention et du séchage des céréales   |
| VALTRI-OR   | Évaluation du tri optique de la matière organique  |

| MEDDE                                    |   |
|--|---|
| PICASO                                   | Place des méthodes alternatives en expérimentation animale dans le domaine santé-environnement: prise en compte des attentes sociétales |
| ORGANISATION D'UN SÉMINAIRE              |   |
| DIRECTION DE L'EAU ET DE LA BIODIVERSITÉ | Coordination du consortium Aquaref  |
| ÉVÉNEMENT                                |   |
| MOZAIC                                   | Integrated modeling of endocrine disruption in zebrafish at different biological levels   |
| MIXEZ                                    | Estrogen mixture zebra fish   |
| PRIMEQUAL - ECOSTOX                      | Construction de valeurs toxicologiques de référence pour des expositions multiples  |

## Sujets de thèses sélectionnés en 2013

### RISQUES ACCIDENTELS

Compréhension et modélisation de l'emballage thermique de batteries Li-ion neuves et vieilles

Étude de l'influence de l'électrolyte dans la sécurité des batteries Li-ion

Développement d'une approche prédictive pour la compréhension des propriétés amphiphiles de molécules issues de la bioraffinerie

### RISQUES CHRONIQUES

AOSEM: Aérosols organiques secondaires en Méditerranée (CHARMEX)

Évaluation du danger des substances pharmaceutiques pour les milieux aquatiques: effets sur la dynamique de population d'épinoches en écosystème expérimental

Validation d'un système d'exposition des cellules aux aérosols de nanoparticules

Intolérance environnementale idiopathique avec attribution aux champs électromagnétiques (IEI-CEM): étude des systèmes endocrinien, nerveux sympathique et immunitaire

Détection d'aérosols par couplage de la technique LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) avec une cellule plasma RF (Radio Fréquence) basse pression utilisée comme piège à particules

Approche intégrée pour une évaluation multicritère des meilleures techniques disponibles

Évaluation des effets individuels et populationnels induits par les produits phytosanitaires chez deux espèces autochtones des Antilles: le colle-roche et le mulet

Compréhension des mécanismes d'émission et de transfert des HAP oxygénés des sols vers les eaux souterraines

Étude des déterminants de l'adoption d'une innovation par les marchés en situation d'incertitude sur les risques santé/environnement: le cas des nanotechnologies

Identification des principales sources et origines géographiques de PM10 dans le nord de la France



# Gouvernance scientifique

(au 4 décembre 2013)

## LE CONSEIL SCIENTIFIQUE

**Corinne Gendron**

**Présidente**

**Avocate, MBA, Ph.D.**

Titulaire, Chaire de responsabilité sociale et de développement durable

*École des sciences de la gestion – Chaire de responsabilité sociale et de développement durable, Université du Québec, Montréal*

**Michel Sardin**

**Professeur à l'Ensic, Université de Lorraine**

Membre du laboratoire Réactions et génie des procédés – UMR 7274 CNRS – Université de Lorraine

Directeur de l'Institut Carnot Énergie et Environnement en Lorraine – ICEEL, UPS CNRS 3112, Nancy

**Régis Réau**

**Directeur scientifique Senior,**

*Air Liquide, Centre de recherche Claude Delorme, Les Loges-en-Josas, Yvelines*

**Philippe Freyssinet**

**Vice-président**

**Directeur général adjoint**

*ANR – Agence nationale de la recherche, Paris*

**Michel de Lara**

**Professeur**

*CERMICS, Université Paris Est, École des Ponts Paris Tech*

**Philippe Chalmin**

**Responsable du Master «Affaires internationales»**

*Université Paris-Dauphine*

**Isabelle Momas**

**Professeur**

*Université Paris-Descartes – Faculté de pharmacie*

## 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**

*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*

**COLLÈGE INDUSTRIEL**

**Jean-Charles Boutonnet**

**Chef du département Toxicologie et Environnement**

*Arkema*

**Henri Molleron**

**Directeur Environnement**

Vice-président de la CORE

*Colas*

**Frédéric Périé**

**Responsable Développement durable et environnement**

*Total S.A.*

**Yves Bouvier**

**Responsable Recherche et développement de l'axe développement durable**

*Cetim*

**COLLÈGE ÉLUS**

**Michel Guilloux**

**Adjoint au maire**

*Mairie de Feyzin (69)*

**René Drouin**

**Maire**

*Mairie de Moyeuvre-Grande (57)*

**COLLÈGE SYNDICATS**

**Gérald Hayotte**

*CFDT*

**Jean-Paul Liot**

*CFE-CGC*

**Lionnel Pastre**

*CGT*

**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**

Présidente de la Core

*Écologie sans Frontière*

**COLLÈGE ÉTAT**

**Cédric Bourillet**

**Sous-directeur des risques**

**accidentels**

*Direction générale de la prévention des risques*

*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*

# Les commissions scientifiques

(au 10 septembre 2013)

## 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 de l'IFR 112 PMSE

*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*

*Institut des Sciences moléculaires (ISM)*

*UMR5255 CNRS - INRA*

**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*

**Lucie Lamboléz**

Pôle évaluation et veille sanitaire

*Veolia Environnement*

## 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 - ENSIC*

**Didier Larrauri**

*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

*GDFSUEZ*

**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**

*Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE – CGPC)*

**Jacques Pironon**

**Vice-président**

Directeur de recherche – CNRS

*UMR G2R 7566*

*Université de Lorraine*

**Pascal Bernard**

Physicien-sismologue

*Institut de physique du globe de Paris*



**➔ Robert Charlier**

Département ArGenCo  
Université de Liège

**Pierre-Lionel Forbes**

Directeur du laboratoire de recherche  
de Meuse/Haute-Marne  
Andra

**Damien Goetz**

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

**Albin Guyon**

Inspection générale des carrières  
Mairie de Paris

**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**

Responsable équipe géologie TEGG - SGG  
EDF

**Jacques Mudry**

UMR Chrono-Environnement  
UFR Sciences et Techniques  
Université de Franche-Comté

**Pierre Potherat**

Chef du groupe mécanique des roches  
CETE de Lyon

**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 10 septembre 2013)

|   | 2011   | CIBLE      | RÉSULTAT 2012 |
|---|--------|------------|---------------|
| Part de l'activité de l'Institut consacrée à la recherche   | 19,4 % | > 20 %     | 20,3 %        |
| Part des financements sur appel à projets de recherche dans les ressources publiques de la recherche (dont part des financements européens) | 33,1 % | > 35 %     | 35,4 %        |
| Nombre de titulaires d'une HDR  | 11     | > 10       | 13            |
| Nombre de publications dans des revues à comité de lecture référencées ISI  | 81     | > 80       | 90            |
| Part des contrats passés avec les industriels dans les ressources totales de la recherche   | 12,1 % | 13 %       | 12,1 %        |
| Nombre de doctorants  | 55     | Sans cible | 42            |
| Nombre de démonstrateurs où l'INERIS intervient   | 4      | 4          | 4             |

## Publications

### RISQUES CHRONIQUES

#### 2012

**CHIAPPINI Laura, ROSSIGNOL Stéphanie, MOMBELLI Enrico, GREUILLET Claire, NICOLLE Jérôme, NICOLAS Mélanie**  
SOA formation study from limonene ozonolysis in indoor environment: gas and particulate phases chemical characterization and toxicity prediction  
*Proceedings of the 10th International conference Healthy Buildings (HB2012). Queensland University of Technology, 2012*

**MICHELOT Nicolas, MARCHAND Caroline, RAMALHO Olivier, DELMAS Véronique, CARREGA Marie**  
Monitoring indoor air quality in French schools and day-care centres. Results from the first phase of a pilot survey  
*Proceedings of the 10th International conference Healthy Buildings (HB2012). Queensland University of Technology, 2012*

**QUERON Jessica, FLOCH-BARNEAUD Adeline, LESTREMEAU François, MARCHAND Caroline, DURIF Marc, DELAHAYE Claire, MOSQUERON Luc; SEGALA Claire, TACK Karine**  
Development of air and dust sampling methods for quantitative measurements of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in offices  
*Proceedings of the 10th International conference Healthy Buildings (HB2012). Queensland University of Technology, 2012*

**GONZALEZ M. Angeles, VIVANCO Marta G., PALOMINO Inmaculada, GARRIDO Juan Luis, SANTIAGO Manuel, BESSAGNET Bertrand**  
Modelling some heavy metals air concentration in Europe  
*Water Air and Soil Pollution, 2012, 223 (8), pp. 5227-5242*

**GLADTKE Dieter, BAKKER Frits, BIAUDET Hugues, BRENNFLECK Alexandra, COLEMAN Peter, CREUTZNACHER Harald, VAN EGMOND Ben F., HAFKENSCHIED Theo, HAHNE Frank, HOUTZAGER Marc M., LEOZ-GARZIANDIA Eva, MENICHINI Edoardo, OLSCHESKI Anja, REMESCH Thomas**  
Different collector types for sampling deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons – comparison of measurement results and their uncertainty  
*Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14 (8), pp. 2054-2062*

**RINGUET Johany, ALBINET Alexandre, LEOZ-GARZIANDIA Eva, BUDZINSKI Héléne, VILLENAVE Éric**  
Diurnal/nocturnal concentrations and sources of particulate-bound PAHs, OPAHs and NPAHs at traffic and suburban sites in the region of Paris (France)  
*Science of the Total Environment, 2012, 437, pp. 297-305*

**RINGUET Johany, ALBINET Alexandre, LEOZ-GARZIANDIA Eva, BUDZINSKI Héléne, VILLENAVE Éric**  
Reactivity of polycyclic aromatic compounds (PAHs, NPAHs and OPAHs) adsorbed on natural aerosol particles exposed to atmospheric oxidants  
*Atmospheric Environment, 2012, 61, pp. 15-22*

**RINGUET Johany, LEOZ-GARZIANDIA Eva, BUDZINSKI Héléne, VILLENAVE E., ALBINET Alexandre**  
Particle size distribution of nitrated and oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (NPAHs and OPAHs) on traffic and suburban sites of a European megacity, Paris (France)  
*Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12, pp. 8877-8887*

**OUATTARA Djomangan Adama, PROT Jean-Matthieu, BUNESCU Andrei, DUMAS Marc-Emmanuel, ELENA-HERRMANN Bénédicte, LECLERC Éric, BROCHOT Céline**  
Metabolomics-on-a-chip and metabolic flux analysis for label-free modeling of the internal metabolism of HepG2/C3A cells  
*Molecular Biosystems, 2012, 8 (7), pp. 1908-1920*

**VILLERET Mélanie, JOLLY Sabrina, WIEST Laure, VULLIET Emmanuelle, BADO-NILLES Anne, PORCHER Jean-Marc, BETOULLE Stéphane, MINIER Christophe, SANCHEZ Wilfried**  
A potential biomarker of androgen exposure in European bullhead (*Cottus sp.*) kidney  
*Fish Physiology and Biochemistry, 2012*

**GHOSN Rania, THUROCZY Gyorgy, LOOS Nathalie, BRENET-DUFOUR Valérie, LIABEUF Sophie, DE SEZE René, SELMAOUI Brahim**  
Acute exposure to mobile phone and assessment of internal cerebral circulation in young healthy subjects: A Transcranial Doppler study  
*7th. International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields (IWSBEEMF), 8-12 October 2012, Malte*

**CAUDEVILLE Julien, BONNARD Roseline, BOUDET Céline, DENYS Sébastien, GOVAERT Gérard, CIOLELLA André**  
Development of a spatial stochastic multimedia exposure model to assess population exposure at a regional scale  
*Science of the Total Environment, 2012, 432, pp. 297-308*

**TEBBY Cleo, MOMBELLI Enrico**  
A kernel-based method for assessing uncertainty on individual QSAR predictions  
*Molecular Informatics, 2012, 31 (10), pp. 741-751*

**PERE Jean-Christophe, COLETTE Augustin, DUBUISSON P., BESSAGNET Bertrand, MALLET Marc, PONT Véronique**  
Impacts of future air pollution mitigation strategies on the aerosol direct radiative forcing over Europe  
*Atmospheric Environment, 2012, 62, pp. 451-460*

**AFFELTRANGER Bastien, BRIGNON Jean-Marc**  
Socio-economic analysis of bio-based fuel options for civil aviation  
*Proceedings of the 2nd international conference on life cycle approaches, [avniR] editions, 2012, pp. 218-221 (376 pages)*

**BELLINO Roberto, AFFELTRANGER Bastien, BATTISTINI Bruno, EVANNO Sébastien, LE POCHAT Stéphane**  
Comparative environmental assessment of two systems of agronomic and energetic valorisation of horse manure  
*Proceedings of the 2nd international conference on life cycle approaches: [avniR] editions, 2012, pp. 227-229 (376 pages)*

**BATTON-HUBERT Mireille, CLINCKE Anne-Sophie**  
Chapter 7.1.1 Gas compounds  
**DEPORTES Isabelle, MALLARD Pascal, LOYON Laurence** – The Ademe research programme on atmospheric emissions from composting: Research findings and literature review, 2012, pp. 165-175

**ROUIL Laurence**  
Les modèles régionaux et les modèles urbains: nouveaux outils d'aide à la décision  
*Pollution atmosphérique, 2012 (Spécial Novembre), pp. 119-121*

**JAFFREZO Jean-Lu, PIOT Christine, BESOMBES Jean-Luc, MARCHAND Nicolas, EL HADDAD I., FAVEZ Olivier, BRULFERT G.**  
L'apport des méthodes d'analyses chimiques des PM pour la connaissance des sources d'émission  
*Pollution atmosphérique, 2012 (Spécial Novembre), pp. 1-14*

**FAVEZ Olivier, PETIT Jean-Eudes, BESSAGNET Bertrand, MELEUX Frédéric, CHIAPPINI Laura, LEMEURE Sébastien, LABARTETTE Claire, CHAPPAZ Claire, GUERGNON Pierre-Yves, SAISON Jean-Yves, CHRÉTIEEN Ève, PALLARES Cyril, VERLHAC Stéphane, AUJAY Robin, MALHERBE Laure, BEAUCHAMP Maxime, PIOT Christine, JAFFREZO Jean-Luc, BESOMBES Jean-Luc, SCIARE Jean, ROUIL Laurence, LEOZ-GARZIANDIA Eva**  
Caractéristiques et origines principales des épisodes de pollution hivernaux aux PM10 en France  
*Pollution atmosphérique, 2012 (Spécial Novembre): pp. 163-181*



# Publications

**FRABOULET Isaline**, BACHELLEZ S.; BESOMBES Jean-Luc, BONDOT M.; CHOPIN F., **COLLET Serge**, DEFLORENNE E., HENRINKSEN E., HAREL Guillaume, KIENNEMANN A., LANDREAU J., MALLEREAU T., RABOT QUERCI M. L., ROBERT Laurence, ROGAUME C., ROGAUME Y., TABET F. Peren2bois: évaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières fines et de composés organiques pour les appareils de combustion domestique utilisant la biomasse *Pollution atmosphérique, 2012 (Spécial Novembre), pp. 203-210*

WIDORY David, PROUST, Éric, BELLENFANT Gaël, **BOUR Olivier** Assessing methane oxidation under landfill covers and its contribution to the above atmospheric CO<sub>2</sub> levels: the added value of the isotope (δ13C and δ18O CO<sub>2</sub>; δ13C and δD CH<sub>4</sub>) approach *Waste Management, 2012, 32 (9), pp. 1685-1692*

PELLETIER Amandine, DELANAUD Stéphane, DECIMA Pauline, **THUROCZY Gyorgy**, **DE SEZE René**, CERRI Mattheo, BACH Véronique, LIBERT Jean-Pierre, LOOS Nathalie Effects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields on energy balance in developing rats *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2735-2746*

**GHOSN Rania**, **THUROCZY Gyorgy**, LOOS Nathalie, BRENET-DUFOUR Valérie, LIABEUF Sophie, **DE SÈZE René**, **SELMAOUI Brahim** Effects of GSM 900 MHz on middle cerebral artery blood flow assessed by transcranial doppler sonography *Radiation Research, 2012, 178 (6), pp. 543-550*

TOUITOU Yvan, DJERIDANE Yasmina, LAMBROZO Jacques, CAMUS Françoise, **SELMAOUI Brahim** Long-term (up to 20years) effects of 50-Hz magnetic field exposure on immune system and hematological parameters in healthy men *Clinical Biochemistry, 2013, 46 (1-2), pp. 59–63*

ROULET Agnès, ARMAND Lucie, DAGOUASSAT Maylis, **ROGERIEUX Françoise**, SIMON-DECKERS Angélique, BELADE Esther, TRAN VAN NHIEU Jeanne, LANONE Sophie, PAIRON Jean-Claude, **LACROIX Ghislaine**, BOCZKOWSKI Jorge Intratracheally administered titanium dioxide or carbon black nanoparticles do not aggravate elastase-induced pulmonary emphysema in rats *BMC Pulmonary Medicine, 2012, 12 (1)*

**MASSON Jean-Baptiste** SIGFRIED 2: Modèles de mélange censurés et autres méthodes statistiques pour la construction d'indicateurs spatialisables de la qualité de l'air intérieur dans les logements français *Thèse de doctorat (Technologies de l'information et des systèmes). Université de technologie de Compiègne, 30/05/2012*

**BARILLOT Cindy** Optimisation du procédé de phytoextraction: caractérisation de la diversité microbienne d'un sol d'une plante hyperaccumulatrice *Arabidopsis halleri* *Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne, 21/09/2012*

**DERGAOUI Hilel** Modélisation d'une population d'aérosols multi-sources et recherche des contributions de chaque source à l'échelle urbaine avec le modèle de dispersion CHIMERE *Thèse de doctorat. 14/12/2012*

**DEVILLIERS Marion** Modélisation et simulation numérique de la dynamique des particules ultrafines appliquée aux atmosphères libres et confinées *Thèse de doctorat. 23/11/2012*

**VILLERET Mélanie** Le Chabot comme espèce modèle pour évaluer les effets des perturbateurs endocriniens *Thèse de doctorat(Écotoxicologie). Université du Havre, 08/11/2012*

**BAUDIFFIER Damien** Effets des perturbateurs endocriniens sur la stéroïdogénèse dans les gonades de poissons zèbres *Thèse de doctorat. Université de Rennes I, 19/10/2012*

**HAMAOUI-LAGUEL Lynda** Les émissions d'ammoniac par les activités agricoles: impact sur la qualité de l'air *Thèse de doctorat. Université Paris VII Denis-Diderot, 12/07/2012*

**RINGUET Johany** Dérivés oxygénés et nitrés des hydrocarbures aromatiques polycycliques (OHAP/NHAP) en phase particulière: granulométrie et devenir dans l'atmosphère (formation/dégradation) *Thèse de doctorat (Chimie analytique et environnement). Université de Bordeaux I, 29/03/2012*

**R'MILI Badr** Application de la spectroscopie de plasma induit par laser “LIBS” pour la caractérisation physico-chimique des nanoparticules, couplé à des méthodes de prélèvement sur grilles TEM pour études de morphologie sous microscopie haute résolution (CARMEN) *Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules-Verne, 10/07/2012*

**ROSSIGNOL Stéphanie** Étude simultanée de la composition chimique de la fraction organique des particules secondaires et de la phase gazeuse atmosphériques: conception et développement d'une nouvelle méthodologie *Thèse de doctorat. Université Paris VII, 10/04/2012*

**SIOUR Guillaume** Modélisation et évaluation de l'impact multi-échelles des mégapoles européennes *Thèse de doctorat. Université Paris Est Créteil, 06/02/2012*

ULASZEWSKA Maria, CIFFROY Philippe, TAHRAOUI Fazia, **ZEMAN Florence Anna**, CAPRI Ettore, **BROCHOT Céline** Interpreting PCB levels in breast milk using a physiologically based pharmacokinetic model to reconstruct the dynamic exposure of Italian women *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2012, 22 (6), pp. 601-609*

**HARATI Rania** Barrière hémato-encéphalique au cours de la maturation cérébrale: impact de la neuro-inflammation sur la régulation des transporteurs d'efflux/influx des médicaments *Thèse de doctorat. Université Paris XI, 05/12/2012*

## 2013

SCHRECK E., **BONNARD Roseline**, LAPLANCHE C., LEVEQUE T., FOUCAULT Y., DUMAT Camille DECA: A new model for assessing the foliar uptake of atmospheric lead by vegetation, using Lactuca sativa as an example *Journal of Environmental Management, 2012, 112, pp. 233–239*

**COLETTE Augustin**, VAUTARD Robert, VRAC M. Regional climate downscaling with prior statistical correction of the global climate forcing *Geophysical Research Letters, 2012, 39 (13)*

TOUITOU Yvan, **SELMAOUI Brahim** The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system *Dialogues in Clinical Neuroscience, 2012, 14 (4), pp. 381-399*

COMAN A., FORET G., BEEKMANN M., EREMENKO Maxime, DUFOUR G., GAUBERT B., **UNG Anthony**, SCHMECHTIG C., FLAUD Jean-Marie, BERGAMETTI G. Assimilation of IASI partial tropospheric columns with an Ensemble Kalman Filter over Europe *Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12 (5), pp. 2513-2532*

**DENYS Sébastien**, **CABOCHE Julien**, **TACK Karine**, RYCHEN Guido, WRAGG Joanna, CAVE Mark, JONDREVILLE Catherine, FEIDT Cyril *In vivo* validation of the unified BARGE method to assess the bioaccessibility of Arsenic, Antimony, Cadmium, and Lead in soils *Environmental Science & Technology, 2012, 46 (11), pp. 6252-6260*

**QUIGNOT Nadia**, **BOIS Frédéric Y.** A computational model to predict rat ovarian steroid secretion from *in vitro* experiments with endocrine disruptors *PLoS One, 2013, 8 (1), pp. e53891*

XU Feng, HELFEN Lukas, SUHONEN Heikki, **ELGRABLI Dan**, BAYAT Sam, REISCHIG Peter, BAUMBACH Tilo, CLOETENS Peter Correlative nanoscale 3D imaging of structure and composition in extended objects *PLoS One, 2012, 7 (11), p. e50124*

LAYACHI Skander, **ROGERIEUX Françoise**, **ROBIDEL Franck**, **LACROIX Ghislaine**, BAYAT Sam Effet of combined nitrogen dioxide and carbon nanoparticle exposure on lung function during ovalbumin sensitization in brown norway rat *PLoS One, 2012, 7 (9), p. e45687*

PHILIPPOT Laurent, RITZ Karl, **PANDARD Pascal**, HALLIN Sara, MARTIN-LAURENT Fabrice Standardisation of methods in soil microbiology: progress and challenges *FEMS Microbiology Ecology, 2012, 82 (1), pp. 1-10*

**BAUDOIN Régis**, PROT Jean-Mathieu, NICOLAS Grégory, BROCHETON Jessy, **BROCHOT Céline**, LEGALLAIS Cécile, BENECH Henri, LECLERC Éric Evaluation of seven drug metabolisms and clearances by cryopreserved human primary hepatocytes cultivated in microfluidic biochips *Xenobiotica, 2013, 43 (2), pp. 140-152*

**DEVILLIERS Marion**, **DEBRY Édouard**, SARTELET Karine, SEIGNEUR Christian A new algorithm to solve condensation/ evaporation for ultra fine, fine, and coarse particles *Journal of Aerosol Science, 2013, 55, pp. 116–136*

**DERGAOUI Hilel**, SARTELET Karine, **DEBRY, Édouard**, SEIGNEUR Christian Modeling coagulation of externally mixed particles: Sectional approach for both size and chemical composition *Journal of Aerosol Science, 2013, 58, pp. 17-32*

TRUNK Attila, STEFANICS Gabor, ZENTAI, Norbert, KOVACS-BALINT Zsofia, **THUROCZY Gyorgy**, HERNADI Istvan No effects of a single 3G UMTS mobile phone exposure on spontaneous EEG activity, ERP correlates, and automatic deviance detection *Bioelectromagnetics, 2013, 34 (1), pp. 31-42*

DIAZ OCHOA Juan G., BUCHER Joachim, **PERY Alexandre**, ZALDIVAR COMENGES José M., NIKLAS Jens, MAUCH Klaus A multi-scale modeling framework for individualized, spatiotemporal prediction of drug effects and toxicological risk *Frontiers in Pharmacology, 2013, 3, p. art. 204*

ONANA Denis Fils Nkoa, MEWOLI Boulchard, **OUATTARA Djomangan Adama** Excitability in the host-pathogen interactions of HIV infection and emergence of viral load blips *Journal of Theoretical Biology, 2013, 317, pp. 407-417*

ZEISE Lauren, **BOIS Frédéric Y.**, CHIU Weihsueh A., HATTIS Dale B., RUSYN Ivan, GUYTON Kathryn Z. Addressing human variability in next-generation human health risk assessments of environmental chemicals *Environmental Health Perspectives, 2013, 121 (1), pp. 23-31*

RAPPAPORT Stephen M., KIM Sungkyoon, THOMAS Reuben, JOHNSON Brent A., **BOIS Frédéric Y.**, KUPPER Laurence L. Low-dose metabolism of benzene in humans: science and obfuscation *Carcinogenesis, 2013, 34 (1), pp. 2-9*

**BARILLOT Cindy**, SARDE Claude, **BERT Valérie**, **TARNAUD Éric**, COCHET Nelly A standardized method for the sampling of rhizosphere and rhizoplan soil bacteria associated to a herbaceous root system *Annals of Microbiology, 2013, 63 (2), pp. 471-476*

CHOUCHA-SNOUBER Leila, ANINAT Caroline, GRSICOM Laurent, MADALINSKI Geoffrey, **BROCHOT Céline**, POLENI Paul Émile, RAZAN Florence, GUGUEN GUILLOUZO Christiane, LEGALLAIS Cécile, CORLU Anne, LECLERC Éric Investigation of ifosfamide nephrotoxicity induced in a liver–kidney co-culture biochip *Biotechnology and Bioengineering, 2013, 110 (2), pp. 597-608*

CHOUCHA-SNOUBER Leila, BUNESCU Andrei, LEGALLAIS Cécile, **BROCHOT Céline**, DUMAS Marc-Emmanuel, ELENA-HERRMANN Bénédicte, LECLERC Éric Metabolomics-on-a-chip of hepatotoxicity induced by anticancer drug flutamide and its active metabolite hydroxyflutamide using HepG2/C3a microfluidic biochips *Toxicological Sciences, 2013, 132 (1), pp. 8-20*

SOUQUES Martine, **DE SEZE René** Induction and Intermediate Frequencies *PEPFRIN A., SOUQUES M. - Electromagnetic Fields, Environment and Health. Paris : Springer, 2012, pp. 51-61*

**DUTOUQUET Christophe**, WATTIEAUX G, MEYER L, **FREJAFON Émeric**, BOUFENDI L. Determination of the elemental composition of micrometric and submicrometric particles levitating in a low pressure Radio-Frequency plasma discharge using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy *Spectrochimica Acta Part B - Atomic Spectroscopy, 2013, 83-84, pp. 14-20*

**CAUDEVILLE Julien** Caractériser les inégalités environnementales *LAURENT Eloi, Vers l'égalité des territoires. Dynamiques, mesures, politiques. 2013, pp. 224-240*

**LE BIHAN Olivier**, SHANDILYA Neeraj, GHEERARDYN Ludovic, GUILLON Olivier, DORE Emmanuel, MORGENEYER Martin Investigation of the release of particles from a nanocoated product *Advances in Nanoparticles, 2013, 2 (1), pp. 39-44*

**SANTOS Raphaël**, PALOS-LADEIRO M., BESNARD A., **PORCHER Jean-Marc**, BONY Sylvie, **SANCHEZ Wilfried**, DEVAUX Alain Relationship between DNA damage in sperm after *ex vivo* exposure and abnormal embryo development in the progeny of the three-spined stickleback *Reproductive Toxicology, 2013, 36, pp. 6-11*

**CREUSOT Nicolas**, BUDZINSKI Hélène, BALAGUER Patrick, **KINANI Said**, **PORCHER Jean-Marc**, **AIT-AISSA Selim** Effect-directed analysis of endocrine-disrupting compounds in multi-contaminated sediment: identification of novel ligands of estrogen and pregnane X receptors *Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2013, 405 (8), pp. 2553-2566*

**CREUSOT Nicolas**, TAPIE Nathalie, **PICCINI Benjamin**, BALAGUER Patrick, **PORCHER Jean-Marc**, BUDZINSKI Hélène, **AIT-AISSA Selim** Distribution of steroid- and dioxin-like activities between sediments, POCIS and SPMD in a French river subject to mixed pressures *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2784-2794*

JONDEAU-CABATON Adeline, SOUCASSE Amélie, JAMIN Émilien, **CREUSOT Nicolas**, GRIMALDI Marina, JOUANIN Isabelle, **AIT-AISSA Selim**, BALAGUER Patrick, DEBRAUWER Laurent, ZALKO Daniel Characterization of endocrine disruptors from a complex matrix using estrogen receptor affinity columns and high performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2705-2720*

**BAUDIFFIER Damien**, **HINFRAY Nathalie**, RAVAUD Catherine, **CREUSOT Nicolas**, CHADILI Edith, **PORCHER Jean-Marc**, SCHULZ Rüdiger W., **BRION François** Effect of *in vivo* chronic exposure to clotrimazole on zebrafish testis function *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2747-2760*

**BADO-NILLES Anne**, BETOULLE Stéphane, GEFFARD Alain, **PORCHER Jean-Marc**, GAGNAIRE Béatrice, **SANCHEZ Wilfried** Flow cytometry detection of lysosomal presence and lysosomal membrane integrity in the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus L.*) immune cells: applications in environmental aquatic immunotoxicology *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2692-2704*

**SANCHEZ Wilfried**, BURGEOT Thierry, **PORCHER Jean-Marc** A novel “Integrated Biomarker Response” calculation based on reference deviation concept *Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20 (5), pp. 2721-2725*

MILINKOVITCH Thomas, IMBERT Nathalie, **SANCHEZ Wilfried**, LE FLOCH Stéphane, THOMAS-GUYON Hélène Toxicological effects of crude oil and oil dispersant: Biomarkers in the heart of the juvenile golden grey mullet (*Liza aurata*) *Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, 88, pp. 1-8*





# Publications

**HARATI Rania, VILLEGIER Anne-Sophie,** BANKS William A., MABONDZO Aloise  
Susceptibility of juvenile and adult blood-brain barrier to endothelin-1: regulation of P-glycoprotein and breast cancer resistance protein expression and transport activity  
*Journal of Neuroinflammation*, 2012, 9, p. art. 273

**ALBINET Alexandre, TOMAZ S.,** LESTREMAU François  
A really quick easy cheap effective rugged and safe (QuEChERS) extraction procedure for the analysis of particle-bound PAHs in ambient air and emission samples  
*Science of the Total Environment*, 2013, 450-451, pp. 31-38

HEINALA Milla, GUNDERT-REMY Ursula, WOOD Maureen, RUIJTEN Marc, BOS Peter, ZITTING Antt, BULL Sarah; RUSSELL David, NIELSEN Elsa, CASSEL Gudrun, LEFFLER Per, **TISSOT Sylvie**, VINCENT Jean-Martin, SANTONEN Tiina  
Survey on methodologies in the risk assessment of chemical exposures in emergency response situations in Europe  
*Journal of Hazardous Materials*, 2013, 244, pp. 545-554

STROMATAS Stavros, TURQUETY Solène, MENUT Laurent, CHEPFER Héléne, **PERE Jean-Christophe**, CESANA G., **BESSAGNET Bertrand**  
Lidar signal simulation for the evaluation of aerosols in chemistry transport models  
*Geoscientific Model Development*, 2012, 5 (6): pp. 1543-1564

MENUT Laurent, **BESSAGNET Bertrand**, **COLETTE Augustin**, KHVOROSTIYANOV Dmitry  
On the impact of the vertical resolution on chemistry-transport modelling  
*Atmospheric Environment*, 2013, 67, pp. 370-384

MIGLIETTA M. Marcello, THUNIS Philippe, GEORGIEVA Emilia, PEDERZOLI Anna, **BESSAGNET Bertrand**, TERRENOIRE Étienne, **COLETTE Augustin**  
Evaluation of WRF model performance in different European regions with the DELTA-FAIRMODE evaluation tool  
*International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 50 (1-4 (special issue)): p. 83-97

PERNIGOTTI Denise, GEORGIEVA Emilia, THUNIS Philippe, **BESSAGNET Bertrand**  
Impact of meteorological modelling on air quality: summer and winter episodes in the Po valley (Northern Italy)  
*International Journal of Environment and Pollution*, 2012, 50 (1-4 (special issue)), pp. 111-119

**DELPLANQUE Marion, COLLET Serge,** **DEL GRATTA Florence, SCHNURIGER Benoît,** **GAUCHER Rodolphe,** ROBINSON Brett, **BERT Valérie**  
Combustion of *Salix* used for phytoextraction: The fate of metals and viability of the processes  
*Biomass and Bioenergy*, 2013, 49, pp. 160-170

**R'MILI Badr, LE BIHAN Olivier, DUTOUQUET Christophe, AGUERRE-CHARIOL Olivier, FREJAFON Emeric**  
Particle Sampling by TEM Grid Filtration  
*Aerosol Science and Technology*, 2013, 47 (7), pp. 767-775

FOUCAULT Yann, DURAND Marie-José, **TACK Karine**, SCHRECK Eva, GERET Florence, LEVEQUE Thibaut, PRADERE Philippe, GOIX Sylvaine, DUMAT Camille  
Use of ecotoxicity test and ecoscores to improve the management of polluted soils: case of a secondary lead smelter plant  
*Journal of Hazardous Materials*, 2013, 246-247, pp. 291-299

**PERY Alexandre, BROCHOT Céline, ZEMAN Florence Anna, MOMBELLI Enrico, DESMOTS Sophie,** PAVAN Manuela, FIORAVANZO Elena, ZALDIVAR José-Manuel  
Prediction of dose-hepatotoxic response in humans based on toxicokinetic/toxicodynamic modeling with or without *in vivo* data: A case study with acetaminophen  
*Toxicology Letters*, 2013, 220 (1), pp. 26-34

**PERY Alexandre,** SCHUURMANN Gerrit, CIFFROY Philippe, FAUST Michael, BACKHAUS T., AICHER Lothar, **MOMBELLI Enrico, T EBBY Cléo,** CRONIN Mark, **TISSOT Sylvie, ANDRES Sandrine, BRIGNON Jean-Marc,** FREWER L., GEORGIOU S., MATTAS K., VERGNAUD J.C., PEIJNENBURG W., CAPRI Ettore, MARCHIS A., WILKS Martin  
Perspectives for integrating human and environmental risk assessment and synergies with socio-economic analysis  
*Science of the Total Environment*, 2013, 456-457, pp. 307-316

WILMES Anja, LIMONCIEL Alice, ASCHAUER Lydia, MOENKS Konrad, BIELOW Chris, LEONARD Martin O., HAMON Jeremy, CARPI Donatella, RUZEK Silke, HANDLER Andreas, SCHMAL Olga, HERRGEN Karin, BELLWON Patricia, BUREK Christof, TRUISI Germaine L., HEWITT Philip, DI CONSIGLIO Emma, TESTAI Emanuela, BLAAUBOER Bas J., GUILLOU Claude, HUBER Christian G., LUKAS Arno, PFALLER Walter, MUELLER Stefan O., **BOIS Frédéric Y.,** DEKANT Wolfgang, JENNINGS Paul  
Application of integrated transcriptomic, proteomic and metabolomic profiling for the delineation of mechanisms of drug induced cell stress  
*Journal of Proteomics*, 2013, 79, pp. 180-194

FILLLOL Clemence, DOR Frédéric, **DENYS Sébastien, TACK Karine,** LABAT Laurence, SETA Nathalie  
Arsenic urinary concentrations in children living in a naturally arsenic contaminated area  
*Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2013, 23 (2), pp. 145-150

LANDI T.C., CURCI Gabriele, CARBONE C., MENUT Laurent, **BESSAGNET Bertrand,** GIULIANELLI L., PAGLIONE M., FACCHINI M.  
Simulation of size-segregated aerosol chemical composition over northern Italy in clear sky and wind calm conditions  
*Atmospheric Research*, 2013, 125-126, pp. 1-11

**GHOSN Rania, VILLEGIER Anne-Sophie, SELMAOUI Brahim, THUROCZY Gyorgy, DE SEZE René**  
Effets des radiofréquences sur le système nerveux central chez l'homme: EEG, sommeil, cognition, vascularisation  
*Comptes Rendus Physique*, 2013, 14 (5), pp. 395-401

**ABOU CHAKRA Oussama,** SUTRA Jean-Pierre, DEMEY THOMAS Emmanuelle, VINH Joëlle, PONCET Pascal, **LACROIX Ghislaine,** SENECHAL Héliène  
Proteomic analysis of major and minor allergens from isolated pollen cytoplasmic granules  
*Journal of Proteome Research*, 2012, 11 (2), pp. 1208-1216

KOCH Iris, REIMER Kenneth, BAKKER Martine, BASTA Nicholas, CAVE Mark, **DENYS Sébastien,** DODD Matt, HALE Beverly, IRWIN Rob, LOWNEY Yvette, MOORE Margo, PAQUIN Viviane, RASMUSSEN Pat, REPASO-SUBANG Theresa, STEPHENSON Gladys, SICILIANO Steven, WRAGG Joanna, ZAGURY Gerald  
Variability of bioaccessibility results using seventeen different methods on a standard reference material, NIST 2710  
*Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2013, 48 (6), pp. 641-655

**HARATI Rania, BENECH Henri, VILLEGIER Anne-Sophie,** MABONDZO Aloise  
P-Glycoprotein, breast cancer resistance protein, organic anion transporter 3, and transporting peptide 1a4 during blood-brain barrier maturation: involvement of Wnt/ beta-Catenin and Endothelin-1 signaling  
*Molecular Pharmaceutics*, 2013, 10 (5), pp. 1566-1580

**TEBBY Cléo, MOMBELLI Enrico**  
Modelling structure activity landscapes with cliffs: a kernel regression-based approach  
*Molecular Informatics*, 2013, 32 (7), pp. 609-623

**ZEMAN Florence Anna, BOUDET Céline, TACK Karine, BARNEAUD Adeline, BROCHOT Céline, PERY Alexandre,** OLEKO Amivi, VANDENTORREN Stéphanie  
Exposure assessment of phthalates in French pregnant women: Results of the ELFE pilot study  
*International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2013, 216 (3), pp. 271-279

KERDIVEL Gwenneg, LE GUEVEL Remy, HABAUZIT Denis, **BRION François, AIT-AISSA Selim,** PAKDEL Farzad  
Estrogenic potency of benzophenone UV filters in breast cancer cells: proliferative and transcriptional activity substantiated by docking analysis  
*PLoS One*, 2013, 8 (4), p. art. e60567

**MACE Tatiana, LEOZ Eva, MATHE François**  
Garantir la qualité des mesures en air ambiant de polluants atmosphériques réglementés: le modèle français  
*Pollution atmosphérique*, 2013 (217)

**CHIAPPINI Laura**  
L'acétaldéhyde en air intérieur: métrologie et niveaux mesurés  
*Pollution atmosphérique*, 2013 (217)

**CHIAPPINI Laura, ROSSIGNOL Stéphanie, RIO Caroline, USTACHE Aurélien, FABLE Sébastien,** NICOLLE Jérôme, NICOLAS Mélanie  
Formation d'aérosols organiques secondaires en air intérieur: le rôle des produits ménagers  
*Pollution atmosphérique*, 2012 (213-214), pp. 99-106

MICHELOT Nicolas, **MANDIN Corinne,** RAMALHO Olivier, RIBERON Jacques, **MARCHAND Caroline, MALHERBE Laure, RAMEL Martine,** PERSONNAZ Marie-Blanche, DELMAS Véronique, URBAN Soizic, CARRÉGA Marie  
Campagne pilote de surveillance de la qualité de l'air dans les écoles et crèches en France: Résultats de la première phase  
*Pollution atmosphérique*, 2011 (211), pp. 267-279

**SANTOS Raphaël, PALOS-LADEIRO M., BESNARD A., REGGIO J., VULLIET E., PORCHER Jean-Marc,** BONY Sylvie, **SANCHEZ Wilfried,** DEVAUX Alain  
Parental exposure to methyl methane sulfonate of three-spined stickleback: contribution of DNA damage in male and female germ cells to further development impairment in progeny  
*Ecotoxicology*, 2013, 22 (5), pp. 815-824

**GOUSSEN Benoît, PARISOT Florian, BEAUDOUIN Rémy,** DUTILLEUL Morgan, BUISSET-GOUSSEN Adeline, **PERY Alexandre,** BONZOM Jean-Marc  
Consequences of a multi-generation exposure to uranium on *Caenorhabditis elegans* life parameters and sensitivity  
*Ecotoxicology*, 2013, 22 (5), pp. 869-878

**HENNEBERT Pierre,** PAPIN Arnaud, PADOX Jean-Marie, **HAZEBROUCK Benoît**  
The evaluation of an analytical protocol for the determination of substances in waste for hazard classification  
*Waste Management*, 2013, 33 (7), pp. 1577-1588

**SIOUR Guillaume, COLETTE Augustin,** MENUT Laurent, **BESSAGNET Bertrand,** COLL Isabelle, **MELEUX Frédéric**  
Bridging the scales in a eulerian air quality model to assess megacity export of pollution  
*Environmental Modelling & Software*, 2013, 46, pp. 271-282

MENUT Laurent, **TRIPATHI Om, COLETTE Augustin,** VAUTARD Robert, FLAOUNAS Emmanouil, **BESSAGNET Bertrand**  
Evaluation of regional climate simulations for air quality modelling purposes  
*Climate Dynamics*, 2013, 40 (9-10), pp. 2515-2533

**ROSSIGNOL Stéphanie,** RIO Caroline, **USTACHE Aurélien, FABLE Sébastien,** NICOLLE J., MEME A., D'ANNA Barbara, NICOLAS Mélanie, **LEOZ Eva, CHIAPPINI Laura**  
The use of a housecleaning product in an indoor environment leading to oxygenated polar compounds and SOA formation: Gas and particulate phase chemical characterization  
*Atmospheric Environment*, 2013, 75, pp. 196-205

MENUT Laurent, PEREZ C., HAUSTEIN K., **BESSAGNET Bertrand,** PRIGENT C., ALFARO S.  
Impact of surface roughness and soil texture on mineral dust emission fluxes modeling  
*Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2013, 118 (12), pp. 6505-6520

**HUGUIER Pierre, MANIER Nicolas, MELINE Camille,** BAUDA Pascale, **PANDARD Pascal**  
Improvement of the *Caenorhabditis elegans* growth and reproduction test to assess the ecotoxicity of soils and complex matrices  
*Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, 32 (9), pp. 2100-2108

## RISQUES ACCIDENTELS

**2012**  
**DI TOMMASO Stefania, ROTUREAU Patricia,** ADAMO Carlo  
Oxidation mechanism of aliphatic ethers: theoretical insights on the main reaction channels  
*Journal of Physical Chemistry A*, 2012, 116 (36), pp. 9010-9019

**NORET E., PROD'HOMME Gaëtan,** YALAMAS Thierry, **REIMERINGER Mathieu,** HANUS Jean-Luc, **DUONG Duy-Hung**  
Safety of atmospheric storage tanks during accidental explosions  
*European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012, 16 (9), pp. 998-1022

**DUONG Duy-Hung,** HANUS Jean-Luc, BOUZAOUJ L., PENNETIER Olivier, MORICEAU J., **PROD'HOMME Gaëtan, REIMERINGER Mathieu**  
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, 16 (9), pp. 1023-1041

**DUONG Duy-Hung,** HANUS Jean-Luc, BOUZAOUJ L., REGAL X., **PROD'HOMME Gaëtan,** NORET E., YALAMAS Thierry, **REIMERINGER Mathieu,** BAILLY Patrice, PENNETIER Olivier  
Response of a tank under blast loading - part II: experimental structural response and simplified analytical approach  
*European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012, 16 (9), pp. 1023-1041

KWOK Queenie, ACHESON Barbara, TURCOTTE Richard, **JANES Agnès, MARLAIR Guy**  
Thermal hazards related to the use of potassium and sodium methoxides in the biodiesel industry  
*Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, 111, pp. 507-515

HOUSSIN-AGBOMSON Deborah, **JAMOIS Didier, PROUST Christophe, DAUBECH Jérôme,** RUBAN Sidonie, JALLAIS Simon  
Study of potential leakage on several stressed fittings for hydrogen pressures up to 700 bar  
*International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, pp. 17509-17516

RUBAN Sidonie, **HEUDIER Laure, JAMOIS Didier, PROUST Christophe,** BUSTAMANTE-VALENCIA L., JALLAIS Simon, KREMER-KNOBLOCH K., MAUGY C., VILLALONGA S.  
Fire risk on high-pressure full composite cylinders for automotive applications  
*International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, pp. 17630-17638

**GENTILHOMME Olivier, PROUST Christophe, JAMOIS Didier,** TKATSHENKO Isabelle, CARITEAU Benjamin, STUDER Étienne, MASSET Franck, JONCQUET Guillaume, AMIELH Muriel, ANSELMET Fabien  
Data for the evaluation of hydrogen risks onboard vehicles: outcomes from the French project drive  
*International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37, pp. 17645-17654

**DIALLO Alpha-Oumar,** LEN Christophe, MORGAN Alexander B., **MARLAIR Guy**  
Revisiting physico-chemical hazards of ionic liquids  
*Separation and Purification Technology*, 2012, 97 (SI), pp. 228-234

**PRANA Vinca, FAYET Guillaume, ROTUREAU Patricia,** ADAMO Carlo  
Development of validated QSPR models for impact sensitivity of nitroaliphatic compounds  
*Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235-236, p. 169-177

FAIRWEATHER M., S.A.E.G. FALLE, **HEBRARD Jérôme, JAMOIS Didier, PROUST Christophe,** WAREING C.J., WOOLLEY R.M.  
Reynolds-averaged navier-stokes modelling of the near-field structure of accidental releases of carbon dioxide from pipelines  
*22. European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE 22), 17- 20 October 2012, Londres, Royaume-Uni*

**COUDORO Kodjo**  
Étude expérimentale et modélisation de la propagation de flammes en milieu confiné et semi confiné  
*Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 27/01/2012*

**DUONG Duy-Hung**  
Étude de la vulnérabilité de structures cylindriques soumises à une forte explosion externe  
*Thèse de doctorat. Université d'Orléans, 23/03/2012*





# Publications

## CARNEVALI Sofia

Modélisation de la réaction Na-H<sub>2</sub>O appliquée au lavage des composants contenant du sodium à l'état solide dans une enceinte inertée ou non  
*Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne, 22/10/2012*

## JANES Agnès

Caractérisation des dangers des produits et évaluation des risques d'explosion d'ATEX, contribution à l'amélioration de la sécurité des procédés industriels

## 2013

MEBARKI Ahmed, JEREZ Sandra, MATASIC Igor, **PROD'HOMME Gaëtan**, **REIMERINGER Mathieu**

Explosions and structural fragments as industrial hazard: domino effect and risks  
*2012 International symposium on safety science and technology (ISSST), 23-26 October 2012, Nanjing, Chine + Procedia Engineering, 2012, 45, pp. 159-166*

HANUS Jean-Luc, MAGNAIN Benoît, DURAND Bastien, ALANIS-RODRIGUEZ Javier, BAILLY Patrice

Processing dynamic split Hopkinson three-point bending test with normalized specimen of quasi-brittle material  
*Mechanics & Industry, 2012, 13 (6), pp. 381-393*

**DIALLO Alpha-Oumar**, MORGAN Alexander B., LEN Christophe, MARLAIR Guy

An innovative experimental approach aiming to understand and quantify the actual fire hazards of ionic liquids  
*Energy & Environmental Science, 2013, 6 (3): pp. 699-710*

**SALVI Olivier**, CHAUBET Christine, **EVANNO Sébastien**

Biogas: Opportunities to Improve Safety and Safety Regulation  
*Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava, Safety Engineering Series, 2012, 2 (2), pp. 36-43*

## LE COZE Jean-Christophe

Outlines of a sensitising model for industrial safety assessment  
*Safety Science, 2013, 51 (1), pp. 187-201*

## LE COZE Jean-Christophe

What have we learned about learning from accidents? Post-disasters reflections  
*Safety Science, 2013, 51 (1), pp. 441-453*

## LE COZE Jean-Christophe, WIIG Siri

Beyond procedures: Can "Safety Culture" Be regulated?  
*BIEDER, Corinne; BOURRIER, Mathilde - Trapping safety into rules. how desirable or avoidable is proceduralization ?, Ashgate, 2013, pp. 191-204*

**ABOU ASSALI Amjad**, LENNE Dominique, **DEBRAY Bruno**

Adaptation knowledge acquisition in a CBR system  
*International Journal on Artificial Intelligence Tools, 2013, 22 (1): p. 1250041*

**CARNEVALI Sofia**, **PROUST Christophe**, SOUCILLE Michel

Unsteady aspects of sodium-water-air reaction  
*Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91 (4): pp. 633-639*

KWOK Queenie, ACHESON Barbara, TURCOTTE Richard, **JANES Agnès**, **MARLAIR Guy**

Fire and explosion hazards related to the industrial use of potassium and sodium methoxides  
*Journal of Hazardous Materials, 2013, 250-251: pp. 484-490*

MURILLO Carlos, DUFAUD Olivier, LOPEZ Omar, PERRIN Laurent, **VIGNES Alexis**, MUNOZ Felipe  
CFD modelling of nanoparticles dispersion in a dust explosion apparatus  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, p. 889-894 (Chemical engineering transactions, 31)*

**HENRY François**, MARCHAL Philippe, **BOUILLARD Jacques**, **VIGNES Alexis**, DUFAUD Olivier, PERRIN Laurent

The effect of agglomeration on the emission of particles from nanopowders flow  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, p. 811-816 (Chemical engineering transactions, 31)*

**FLEURY Dominique**, **FAYET Guillaume**, **VIGNES Alexis**, HENRY François, **FREJAFON Emeric**

Nanomaterials risk assessment in the process industries: evaluation and application of current control banding methods  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, p. 949-954 (Chemical engineering transactions, 31)*

**MARLAIR Guy**, **DIALLO Alpha-Oumar**, **BENAÏSSA Wassila**, **VIGNES Alexis**, BLANC Lysiane, LEN Christophe

Developing dedicated methods and tools for safe use and processing of key chemicals in biorefining  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, p. 859-864 (Chemical engineering transactions, 31)*

**JANES Agnès**, **CARSON Douglas**

Effect of inerts on ignition sensitivity of dusts  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, pp. 829-834 (Chemical engineering transactions, 31)*

**JANES Agnès**, **CARSON Douglas**

Experimental study of bulk storage ignition by hot points  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 4th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, pp. 919-924 (Chemical engineering transactions, 31)*

**JANES Agnès**, **CHAINEAUX Jacques**

Experimental determination of flash points of flammable liquid aqueous solutions  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, pp. 943-948 (Chemical engineering transactions, 31)*

**CAGNINA Stefania**, **ROTUREAU Patricia**, ADAMO Carlo

Study of incompatibility of ammonium nitrate and its mechanism of decomposition by theoretical approach  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, pp. 823-828 (Chemical engineering transactions, 31)*

**FAYET Guillaume**, **ROTUREAU Patricia**, **PRANA Vinca**, ADAMO Carlo

Prediction of physico-chemical properties for REACH based on QSPR models  
*DE RADEMAEKER Eddy, FABIANO Bruno, SENNI BURATTI Simberto - Proceedings of the 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, pp. 925-930 (Chemical engineering transactions, 31)*

**LACOME Jean-Marc**, **TRUCHOT Benjamin**

Harmonization of practices for atmospheric dispersion modelling within the framework of risk assessment  
*SAN JOSE Roberto, LUIS PEREZ Juan - Proceedings of the 15th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes. Madrid: Technical University of Madrid, 2013, pp. 718-723*

**LACOME Jean-Marc**, **TOGNET Frédéric**, OLRV C., NIBART M.

New lagrangian approach for wet plume modelling  
*SAN JOSE Roberto, LUIS PEREZ Juan - Proceedings of the 15th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes. Madrid: Technical University of Madrid, 2013, pp. 800-805*

**DIALLO Alpha-Oumar**, **TRUCHOT Benjamin**, **MARLAIR Guy**, LEN Christophe

An insight of combustibility induced safety issues pertaining to ionic liquids  
*BRADLEY D., MAKHVILADZE G., MOLKOV V., SUNDERLAND P., TAMANINI F. - Proceedings of the seventh international seminar on fire and explosion hazards. Singapore: Research Publishing, 2013*

**TRUCHOT Benjamin**, **PATEJ Stéphanie**, RAHMAN Shihab, **DUPLANTIER Stéphane**

Development of an innovative method for elementary heat release rate computation  
*Proceedings of the 13th International Interflam Conference. 2013, pp. 617-622*

GRIDELET L., DELBECQ P., HERVE L., **FAYET Guillaume**, **FLEURY Dominique**, **KOWAL Sophie**, BOISSOLLE P.

Risk assessment method for the implementation of materials divided up to the nanometric scale  
*Journal of Physics - Conference Series, 2013, 429, p. art 012064*

DEARDEN John C., **ROTUREAU Patricia**, **FAYET Guillaume**

QSPR prediction of physico-chemical properties for REACH  
*SAR and QSAR in Environmental Research, 2013, 24 (4), pp. 545-584*

**CAGNINA Stefania**, **ROTUREAU Patricia**, **FAYET Guillaume**, ADAMO Carlo

The ammonium nitrate and its mechanism of decomposition in the gas phase: a theoretical study and a DFT benchmark  
*Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15 (26), pp. 10849-10858*

**ESHETU Gebrekidan G.**, GRUGEON Sylvie, LARUELLE Stéphane, **BOYANOV Simeon**, **LECOQC Amandine**, **BERTRAND Jean-Pierre**, **MARLAIR Guy**

In-depth safety-focused analysis of solvents used in electrolytes for large scale lithium ion batteries  
*Physical Chemistry Chemical Physics, 2013, 15 (23), pp. 9145-9155*

ALAZARD-TOUX Nathalie, BALLERINI Daniel, DOHY M., GABRIELLE B., **MARLAIR Guy**, MONTAGNE X., SIGAUD J.B.

Biofuels: a partial solution with several challenges  
*BALLERINI, D. - Biofuels: meeting the energy and environmental challenges of the transportation sector. Paris, Technip, 2012, pp. 1-18*

PALTRINIERI Nicola, **DECHY Nicolas**, SALZANO Ernesto, WARDMAN Mike, COZZANI Valerio

Towards a new approach for the identification of atypical accident scenarios  
*Journal of Risk Research, 2013, 16 (3-4), pp. 337-354*

ZAREA Murès, POGNONEC Gaël, SCHMIDT Christina, SCHNUR Tilo, LANA José, BOEHM Christoph, BUSCHMANN Marco, **MAZRI Chabane**, RIGAUD Éric

First steps in developing an automated aerial surveillance approach  
*Journal of Risk Research, 2013, 16 (3-4), pp. 407-420*

## RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

## 2012

**MAISON Tatiana**, **KAZMIERCZAK**

Jean-Bernard, **LAOUAFA Farid**, **DELALAIN Patrice**  
Apport d'un nouveau dispositif pour améliorer l'estimation du retrait-gonflement des argiles  
*Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces urbains, ruraux, souterrains et littoraux", tome 2. Bordeaux, Laboratoire I2M, 2012, p. 811-812*

EDJOSSAN-SOSSOU Abia-M., **AL HEIB Marwan**, DECK Olivier, VERDEL Thierry

Gestion durable des risques d'affaissement minier: choix de stratégies – cas de Moyeuve-Grande  
*Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces urbains, ruraux, souterrains et littoraux": tome 2. Bordeaux, Laboratoire I2M, 2012, pp. 811-812*

**GOMBERT Philippe**, **DAMART Vincent**

Stabilité des carrières souterraines abandonnées en relation avec les fluctuations du niveau d'ennoyage  
*Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces urbains, ruraux, souterrains et littoraux", tome 2. Bordeaux, Laboratoire I2M, 2012, pp. 811-812*

**LECOMTE Amélie**, **CHARMOILLE Arnaud**, **DAUPLY Xavier**, **GOMBERT Philippe**

Méthodologie d'évaluation de l'aléa mouvement de terrain résultant de la dissolution naturelle de gypse: exemple du bois de la Tussion, Seine-Saint-Denis, France  
*Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces urbains, ruraux, souterrains et littoraux", tome 2. Bordeaux, Laboratoire I2M, 2012, pp. 811-812*

**DOCHEZ Sandra**, GUEDON Sylvine, MARTINEAU François, **LAOUAFA Farid**, FRANCK Christian, BOST Marion

Action altérante de l'eau dans les discontinuités rocheuses  
*Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2012) "Espaces urbains, ruraux, souterrains et littoraux", tome 2. Bordeaux, Laboratoire I2M, 2012, pp. 811-812*

**BIGARRÉ Pascal**, **COCCIA S.**, **CONTRUCCI**

Isabelle, KLEIN Emmanuelle  
Precursory signs of a large cavern collapse  
*33. General Assembly of the European Seismological Commission (ESC 2012) "Seismology without boundaries", 19-24 August 2012, Moscou, Russie*

**AL HEIB Marwan**

Numerical and geophysical tools applied for the prediction of mine induced seismicity in French coalmines  
*International Journal of Geosciences, 2012, 3 (24A), pp. 834-846*

**MAISON Tatiana**, **KAZMIERCZAK**

Jean-Bernard, **LAOUAFA Farid**, **DELALAIN Patrice**  
Development of a new experimental device in order to improve swelling-shrinkage analysis of clayey soils  
*LALOUI Lyesse, FERRARI Alessio - Multiphysical testing of soils and shales. Berlin: Springer, 2013, pp. 213-218 (Springer Series in Geomechanics and Geoengineering)*

**HOR Boramy**

Évaluation et réduction des conséquences des mouvements de terrains sur le bâti: approches expérimentale et numérique  
*Thèse de doctorat (Génie civil - Géotechnique). INSA Lyon, 24/01/2012*

**LE GAL Niils**

Libération et migration du méthane depuis le charbon dans un contexte hydrogéologique post-minier: développement d'un protocole expérimental et approche numérique  
*Thèse de doctorat (Hydrologie et hydrogéologie quantitatives). Ecole nationale supérieure des mines, Paris, 18/06/2012*

MIN Ki-Boh, **THORAVAL Alain**

Comparison of two- and three-dimensional approaches for the numerical determination of equivalent mechanical properties of fractured rock masses  
*Tunnel and Underground Space - Journal of Korean Society for Rock Mechanics, 2012, 22 (2), pp. 93-105*

## 2013

DUTKA Barbara, KUDASIK Mateusz, **POKRYSZKA Zbigniew**, SKOCZYLAS Norbert, TOPOLNICKI Juliusz, WIERZBICKI Miroslaw

Balance of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> exchange sorption in a coal briquette  
*Fuel Processing Technology, 2013, 106, pp. 95-101*

DORAI Ferdaous, DEBENEST Gérard, LUO Haishan, DAVARZANI H., BOUHLILA R., **LAOUAFA Farid**, QUINTARD Michel

Experimental and numerical study of the salt dissolution in porous media  
*FERREIRA J.A., BARBEIRO S., PENA G., WHEELER M.F. - Modelling and simulation in fluid dynamics in porous media. New York: Springer, 2013, pp. 201-209 (Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, 28)*

SAEIDI Ali, DECK Olivier, **AL HEIB Marwan**, VERDEL Thierry, ROULEAU Alain

Adjusting the influence function method for subsidence prediction  
*OCHSNER Andreas, ALTENBACH Holm - Advanced Computational Engineering and Experimenting II: Trans Tech Publications, 2013, pp. 59-66 (Key Engineering Materials, 553)*

**KINSCHER Jannes**, **CONTRUCCI Isabelle**,

BERNARD Pascal, MANGENEY A., PIGUET Jack-Pierre, **BIGARRÉ Pascal**  
Semi-automatic detection and localization of microseismicity induced by a "salt dissolution provoked" cavity collapse  
*Proceedings of the 4th Passive Seismic Workshop. Houten, EAGE, 2013, pp. 173-180*





# Publications

**DIDIER Christophe, VAN DER MERWE J. Nielen**

La catastrophe de Coalbrook en 1960 – Afrique du Sud

DUFFAUT Pierre – *Manuel de mécanique des roches. Tome III: Retours d'expériences – Génie minier et pétrolier. Paris, Presses des Mines, 2013, pp. 30-39 (Sciences de la terre et de l'environnement)*

**DAUPLEY Xavier, LAOUAFA Farid, CONTRUCCI Isabelle**

L'effondrement de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt – Analyse des mécanismes conduisant à l'effondrement

DUFFAUT, Pierre – *Manuel de mécanique des roches. Tome III: Retours d'expériences – Génie minier et pétrolier. Paris, Presses des Mines, 2013, pp. 59-69 (Sciences de la terre et de l'environnement)*

**AL HEIB Marwan, EMERIAULT Fabrice, KAZMIERCZAK Jean-Bernard**

Periphery trench for reducing the impact of surface subsidence on structures

MESCHKE Gunther, EBERHARDSTEINER Josef, SCHANZ Tom, SOGA Kenichi, THEWES Markus – *Proceedings of the third international conference on computational methods in tunneling and subsurface engineering (EURO:TUN 2013). Freiburg: Aedificatio, 2013, pp. 163-175*

**DOCHEZ Sandra, LAOUAFA Farid, FRANCK Christian, GUEDON Sylvine, MARTINEAU François, BOST Marion, D'AMATO Julie**

Influence of water on rock discontinuities and stability of rock mass

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, pp. 219-222*

**GOMBERT Philippe, AUVRAY Christophe, AL HEIB Marwan**

In-situ and laboratory tests to evaluate the impact of water table fluctuations on stability of underground chalk mines

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, pp. 304-308*

**RHENALS GARRIDO David Ricardo, LAFORTUNE Stéphane, SOULI Hanène, DUBUJET Philippe**

Impact of supercritical CO<sub>2</sub>/water interaction on the caprock nanoporous structure

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, p. 738-741*

**LAGNY Candice, LAFORTUNE Stéphane, CHARMOILLE Arnaud, POKRYSZKA Zbigniew, DEGRELLE François, KIMMEL Marion**

Understanding CO<sub>2</sub> Gas Production Above a Partly Flooded, Former Coal Mining Area

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, pp. 455-458*

**RILLARD Jean, GOMBERT Philippe, TOULHOAT Pierre, ZUDDAS P.**

Kinetic rate of iron release during artificial CO<sub>2</sub> injection in a shallow aquifer: preliminary results

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, pp. 742-745*

**ZUDDAS Pierpaolo, RILLARD Jean**

Estimating the reactive surface area of minerals in natural hydrothermal fields: preliminary results

*Procedia Earth and Planetary Science, 2013, 7, pp. 953-957*

**NADIM Charles-Édouard, ROYET Paul, MERIAUX Patrice, DUVAL Christophe**

Étude des méthodes éprouvées et innovantes pour la surveillance des digues

2. Colloque national "Digues maritimes et fluviales de protection contre les submersions", 12-14 juin 2013, Aix-en-Provence, France

**LAGNY Candice**

The emissions of gases from abandoned mines: role of atmospheric pressure changes and air temperature on the surface

*Environmental Earth Sciences, 2013. Accepted*

**GOMBERT Philippe, CARRÉ Jean**

Toxicité et écotoxicité des principaux traceurs fluorescents employés en hydrogéologie et de leurs produits de dégradation

*Karstologia, 2011 (58), pp. 41-53*

**LIONS J., POKRYSZKA Zbigniew, AGRINIER P., MULLER F., GRELLIER S., SQUARCIONI P.**

Potential impacts of CO<sub>2</sub> geological storage on fresh groundwater quality: the CIPRES project

*Stadium conference "Geochemical reactivity in CO<sub>2</sub> geological storage sites: Advances in optimizing injectivity, assessing storage capacity and minimizing environmental impacts", 25-26 february 2013, Orléans, France*

**PRUNIER Florent, LIGNON Sylvain, LAOUAFA Farid, DARVE Félix**

Modeling landslides with a material instability criterion

*HICHER, P.Y. – Multiscale geomechanics: from soil to engineering projects. London: Wiley ISTE, 2011, pp. 221-242*

**DEGAS Marie, CHERKAoui Auxane, WATELET Jean-Marc**

La plate-forme expérimentale et de démonstration de Saint-Maximin: un outil pour comprendre et gérer les risques liés aux cavités souterraines

*Tunnels et espace souterrain, 2013 (237), pp. 35-41*

## AUTRES

### 2012

**ROUSSEAU Alain, GRUET Pierre**

Storm detectors. Tests and application

*Proceedings of the 31st International Conference on Lightning Protection. 2012*

**PRATS Alain**

Politique environnementale

*Techniques de l'ingénieur. Paris: Éditions techniques de l'ingénieur, 2012, p. G 4 998*

### 2013

**ROLLAND S., TRIBET M., BROUDIC V., JOLLIVET P., JEGOU C., TOULHOAT Pierre**

Effect of groundwater on the dissolution rate of the simulated nuclear waste glass SON68 under gamma irradiation

*Procedia Chemistry, 2012, 7, pp. 587-592*

**MERAD Myriam, DECHY Nicolas, SERIR Lisa, GRABISCH Michel, MARCEL Frédéric**

Using a multi-criteria decision aid methodology to implement sustainable development principles within an organization

*European Journal of Operational Research, 2013, 224 (3), pp. 603-613*

**BOUILLARD Jacques, R'MILI Badr, MORANVILLER Daniel, VIGNES Alexis, LE BIHAN Olivier, USTACHE Aurélien, BOMFIM Joao A.S., FRÉJAFON Émeric, FLEURY Dominique**

Nanosafety by design: risks from nanocomposite/nanowaste combustion

*Journal of Nanoparticle Research, 2013, 15 (4), p. art. 1519*

**MERAD Myriam, DECHY Nicolas, MARCEL Frédéric, LINKOV Igor**

Multiple-criteria decision-aiding framework to analyze and assess the governance of sustainability

*Environment Systems and Decisions, 2013, 32 (2), pp. 305-321*





**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)