

RAPPORT SCIENTIFIQUE
2013 | 2014

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.

RAPPORT SCIENTIFIQUE
2013 | 2014

SOMMAIRE

INTRODUCTION p. 4

- 4 Maîtriser le risque dans un monde en transition
- 6 Partenariats, production scientifique et rayonnement de l'Institut
- 8 Axes de recherches de l'INERIS



NOUVELLES TECHNOLOGIES p. 10

- 12 Synthèse des impacts potentiels d'une fuite de CO₂ depuis un site de stockage géologique sur les processus géochimiques
- 14 Comprendre la physique des fuites massives de CO₂
- 16 Prise en compte de l'évolution de l'état d'agglomération dans l'étude de l'écotoxicité des nanoparticules
- 18 Coopération cellulaire et rôle du récepteur P2X₇ dans l'inflammation pulmonaire induite par les nanoparticules



SUBSTANCES CHIMIQUES p. 20

- 22 Évaluation de l'exposition des femmes enceintes françaises aux phtalates
- 24 Effets du bisphénol A sur les écosystèmes aquatiques évalués en mésocosme
- 26 Contamination des poissons d'eau douce par les microplastiques
- 28 **FOCUS** L'application de la modélisation QSAR à la nanotoxicologie
- 29 Développement de modèles QSPR validés pour la prédiction de la stabilité thermique des peroxydes organiques
- 31 **FOCUS** Détermination de la *cis* et *trans*-perméthrine et de leurs métabolites dans le sang et les organes de rat
- 32 Le modèle embryonnaire de poisson zèbre transgénique cyp19a1b-GFP



SITES ET TERRITOIRES p. 34

RISQUES NATURELS ET TECHNOLOGIQUES

- 36** Protéger les infrastructures de transport contre les accidents majeurs
- 38** Des nouveaux modèles pour appréhender la construction de la sécurité industrielle
- 40** Dispositifs et stratégies de monitoring pour la surveillance de sites de stockage géologique
- 42** Dissolution des évaporites : formalisation et développement de modèles numériques bi & tri-phasiques
- 44 FOCUS** La plate-forme expérimentale et de démonstration de Saint-Maximin
- 45** Rôle des effondrements karstiques dans les désordres survenus sur les digues de Loire

RISQUES SANITAIRES & ENVIRONNEMENTAUX

- 47 FOCUS** Les échantillonneurs passifs pour mesurer la qualité des eaux souterraines au droit des sites pollués
- 48** Combustion de saules utilisés en phytoextraction
- 50** Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale
- 52** Évaluation des risques sanitaires à l'échelle d'un territoire
- 54** Quantification des relations spatiales entre données environnementales, socio-économiques et sanitaires à différents niveaux géographiques
- 56** Interaction d'échelles dans les modèles de chimie-transport pour mieux connaître l'impact des grandes villes sur leur environnement
- 58** Impact des incendies de forêts russes d'août 2010 sur la qualité de l'air et les propriétés de l'atmosphère
- 60** Effets thermiques locaux potentialisés par les ondes radiofréquences



ANNEXES p. 62



Raymond Cointe,
Directeur général
Chief Executive Officer

« L'Institut a été pionnier sur plusieurs risques émergents »

Maîtriser le risque dans un monde en transition

Alors en poste au ministère de l'environnement, j'ai fait connaissance avec l'INERIS à la fin des années 90, au moment de la négociation de son premier contrat d'objectifs et de la crise de l'Erika. À sa tête depuis un an, j'ai pu mesurer le chemin parcouru depuis sa création il y a presque 25 ans. 25 ans consacrés à la maîtrise des risques, en s'appuyant sur l'expertise industrielle des charbonnages et de la chimie dont l'INERIS a hérité et qu'il a su développer pour accompagner la montée en puissance des politiques de prévention des risques. 25 ans marqués par plusieurs catastrophes technologiques, en France et à l'étranger, rappelant si cela était nécessaire que le risque zéro n'existe pas. 25 ans qui ont également vu de nouveaux risques émerger, et de nouvelles peurs apparaître. Cette aversion croissante au risque, concomitante d'une accélération du rythme de l'innovation, a révélé les réserves de plus en plus fortes de la société quant à certaines innovations technologiques. D'où, sans doute, la montée en puissance de controverses sur le principe de précaution dont la mise en œuvre s'est également déployée ces 25 dernières années après ses premières traductions juridiques dans le droit communautaire et international au début des années 90.

Alors que la négociation du prochain contrat d'objectifs de l'Institut - le quatrième - s'engage avec sa tutelle, c'est en capitalisant sur l'expérience de ces 25 années que l'Institut sera le mieux à même de répondre aux attentes du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, et, plus largement, de la société. L'INERIS devra pour cela analyser aussi bien son évolution propre que celle de la société et de son rapport au risque, en s'appuyant sur des

évaluations externes comme celle que le Haut conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur réalisera en 2015.

Indéniablement, l'Institut a été pionnier sur plusieurs risques « émergents ». Il a ainsi pu jouer un rôle de lanceur d'alerte puis devenir un acteur incontournable non seulement de l'expertise mais aussi de la recherche dans plusieurs domaines, par exemple les perturbateurs endocriniens depuis la fin des années 90, les ondes électromagnétiques depuis le début des années 2000, les nanomatériaux et les facteurs organisationnels et humains (FOH) depuis une dizaine d'années. Ce rapport scientifique fait état des dernières avancées de l'Institut dans ces domaines qui restent des thématiques majeures de son activité.

L'Institut continue également à défricher de nouveaux champs. La contamination des eaux douces par les microplastiques, le couplage entre inégalités environnementales et sociales ou les stockages souterrains de CO₂ ou d'énergie décrits dans ce rapport en sont de bons exemples.

Les recherches de l'Institut ont été essentielles pour appuyer les pouvoirs publics dans leur rôle législatif et réglementaire de prévention des risques. C'est notamment grâce à elles que l'Institut a pu contribuer après la catastrophe d'AZF à l'élaboration des Plans de prévention des risques technologiques (PPRT) ou, plus récemment, à l'élaboration du troisième Plan National Santé-Environnement.

Mais son rôle va au-delà. Ses recherches ont aussi permis à l'Institut de développer l'information du public sur les risques, notamment pour la surveillance de la qualité de l'air et des eaux, et pour l'appui aux pouvoirs publics en situation d'urgence. De



« INERIS has
been a pioneer in
several emerging
risks »

Risk management in a changing world

plus en plus, elles permettent également à l'Institut d'accompagner l'innovation pour que les entreprises développent des produits ou des procédés plus propres et plus sûrs dès leur conception, puis d'en faciliter la diffusion par ses actions de certification et de labellisation.

Au moment où le souci de restaurer la compétitivité de la France pousse à lever les freins à l'innovation, et où les contraintes budgétaires se font plus pressantes sur les organismes publics, la recherche de l'Institut doit se concentrer sur ses points forts. Elle doit aussi s'appuyer sur des partenariats forts avec les meilleures équipes de recherche de l'Université, des établissements de recherche mais aussi des entreprises, en France et à l'international. Elle doit également continuer à s'ouvrir sur la société, pour s'assurer que les champs qu'elle défriche correspondent aux attentes non seulement des pouvoirs publics ou des entreprises, mais aussi plus largement de l'ensemble des acteurs de la société.

C'est seulement ainsi qu'une réponse pourra être apportée aux craintes souvent légitimes qui apparaissent lors du déploiement de certaines innovations, ou, pour le dire autrement, à l'exigence de précaution émanant du public. C'est ainsi aussi que l'Institut pourra répondre aux attentes d'un État stratège, de plus en plus souvent amené à inciter autant qu'à réglementer. Accompagner la transition énergétique pour la croissance verte, c'est aussi permettre le déploiement pérenne des innovations nécessaires en s'assurant qu'elles ne seront pas remises en questions par des risques non identifiés ou occultés. Et que les innovations les plus propres et les plus sûres se diffusent rapidement en trouvant leur place sur le marché.

INERIS will celebrate its 25th birthday next year. 25 years devoted to risk management, relying on the expertise of the coal and chemistry industries that INERIS inherited and developed to support risk prevention policies; 25 years marked by several technological disasters reminding us that there is no such a thing as zero risk; 25 years that have also seen new risks and new fears appear. This growing aversion to risk, together with an accelerated pace of innovation, has revealed an increased reluctance to embrace innovation. Hence, no doubt, controversies over the precautionary principle, progressively implemented over the last 25 years after it was first introduced into the EU treaty and the climate change convention in the early 90s.

INERIS has been a pioneer in several "emerging" risks. It was able to send early warnings in various areas: endocrine disruptors since the late 90s, electromagnetic waves since the 2000s, nanomaterials and human & organizational factors (HOF) for the past ten years. This report describes the most recent achievements of the Institute in these areas, which remain major themes of its work.

The Institute continues to break new ground: contamination of freshwater by microplastics, coupling of environmental and social inequalities, underground storage of CO₂ or energy described here are good examples. The Institute's research has been essential in supporting the French government in its regulatory risk prevention role. It is thanks to such research that the Institute has been able

to assist the setting up of new regulations in the wake of the AZF disaster in Toulouse or, more recently, the elaboration of the 3rd National Health and Environment Plan.

But its role goes beyond that: its research has also enabled the Institute to increase public awareness on environmental risks, including monitoring air and water quality, and supporting public authorities in crisis management. Increasingly, this research also enables the Institute to help companies to take risks into account at the design stage. INERIS also facilitates the distribution of cleaner and safer products or processes by its certification and labeling actions.

In this changing world, the Institute's research must focus on its strengths. It must rely on strong partnerships with the best research teams within universities and companies in France, in Europe and abroad. It must also continue to open up to society to ensure that its research agenda corresponds to the expectations of governments or corporations, but also of all stakeholders.

This is how INERIS will respond to the fears, often legitimate, that may arise during the development of new products or processes. This is also how it will meet the expectations of a strategist State, led more and more often to encourage as much as to regulate. Energy transition and green growth will only be possible through the sustainable development of innovations that will not be undermined by unknown or hidden risks.



Pierre Toulhoat,
Directeur scientifique
Scientific Director

« La production scientifique reflète l'implication de l'INERIS dans l'espace européen de la recherche et les relations régulières avec l'Amérique du Nord »

Partenariats, production scientifique et rayonnement de l'Institut

Les partenariats scientifiques sont essentiels au développement de notre recherche. En effet, la plupart des défis scientifiques auxquels nous sommes confrontés nécessitent la mise en place de projets collaboratifs. Cela commence par l'accueil de stagiaires ou de doctorants, qui sont co-encadrés par un chercheur de l'INERIS et un chercheur ou enseignant chercheur du monde académique, et dans certains cas par des personnels issus d'entreprises. Ces liens avec les laboratoires académiques se sont renforcés au cours du temps, et donnent lieu à des projets plus ambitieux, financés sur des guichets compétitifs (Europe, ANR, ADEME).

L'INERIS a développé des collaborations encore plus étroites avec des établissements d'enseignement supérieur et de recherche. Ainsi l'Institut est engagé dans l'UMR-I 01 PERITOX Périnatalité & Risques Toxiques EA 4285 - UMR-I 01, associant l'INERIS, l'Université de Picardie Jules Verne, et le CHU d'Amiens depuis 2008. Depuis le début de l'année 2014 a été créée l'UMR-I 02 SEBIO Stress environnementaux et biosurveillance des milieux aquatiques, associant l'INERIS, l'Université du Havre, et l'Université de Reims Champagne Ardenne.

D'autres implications pérennes de l'INERIS existent en milieu académique.

À l'UTC de Compiègne, une chaire de professeur en modélisation mathématique, biologie des systèmes pour la toxicologie prédictive est occupée par Frédéric Bois. Une chaire de professeur associé est occupée par Christophe Proust, au sein de l'unité TIMR, Équipe associée transformation intégrée de la matière renouvelable (un projet d'UMR avec l'UTC est à l'étude en lien avec l'unité TIMR)

À l'École des Mines de Nancy, l'INERIS est implanté sur le campus ARTEM. Une convention signée avec l'Institut national polytechnique de Lorraine (INPL) devrait être renouvelée avec l'Université de Lorraine.

À l'ENSIB de Bourges, maintenant INSA Centre Val de Loire, l'INERIS a une équipe, menant des travaux de recherche et d'expertise sur les risques industriels, en relation avec le PNRI.

Enfin, l'INERIS a développé depuis plusieurs années la plateforme ARDEVIE en lien avec le CEREGE sur le plateau de l'Arbois près d'Aix en Provence.

L'Institut a également mis en place de nombreux accords de coopération avec des organismes français et étrangers, et s'implique dans des GDR (Groupement de recherche), des GIS (Groupements d'intérêt scientifiques), et est à l'échelle européenne partenaire fondateur du GEIE EuVRI.

Publications co-signées avec des organismes nationaux*

CNRS	CEA	INSERM	INRA	UTC	UPJV
96	37	27	21	34	17

Les universités de Picardie se placent dans le peloton de tête où l'on trouve également les grandes universités parisiennes, l'Université de Lorraine, les universités de Lyon, de Rennes, de Toulouse, Bordeaux.

Publications co-signées avec des partenaires étrangers*

Japon, Corée du Sud, Chine, Taïwan, Inde	Pologne, Hongrie, Russie, Slovaquie, Croatie, Bulgarie, Serbie, Slovaquie, Albanie	Suède, Espagne, Belgique, Suisse, Norvège, Danemark, Autriche, Grèce, Finlande, Canada	Italie, Royaume Uni, Allemagne, Pays-Bas, États Unis
de 1 à 3	de 1 à 4	de 10 à 13	de 31 à 44

L'Afrique et l'Amérique du Sud sont très peu représentées.

* source INERIS



« Scientific production mainly reflects the involvement of INERIS in the European research arena, but also the regular scientific relations with North America »

Partnerships, scientific production and influence of the Institute

L'INERIS a produit plus de 340 publications dans les revues à comité de lecture ISI sur la période 2011-2014.

La production scientifique reflète principalement l'implication de l'INERIS dans l'espace européen de la recherche, mais aussi des relations scientifiques régulières avec l'Amérique du Nord (cf. tableau ci-contre). Des collaborations plus étroites commencent à se tisser avec les pays asiatiques, et vont s'amplifier prochainement avec la Chine, pays avec lequel se développent des collaborations spécifiques dans le domaine de la qualité de l'air, et de la maîtrise des risques liés à l'utilisation de nanopoudres (deux thèmes faisant l'objet d'un accord de collaboration avec la Beijing Academy of Science and Technology.)

Enfin une analyse de la production de l'INERIS montre que plus de 60 collaborateurs ont signé au moins 4 publications sur les 4 ans passés, avec une moyenne de 8. Ce critère permet aux yeux de l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES) de dénombrer 60 « chercheurs » à l'INERIS. Cette population de chercheurs a une production moyenne de deux articles dans des revues à comité de lecture classées ISI par an. Si l'on se rapporte au nombre total de cadres à l'INERIS, qui est de 350, on retrouve à peu près la proportion de 20 % de recherche sur l'ensemble de l'activité de l'INERIS en prenant en compte le fait que certains des cadres sont exclusivement dédiés aux activités de support. Cette analyse n'a pour objet que de situer le niveau de production scientifique de l'Institut par rapport aux autres établissements, mais la référence au sein de l'INERIS reste pour tout salarié, même de profil plutôt « chercheur », de contribuer également aux activités d'appui et d'expertise.

Scientific partnerships are essential to the development of our research. Indeed, most of the scientific challenges that we face require the establishment of collaborative projects. The process starts by welcoming interns or PhD students, who are co-supervised by an INERIS researcher and a researcher or research professor from the academic world, and, in some cases, by personnel from outside enterprises. These links with academic laboratories have been strengthened over time, and have led to more ambitious projects, funded by competitive sources (Europe, ANR, ADEME).

INERIS has developed ever closer collaborative relationships with higher education and research institutions. As such, INERIS has been involved in UMR-I01 PERITOX Perinatal & Toxic Risks EA 4285 - UMR-I01, uniting INERIS, the University of Picardie Jules Verne, and the Amiens University Hospital since 2008. UMR-I02 SEBIO Environmental Stresses and Biomonitoring of Aquatic Environments, uniting INERIS, the University of Le Havre and the University of Reims Champagne Ardennes was created at the beginning of 2014.

INERIS is also involved in ongoing activities in academia. At the UTC of Compiègne, a professorship in Mathematical Modeling, Systems Biology for Predictive Toxicology is occupied by Frederic Bois; a chair of Associate Professor is occupied by Christophe Proust in the TIMR Unit, Associate Team for the Integrated Transformation of Renewable Material (a UMR project with UTC is under consideration in conjunction with the TIMR Unit). At the Ecole des Mines of Nancy, INERIS is installed on the ARTEM campus. An agreement with the INPL (National Polytechnic Institute of Lorraine) should be renewed with the University of Lorraine. At the ENSIB of Bourges, now INSA Loire Valley Center, INERIS has a team conducting research and expertise on industrial risks in conjunction with the PNRI (National Research and Innovation Policies).

In recent years, INERIS has set up the ARDEVIE platform in conjunction with the CEREGE on the plateau of Arbois near Aix en Provence.

INERIS has also implemented numerous cooperation agreements with French and foreign agencies, engages in GDRs (Research Groups), GIS (Scientific Interest Groups), and - at the European level - is a founding partner of the EuVRI EEIG. INERIS has produced more than 340 publications in ISI peer-reviewed journals over the 2011-2014 period. Scientific production mainly reflects the involvement of INERIS in the European research arena, but also the regular scientific relations with North America. Closer collaborations are beginning to be built with Asian countries, and will expand soon with China, a country with which specific collaborations are being developed in the field of air quality and the control of risks associated with the use of nanopowders. The two subjects are the object of a cooperation agreement with the Beijing Academy of Science and Technology. Finally, an analysis of the production of INERIS employees shows that over 60 INERIS employees authored at least four publications over the past 4 years, the average being 8. This criterion enables AERES (Agency for the Evaluation of Research and Higher Education) to evaluate the number of "researchers" at INERIS at 60. This researcher population has a production average of two articles per year in peer-reviewed journals classified by ISI. If we consider this research effort in relation to the total number of managerial category staff at INERIS, which is 350, then research can be said to represent roughly 20% of all INERIS work, bearing in mind that some of the managerial staff are exclusively devoted to support activities. This analysis is only intended to assess the level of scientific output of the Institute in relation to other institutions, while the practice for any INERIS employee, even the more "research"-oriented, remains to also contribute to support and expertise activities.

Axes de recherche de l'INERIS

Risques chroniques



ÉVALUER LA TOXICITÉ ET L'ÉCOTOXICITÉ DES SUBSTANCES ET AGENTS PHYSIQUES, ÉVALUER ET SURVEILLER LEUR IMPACT SUR LE VIVANT

- ▣ Toxicologie : développement de méthodes alternatives et de biomarqueurs
- ▣ Écotoxicologie



CARACTÉRISER LES CONTAMINANTS DANS LES MILIEUX (AIR, EAU, SOL) ET LES SOURCES DE POLLUTION

- ▣ Chimie de l'environnement
- ▣ Métrologie de l'environnement : nouveaux polluants et nouveaux instruments



ÉVALUER ET "TERRITORIALISER" LES RISQUES SANITAIRES LIÉS AUX INSTALLATIONS (ET SOLS POLLUÉS) ET PROMOUVOIR LES TECHNOLOGIES ET PROCÉDÉS PROPRES ET DURABLES (DONT TRAITEMENT DES DÉCHETS)

- ▣ Mobilité en matrices complexes, efficacité et dépollutions
- ▣ Évaluation du risque sanitaire : spatialisation des inégalités environnementales, expologie



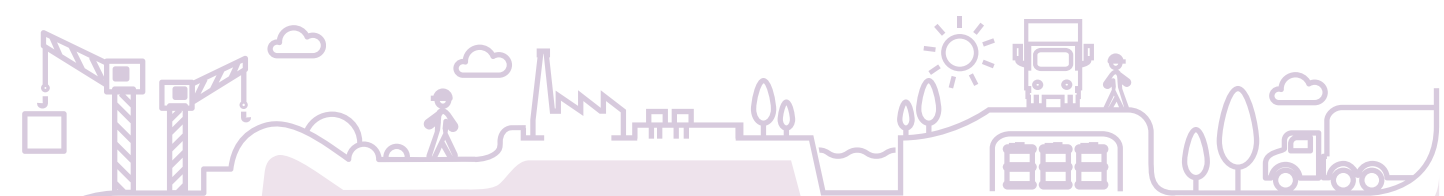
MODÉLISER ET PRÉVOIR LA POLLUTION, ADMINISTRER ET ANALYSER LES DONNÉES ENVIRONNEMENTALES ET L'EFFICACITÉ ÉCONOMIQUE DES STRATÉGIES DE RÉDUCTION DES IMPACTS

- ▣ Modélisation de la qualité de l'air / CHIMERE et ses produits dérivés
- ▣ Analyses socio-économiques et modélisation intégrées

Risques du sol et du sous-sol



ÉVALUER LES RISQUES LIÉS À L'APRÈS-MINE, AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ET LES RISQUES NATURELS ET PROPOSER DES MESURES DE GESTION



Risques accidentels



SUBSTANCES, PRODUITS ET PROCÉDÉS

- Sécurité des procédés de production de transformation de la biomasse
- Risques accidentels liés aux nanoparticules et matériaux nanostructurés
- Méthodes prédictives par modélisation moléculaire pour les propriétés physico-chimiques et la réactivité des substances
- Risques liés aux systèmes de stockage électrochimique



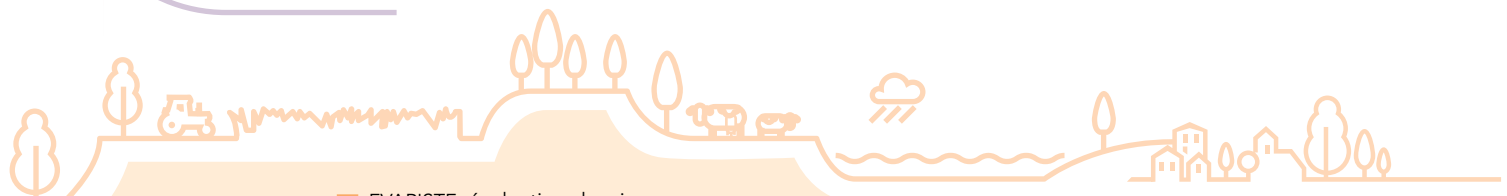
ANALYSE ET GESTION INTÉGRÉES DES RISQUES

- Évaluation et pilotage des systèmes socio-technologiques complexes à risques

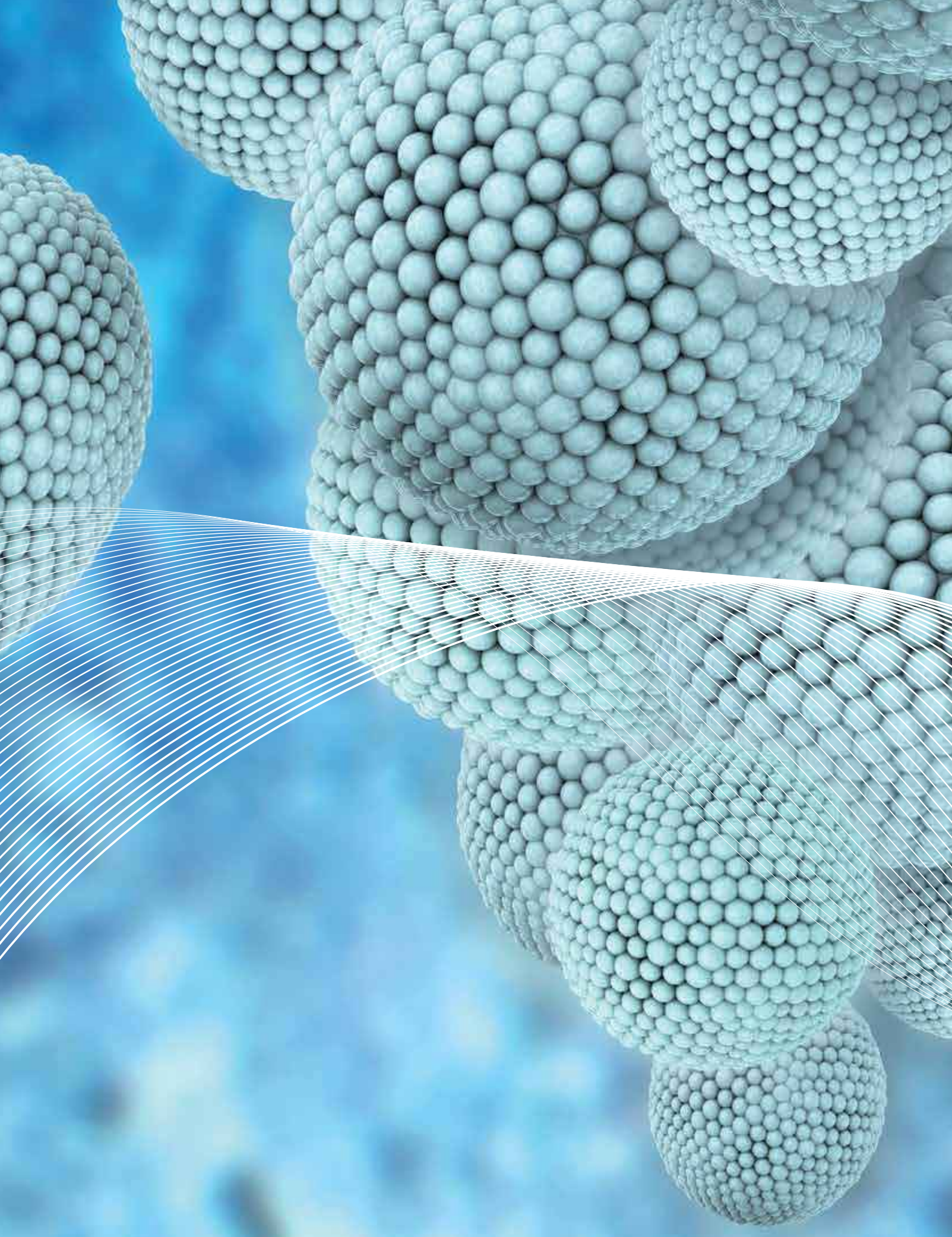


PHÉNOMÈNES DANGEREUX ET RÉSISTANCE DES STRUCTURES

- Phénomènes dangereux industriels : évaluation des conséquences et dimensionnement des barrières



- EVARISTE : évaluation des risques liés au stockage souterrain du CO₂
- COSMOS : compréhension, modélisation et surveillance de la déformation et de la rupture des massifs rocheux
- EREVAN : évaluation et réduction de la vulnérabilité des biens exposés aux aléas naturels et miniers





NOUVELLES TECHNOLOGIES

12

Synthèse des impacts potentiels d'une fuite de CO₂ depuis un site de stockage géologique sur les processus géochimiques

14

Comprendre la physique des fuites massives de CO₂

16

Prise en compte de l'évolution de l'état d'agglomération dans l'étude de l'écotoxicité des nanoparticules

18

Coopération cellulaire et rôle du récepteur P2X₇ dans l'inflammation pulmonaire induite par les nanoparticules

01

SYNTHÈSE DES IMPACTS POTENTIELS D'UNE FUITE DE CO₂ DEPUIS UN SITE DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE SUR LES PROCESSUS GÉOCHIMIQUES

Philippe
GOMBERT

Références

Lions J., Devau N., de Lary L., Dupraz S., Parmentier M., Gombert P., Dictor MC., 2014. Potential impacts of leakage from CO₂ geological storage on geochemical processes controlling fresh groundwater quality: A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 22, 165-175

Rillard J., Gombert P., Toulhoat P., Zuddas P., 2014. Geochemical assessment of CO₂ perturbation in a shallow aquifer evaluated by a push-pull field experiment. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 21, 23-32.

Rillard J., 2014. CO₂ perturbation in aquifers: reaction kinetics and metals behavior. Thèse de l'université Claude Bernard Lyon 1 en partenariat avec l'INERIS.

Kharaka Y., Thordsen JJ., Hovorka SD., Nance S., Cole DR., Phelps TJ., Knauss KG., 2009. Potential environmental issues of CO₂ storage in deep saline aquifers: Geochemical results from the Frio-1 Brine Pilot test, Texas, USA. *Applied Geochemistry* 24 (2009) 1106-1112

Le stockage géologique de CO₂ est généralement étudié en tant qu'option possible pour limiter l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. À ce titre, les aquifères salins profonds (> 800 m), où le CO₂ se dissout lentement dans la saumure, sont parmi les candidats pour ce type de stockage. En termes de risques, une question primordiale est de savoir ce qu'il adviendrait d'une éventuelle fuite de CO₂ et/ou de saumure, notamment en ce qui concerne l'impact sur les aquifères superficiels d'eau douce.

Risque de variation du pH de l'eau

Bien que ce CO₂ soit stocké à l'état super-critique, sa migration vers la surface en cas de fuite le fera passer à l'état gazeux : s'il rencontre un aquifère, une partie de ce CO₂ va se dissoudre dans l'eau. Ce phénomène va premièrement impacter le pH de l'eau souterraine, la dissolution du CO₂ dans l'eau

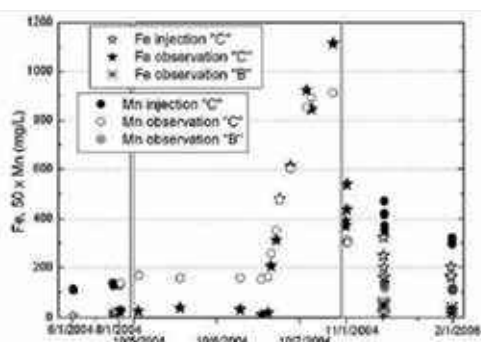
produisant de l'acide carbonique. Les données bibliographiques indiquent une chute de pH de 1 à 3 unité(s) selon que la nappe est renfermée dans une roche-réservoir carbonatée ou siliceuse. Cette variation de pH va en effet être tamponnée par la mise en solution de certains minéraux constitutifs de la roche-réservoir, préférentiellement des carbonates mais également - dans une moindre mesure (d'où un effet tampon moindre) - des silicates. Un second effet de cette mise en solution pourrait être la remobilisation des éléments traces métalliques contenus dans la roche-réservoir ou piégés par scavenging dans les oxy-hydroxydes de fer. *Figure 1, Figure 2*

Risque de migration de la saumure profonde

Du fait de la surpression, il existe également le risque que la saumure profonde remonte en même temps que le CO₂ fuyard. Comme

Figure 1

Concentration en fer et en manganèse dans la saumure du site de Frio (Texas, États-Unis) avant et après l'injection de CO₂ (Kharaka et al 2009)



The geological storage of CO₂ in deep saline aquifers is one option to limit the emission of greenhouse gases into the atmosphere. In case of leakage of CO₂ and/or brine, the impact on shallow freshwater aquifers must be investigated. The CO₂ leakage will first dissolve into shallow groundwater until saturation to form carbonic acid. This will lower the pH by 1 to 3 unit(s) depending on whether the aquifer is carbonated (buffered) or siliceous. Another effect of this dissolution could be the remobilization of trace metals contained in the matrix rock or trapped by scavenging into the iron oxi-hydroxides. In case of brine leakage, a significant quality alteration of shallow groundwater can be noted. This is due to brine salt (> 100 g / l NaCl) and concentration in trace metals (Al, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, U) or organic compounds (supercritical CO₂ being an organic solvent). Moreover, changes in the redox potential could also occur in case of leakage of deep anoxic brine or impure CO₂ gas (O₂, SO_x, NO_x, H₂S). In conclusion, the expected impact is a compromise between many parameters: (i) the quality of the injected CO₂, (ii) the kinetics of deep hydrogeochemical perturbations, (iii) the duration of the leakage towards the surface and (iv) the type of shallow aquifer encountered. To quantify this impact, it is necessary to have excellent network monitoring and a sufficiently long baseline to identify natural trace element range fluctuations.

son nom l'indique, ce type de saumure peut être fortement salé (>100 g/l de NaCl) et peut renfermer de grandes concentrations d'éléments métalliques, tels que l'aluminium, le fer, le manganèse, le plomb, le zinc, le cuivre, l'uranium ou l'arsenic, du fait de la présence de composés complexants : matière organique, bicarbonates, chlorures, fluorures etc. En outre, du fait que le CO₂ supercritique est un excellent solvant des matières organiques, des éléments traces organiques (toxiques) peuvent également se trouver dans les saumures ayant été en contact avec le CO₂. Une migration significative de saumure profonde serait alors de nature à altérer la qualité des aquifères superficiels, le plus souvent composés d'eau douce.

Risque de modification du potentiel d'oxydo-réduction

Une modification du potentiel d'oxydo-réduction pourrait survenir en cas de fuite

de saumure profonde anoxique, riche en matière organique, ou de CO₂ gazeux renfermant des impuretés oxydantes (O₂, SO_x, NO_x) ou réductrices (H₂S). Selon la nature de l'aquifère rencontré, captif (anoxique) ou libre (oxygéné), on conçoit que l'impact puisse être significativement différent.

Conclusion

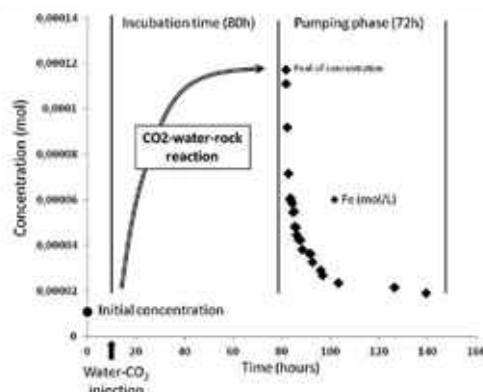
Au vu de la faible durée des expérimentations de fuite en laboratoire ou *in situ* (quelques semaines à quelques mois), il semble que seules des modélisations thermo-hydro-chimiques poussées permettent d'appréhender les phénomènes sur une durée de plusieurs centaines ou milliers d'années (durée nécessaire à l'établissement des équilibres chimiques) et fournir ainsi une image de l'impact à long terme. Néanmoins, les paramètres de calage de ces modélisations ne sont pas toujours disponibles, notamment en ce qui

concerne le comportement des éléments traces métalliques dans des saumures très concentrées.

L'impact global d'une fuite de site de stockage géologique de CO₂ résulte d'un compromis entre de nombreux paramètres : (i) la qualité du CO₂ injecté, (ii) la cinétique des perturbations hydrogéochimiques attendues au sein du réservoir de stockage, (iii) la durée de la remontée d'une éventuelle fuite de CO₂ ou de saumure vers la surface et (iv) le type d'aquifère superficiel rencontré (captif ou libre, carbonaté ou silicaté). Pour quantifier correctement un tel impact sur un site réel, il est nécessaire de mettre préalablement en place un réseau de surveillance adapté et surtout, de disposer d'une ligne de base géochimique suffisante (mesures de l'« état zéro » avant injection) afin d'identifier les éléments traces déjà présents dans les aquifères superficiels et leurs gammes naturelles de fluctuations.

Figure 2

Courbe de restitution du fer dissous lors d'un test push-pull d'injection d'eau saturée en CO₂ à Lodève (Hérault, France) (Rillard et al, 2004)



COMPRENDRE LA PHYSIQUE DES FUITES MASSIVES DE CO₂

Références

- [1] www.co2pipehaz.eu
- [2] Woolley R.M., Fairweather M., Wareing C.J., Falle S.A.E.G, Proust C., Hebrard J., *Experimental measurement and Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling of the near-field structure of multi-phase CO₂ jet releases*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 18 : p. 139-149
- [3] Brown S., Martynov S., Mahgerefteh H., Proust C., *A homogeneous relaxation flow model for the full bore rupture of dense phase CO₂ pipelines*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 17 : p. 349-356

L'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère est notamment induite par les systèmes de production d'énergie à énergies fossiles. Une solution à moyen terme consiste à capter à la source le CO₂ et à le transporter en phase dense jusqu'à des zones de stockage géologique. La mise en œuvre soulève cependant des interrogations liées à la sécurité. Que se passerait-il dans l'hypothèse d'une fuite massive accidentelle? Le dioxyde de carbone et les impuretés qui l'accompagnent sont en effet toxiques.

Le risque de fuite massive est critique autour des canalisations de transport, élément vulnérable de la chaîne, qui traversent le domaine public. Le scénario majeur est celui de la rupture franche qui pourrait induire l'épannage de centaines de tonnes de CO₂. Des caractéristiques de la fuite (débit, quantité de mouvements, densité...) dépendent totalement des dimensions et la « durée de vie » du nuage. Or la prédiction de ces aspects reste très difficile tant au plan de l'évolution du champ de pression à l'intérieur de la canalisation, ce qui régit le débit de fuite, que de l'expansion du jet au voisinage du point de fuite, qui définit le régime de dilution ultérieur par l'atmosphère. L'objectif du projet européen CO₂PIPEHAZ [1] est d'apporter des réponses à ces questions. L'INERIS a contribué expérimentalement et

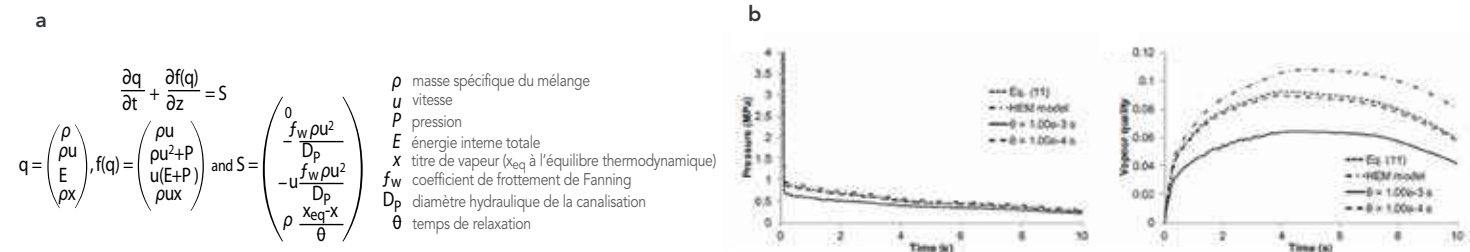
théoriquement à l'éclaircissement de ces deux questions ce qui a facilité le développement de solutions numériques. Les principales découvertes ont été présentées dans deux articles récents [2, 3].

Dépressurisation de la canalisation

Le premier volet concerne la dépressurisation de la canalisation suite à l'apparition de la brèche [2]. Lorsque la brèche est large, il est impossible de supposer que la pression reste homogène. La pratique consiste à tenir compte de la propagation des ondes de dépressurisation le long de la canalisation en reprenant la théorie « des tubes à choc ». Classiquement, un jeu d'équations de conservation monodimensionnelles en espace est établi *Figure 1a* et résolu par une méthode de Riemann. Une équation d'état est utilisée pour relier pression et densité (Peng-Robinson pour représenter le changement d'état). Il est supposé classiquement qu'un équilibre mécanique et thermodynamique est établi entre phases et que l'écoulement est adiabatique (modèle « HEM »). Les simulations montrent qu'introduire une condition de déséquilibre thermodynamique (sous la forme d'un retard à la vaporisation : modèles « HRM ») aurait une incidence significative

Figure 1

(a) formulation mathématique retenue
(b) simulation de la dépressurisation par sectionnement d'une canalisation de 144 m de long (150 mm diamètre) chargée de 150 bar de CO₂ avec mise en évidence des différentes approches (HEM et HRM)



Carbon capture and storage (CCS) is seen a short term solution to limit global warming by capturing CO_2 in the plant and injecting it into a geological reservoir. Pipelines are expected to be used to transfer CO_2 under high pressure and in dense phase from the plant to the storage site. Hundreds of tons of CO_2 might be contained in a pipeline. Since CO_2 and the impurities contained in it are toxic, what would be the consequences of a catastrophic failure of such a pipe. The EU project CO_2 pipehaz [1], intended to answer this question by targeting particularly the key questions of the pipe blowdown giving the flowrate of the leakage [2] and of the early fate of the fluid immediately downstream from the leakage point since the momentum/density/temperature of the flow dictates the subsequent dilution process in the atmosphere [3]. INERIS contributed in the experimental and theoretical work in support of the numerical simulations. It was found Figure 1 that Homogeneous Equilibrium Models describing the pipe blowdown may be used only in case of a complete failure of the pipe and may become quantitative when heat exchanges between the fluid and the surrounding are accounted for. The classical (even compressible) k -epsilon model and the thermodynamic equilibrium assumption, as traditionally used in Computational Fluid Dynamic codes are not sufficient Figure 2 to fully represent the formation of the jet. Progress is expected in the ongoing CO_2 QUEST project.

sur le taux de vaporisation, donc sur les vitesses de dépressurisation et les débits Figure 1b. En pratique cependant, il a été montré que les conditions d'application de ces modèles ne sont satisfaites que dans le cas de fuites très importantes, typiquement la rupture franche de la canalisation, et que, dans ces conditions, l'effet de la vaporisation retardée semble masqué par les (ou secondaire par rapport aux) échanges de chaleur entre l'écoulement et les parois. Ces travaux se poursuivent actuellement dans le projet CO_2 QUEST.

Formation du nuage

Le second point est relatif à la formation du nuage qui dépend en premier lieu des proportions relatives de vapeur et de condensés formées à la brèche. Schématiquement, si le flux contient une large proportion de condensés, sa vitesse est modérée et sa densité très importante. On pourrait alors craindre la formation d'un nuage dense, froid et relativement stable près du sol. L'approche

théorique a été conduite au moyen d'un code de mécanique des fluides (MG). Un effort tout particulier a été conduit pour être capable de simuler d'une part le processus de détente du fluide (le taux de condensés et le champ de vitesse seraient tout à fait différents entre une détente isentropique et isenthalpique) et d'autre part les changements de phase. Des évolutions significatives du modèle k -epsilon ont ainsi été proposées en incluant des thèmes de production et de dissipation par le champ local de pression qui permettent notamment de mieux restituer la succession d'ondes de choc dans le voisinage immédiat de l'orifice. Un jeu d'expressions d'état tenant compte de la formation de solide a été spécialement mis au point. L'hypothèse d'équilibre mécanique et thermodynamique entre les phases a été retenue. Il a été montré qu'il subsiste des écarts significatifs par rapport à l'expérience en particulier sur les tendances. Sur l'axe de la fuite et à faible débit (moins de 0,5 kg/s), les compositions et températures sont surestimées (écart de 10 à

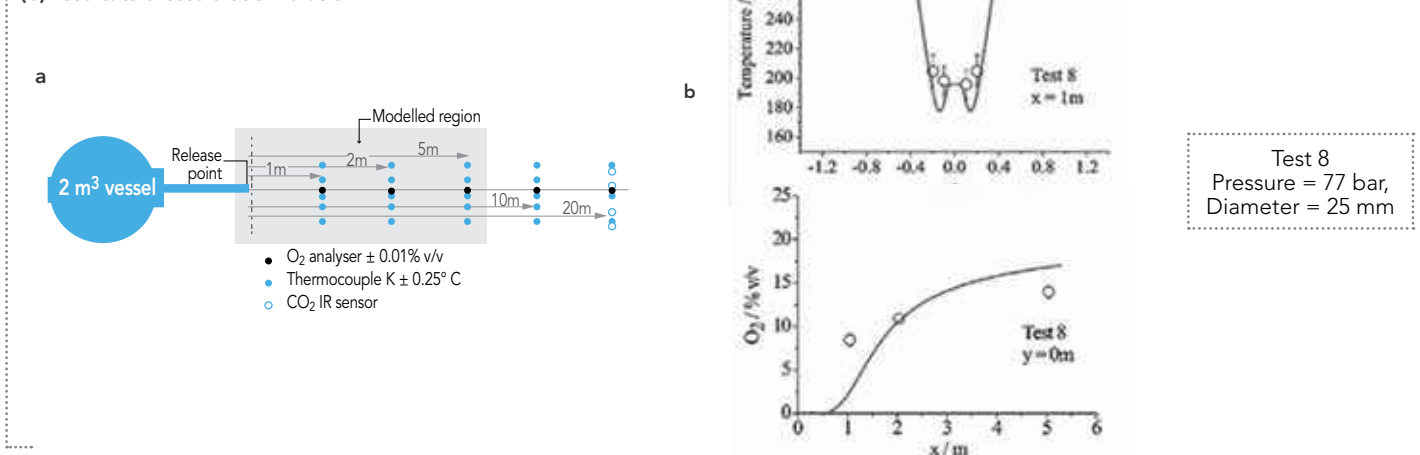
20 %) dans le champ proche alors que c'est l'inverse à débit élevé (écart de 50 %). Cela indique que le modèle de turbulence doit impérativement être amélioré. De même la répartition radiale a une forme très différente des prédictions qui prévoient un effet de sur-refroidissement au « point triple ». Cet effet pourrait être masqué par les délais de transfert de chaleur/masse entre les phases (« relaxation »). Des évolutions sont en cours dans le projet CO_2 QUEST.

Conclusion

Le dialogue entre l'expérience, la simulation numérique et la théorie a permis d'améliorer la compréhension de la physique des fuites massives de gaz liquéfiés. Mais il a aussi montré que l'usage de solutions numériques « sur étagère » (modèle k -epsilon standard, hypothèses d'équilibres...) pouvait conduire à des résultats relativement éloignés de la réalité quand bien même un grand soin est apporté à la représentation des conditions initiales et à la résolution numérique.

Figure 2

(a) installation d'essais de l'INERIS
(b) résultats d'essais et simulation



PRISE EN COMPTE DE L'ÉVOLUTION DE L'ÉTAT D'AGGLOMÉRATION DANS L'ÉTUDE DE L'ÉCOTOXICITÉ DES NANOPARTICULES

Nicolas
MANIER

Références

[1] Manier N., Bado-Nilles A., Delalain P., Aguerre-Chariol O., Pandard P. 2013. Ecotoxicity of non-aged and aged nanoCeO₂ nanomaterials towards freshwater microalgae. *Environmental Pollution* 180:63-70.

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

L'utilisation grandissante de produits contenant des nanoparticules peut entraîner une exposition des différents compartiments environnementaux. Par conséquent, l'évaluation des effets pour l'environnement de ces nanoparticules apparaît indispensable. La spécificité et la réactivité importante de ce type de composés conduit également à s'interroger sur leur comportement lors d'un relargage éventuel dans l'environnement. Cet aspect, bien que rarement renseigné, se révèle fondamental pour mieux appréhender l'écotoxicité de ces nanoparticules au cours de leur cycle de vie, incluant les formes altérées, potentiellement agrégées et/ou agglomérées.

Ces questions ont été récemment abordées [1]. Dans ce cadre, l'étude d'une suspension de nanoparticules de dioxyde de cérium (CeO₂; taille primaire = 8 nm) possédant un coating organique Figure 1 a été réalisée. Cette suspension est commercialisée en tant qu'agent protecteur (anti-rayure anti-UV à

destination des peintures extérieures. Le comportement dans l'eau de cette suspension de nanoparticules avant et après un processus artificiel de vieillissement ainsi que les effets sur les producteurs primaires ont été étudiés.

Vieillessement artificiel et caractérisation de la suspension de nanoparticules de dioxyde de cérium

Une fois diluée dans l'eau, la suspension de nanoparticules de cérium a été soumise à un vieillissement artificiel pendant un mois, à température ambiante, sous agitation et sous un éclairage possédant un spectre de type « lumière du jour » à une intensité lumineuse comprise entre 4 000 et 5 000 lux. L'agglomération et/ou agrégation des nanoparticules entre elles est l'une des modifications les plus évidentes en milieu aqueux. L'état d'agglomération et/ou agrégation a

Figure 1

Schématisation et observation au microscope électronique à transmission de la suspension commerciale de nanoparticules de cérium (préparation dans l'eau ultrapure).

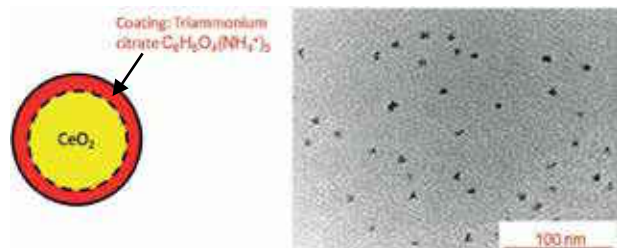
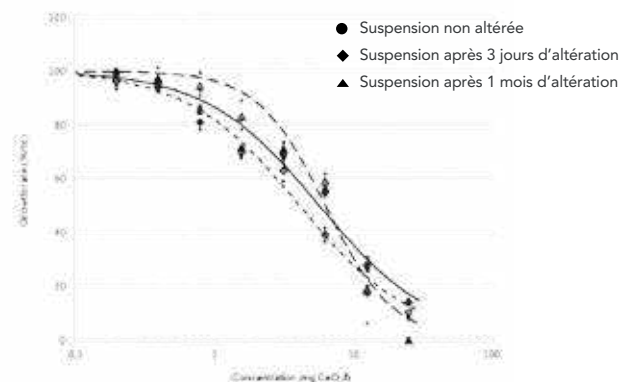


Figure 2

Inhibition de la croissance des algues exposées pendant 72 heures aux suspensions non altérées et altérées pendant 3 jours et 30 jours.



When assessing the hazardous properties of nanomaterials for the environment, there are numerous significant research challenges. Among them, it appears necessary to study the effect of nanomaterials and nanoparticles throughout their life cycle including both initial forms and physico-chemically modified forms (i. e. aggregated or agglomerated forms) that may result from an ageing process. We addressed this question by focusing on the effect of commercial ceria nanoparticle ($n\text{CeO}_2$) suspensions on freshwater micro-algae. We assessed the effect of $n\text{CeO}_2$ suspensions with different agglomeration/aggregation states obtained by using an artificial ageing process. It was shown that the algae growth inhibition was similar after exposure to non-degraded or degraded $n\text{CeO}_2$ suspensions. Those results support the fact that aggregation or agglomeration has little influence when focusing on the growth of algal cells. Moreover by comparison to our previous studies performed with other ceria particle suspensions, it was shown that the primary particle size and consequently the particle surface area is a relevant parameter in assessing the ecotoxicity of nanoparticles.

donc été suivi par diffusion quasi élastique de la lumière, diffraction laser et microscopie électronique à transmission. La **Figure 3** montre l'évolution de l'état d'agglomération au cours du temps. Les résultats obtenus ont montré une agglomération croissante des nanoparticules de cérium dès 6 heures de contact et une évolution significative après 26 heures. Après 3 jours de vieillissement, la taille des agglomérats atteint plusieurs microns et n'évolue plus jusqu'à un mois.

Écotoxicité pour le milieu aquatique

Des essais d'inhibition de la croissance des microalgues ont été menés sur la suspension non vieillie et cette même suspension après 3 jours et 30 jours de vieillissement. Les résultats obtenus ont montré d'une part, une inhibition de la croissance des algues exposées et d'autre part, que cette inhibition est restée identique quelle que soit la suspension testée et par conséquent quel que soit l'état

d'agglomération des nanoparticules dans le milieu d'essai **Figure 2**. Les observations complémentaires réalisées en cytométrie de flux et par microscopie électronique à balayage ont également permis de montrer que l'interaction entre les nanoparticules et la paroi des microalgues étaient similaires pour toutes les suspensions testées. Bien que l'on ne puisse pas écarter une évolution possible des propriétés des nanoparticules non vieilles durant la phase d'exposition des organismes (3 jours), ce constat montre que l'état d'agrégation et/ou d'agglomération de nanoparticules de cérium issues d'un vieillissement n'influencerait que de façon mineure leurs interactions et leur écotoxicité vis-à-vis des microalgues d'eau douce. En revanche, la taille initiale des particules, indépendamment de leur état d'agglomération, pourrait avoir un rôle prépondérant. Lors de ces essais, les plus petites particules de dioxyde de cérium (8 nm) ont conduit à des effets inhibiteurs (CE_{50} entre 4 et 6 mg/L)

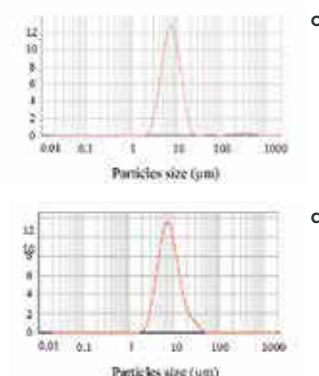
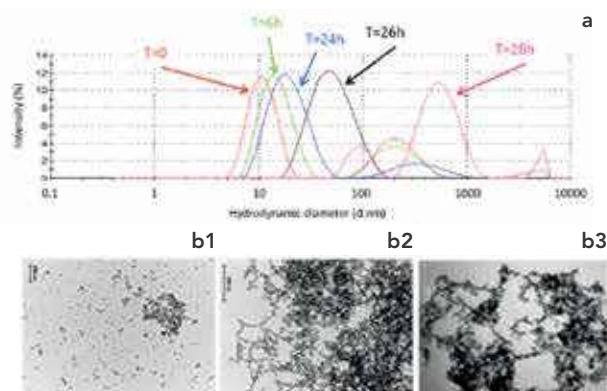
plus importants vis-à-vis des microalgues, que celles de 25 nm (CE_{50} entre 12 et 15 mg/L) testées lors de précédents travaux [2]. Cela est également à mettre en regard de la très faible inhibition de croissance des algues observée après exposition à des particules de cérium non nanométrique ($\text{CE}_{50} > 100$ mg/L). Ce constat suggère enfin l'importance de la surface spécifique des particules (dépendante de la taille initiale) dans leur interaction avec les organismes biologiques et la prise en compte de ce paramètre dans l'expression des résultats d'écotoxicité.

Conclusions et perspectives

Ces travaux constituent une première étape dans la caractérisation du comportement et des dangers des nanoparticules altérées. Le protocole adopté a permis de montrer que, même altérées et agglomérées, les nanoparticules de cérium pouvaient conserver leur écotoxicité vis-à-vis des organismes aquatiques.

Figure 3

Évolution de l'état d'agglomération de la suspension de nanoparticules en fonction du temps. Le graphique (a) illustre l'évolution de la taille des agglomérats jusqu'à 28 heures d'altération (mesures effectuées par DLS, NanoZS, Malvern instrument®). Les photos (b 1), (b 2) et (b 3) illustrent l'état d'agglomération des nanoparticules au début de la période d'altération, après 3 jours et après 30 jours d'altération. Les graphiques (c) et (d) représentent la distribution en taille des agglomérats après 3 jours et 30 jours d'altération. (Mesures réalisées par diffraction laser, Mastersizer2000, Malvern instrument®.)





Samir DEKALI

Ghislaine LACROIX

COOPÉRATION CELLULAIRE ET RÔLE DU RÉCEPTEUR P2X₇ DANS L'INFLAMMATION PULMONAIRE INDUITE PAR LES NANOPARTICULES

Références

- [1] Yazdi AS., Guarda G., Riteau N., Drexler SK., Tardivel A., Couillin I., et al. 2010. Nanoparticles activate the NLR pyrin domain containing 3 (Nlrp3) inflammasome and cause pulmonary inflammation through release of IL-1alpha and IL-1beta. *Proc Natl Acad Sci USA* 107 (45):19449–19454.
- [2] Dekali S., Divetain A., Kortulewski T., Vanbaelinghem J., Gamez C., Rogerieux F., Lacroix G., Rat P. Cell cooperation and role of the P2X₇ receptor in pulmonary inflammation induced by nanoparticles *Nanotoxicology*, 2013, 7 (8): p. 1302-1314

Le développement très important des nanotechnologies, et donc la production à un niveau industriel de matériaux manufacturés à l'échelle nanométrique, impliquent des probabilités d'exposition de plus en plus élevées, avant tout chez les travailleurs concernés, mais également pour le grand public. De par leur petite taille (< 100 nm), le premier risque d'exposition aux nanoparticules (NPs) est lié à la pénétration par voie pulmonaire (inhalation) mais les données toxicologiques sur les NPs sont encore incomplètes à ce jour.

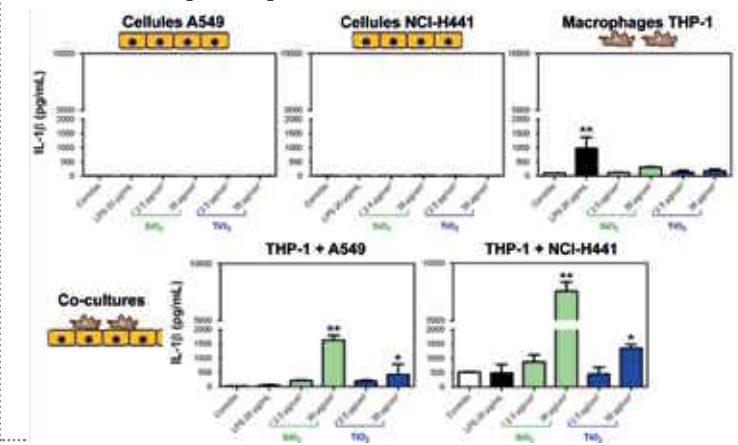
Les études menées *in vitro* sont, pour des considérations éthiques et économiques, une alternative indispensable à l'approche *in vivo*. Bien que les modèles de toxicité *in vitro*, isolés de leur microenvironnement *in vivo*, ne puissent pas remplacer complètement les études *in vivo*, ils permettent, par leur simplicité, d'appréhender plus facilement les mécanismes d'action des toxiques. L'avantage des méthodes *in vitro* pour l'évaluation de

la dangerosité des nanomatériaux est donc de fournir des outils de dépistage de toxicité plus simples, plus rapides et moins coûteux que l'approche *in vivo*.

Depuis quelques années, se sont développés des modèles cellulaires plus élaborés que la simple monocouche cellulaire, dans le but de recréer une partie des interactions cellulaires et moléculaires se produisant au sein des organismes vivants. Au niveau pulmonaire, les macrophages alvéolaires jouent un rôle clé lors des processus inflammatoires, notamment grâce à leur fonction de phagocytose. Les NPs non phagocytées par les macrophages peuvent entrer en contact avec les cellules épithéliales alvéolaires, induire une inflammation et attirer d'autres macrophages alvéolaires au niveau du site de dépôt. Les mécanismes de coopération cellulaire lors de ces phénomènes inflammatoires qui jouent un rôle prépondérant dans la toxicité des NPs *in vivo*, sont peu connus à ce jour.

Figure 1

Sécrétion d'IL-1β par les mono et les co-cultures en réponse à une exposition à des NPs de TiO₂ ou SiO₂



Macrophages and alveolar epithelial cells are the first targets of inhaled nanoparticles (NPs) reaching the alveoli. Mono- or co-cultures of lung epithelial (A549 or NCI-H441) and macrophage (THP-1) cell lines were used to study the cell cooperation and the involvement of the P2X₇ cell death receptor during the inflammation caused by SiO₂ and TiO₂ NPs. Here we show that secretion of pro-inflammatory cytokines (IL-1 β , IL-6 and IL-8) in response to NP exposure was higher in co-cultures than in mono-cultures. A functional P2X₇ receptor was found in all the cell lines studied. Its involvement in IL-1 β secretion in co-cultures was demonstrated using a specific antagonist, the brilliant blue G. Furthermore, mono and co-cultures exhibited distinct secretion patterns of pro-inflammatory cytokines in response to NP exposure and we provide the first evidence that the P2X₇ receptor is involved in the inflammation triggered by SiO₂ and TiO₂ NPs, by increasing IL-1 β secretion, and likely via the inflammasome pathway. Altogether, our data indicate that cell co-cultures used in this study represent valid models to study the inflammatory mechanisms of NPs within the alveoli.

Les objectifs de ce travail ont été :

1. de concevoir un modèle représentatif de l'environnement alvéolaire, composé des deux types cellulaires exposés en première ligne après inhalation de composés exogènes: les cellules épithéliales et les macrophages alvéolaires;
 2. d'étudier la réponse inflammatoire de cette co-culture en réponse à des NPs de dioxyde de titane et de silice et de la comparer à celle obtenue sur les cellules épithéliales et les macrophages cultivés seuls (mono-cultures);
 3. d'approfondir les mécanismes d'action conduisant à cette réponse inflammatoire le cas échéant.
- La co-culture a été développée sur lignées cellulaires humaines: des cellules épithéliales pulmonaires A549 ou NCI-H441 sur lesquelles ont été déposés des macrophages de la lignée monocyttaire THP-1 préalablement différenciés. La réponse inflammatoire a été évaluée par dosage de 4 cytokines pro-inflammatoires (TNF- α , IL-1 β , IL-6, IL-8) dans les milieux de culture.

Résultats

Les résultats ont montré qu'une exposition de 6 heures à des NPs de SiO₂ et de TiO₂ induisait une diminution de la viabilité des macrophages en monoculture, alors qu'aucune cytotoxicité n'était observée au niveau des co-cultures ou des cellules épithéliales seules. Généralement, les sécrétions de cytokines ont été significativement plus importantes dans les milieux de culture des co-cultures, en particulier pour l'IL-1 β , qui a montré un fort pic de sécrétion quelle que soit la NP étudiée, alors qu'aucune sécrétion n'était significative pour les cellules cultivées seules [Figure 1](#).

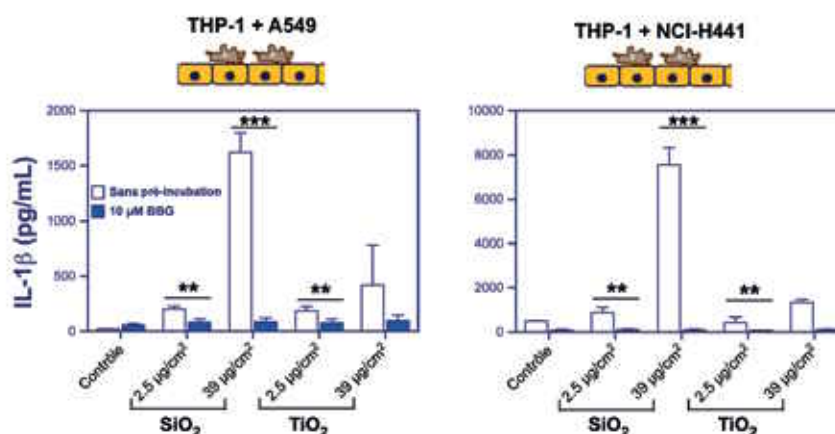
Sachant que la voie de l'inflammasome Nlrp3 avait récemment été identifiée *in vitro* comme impliquée dans l'inflammation liée à une exposition aux NPs de SiO₂ et de TiO₂ [1] et que l'activation de cette voie conduit à la sécrétion d'IL-1 β , l'objectif était de déterminer si le récepteur P2X₇, acteur clé de cette voie, était impliqué dans l'augmentation de

la sécrétion d'IL-1 β au niveau des cultures suite à l'exposition aux NPs.

La présence de ce récepteur et sa fonctionnalité ont été mises en évidence sur toutes les lignées cellulaires étudiées. Pour savoir si la présence du récepteur P2X₇ fonctionnel sur les cellules était reliée à la sécrétion d'IL-1 β par les co-cultures, les cellules ont été pré-incubées avec un antagoniste spécifique du récepteur P2X₇: le bleu de Coomassie (BBG) avant d'être exposées aux NPs de SiO₂ et de TiO₂. Il a été observé une déplétion de la sécrétion d'IL-1 β des co-cultures pré-incubées, comparativement aux cellules non pré-incubées [Figure 2](#). Ces résultats soulignent l'importance de la coopération cellulaire lors de l'inflammation causée par les NPs de SiO₂ et de TiO₂ et démontrent l'implication du récepteur P2X₇ dans ce phénomène [2]. Les co-cultures cellulaires représentent donc des modèles pertinents pour l'étude des mécanismes pro-inflammatoires induits par les NPs au niveau de la barrière alvéolaire.

Figure 2

Rôle du récepteur P2X₇ dans la sécrétion d'IL-1 β par les co-cultures







SUBSTANCES CHIMIQUES

22

Évaluation de l'exposition des femmes enceintes françaises aux phtalates

24

Effets du bisphénol A sur les écosystèmes aquatiques évalués en mésocosme

26

Contamination des poissons d'eau douce par les microplastiques

28

FOCUS L'application de la modélisation QSAR à la nanotoxicologie

29

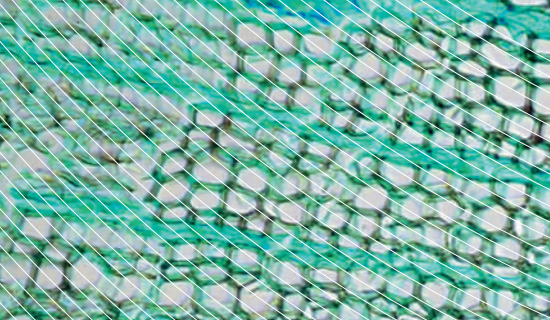
Développement de modèles QSPR validés pour la prédiction de la stabilité thermique des peroxydes organiques

31

FOCUS Détermination de la *cis* et *trans*-perméthrine et de leurs métabolites dans le sang et les organes de rat

32

Le modèle embryonnaire de poisson zèbre transgénique *cyp19a1b*-GFP



ÉVALUATION DE L'EXPOSITION DES FEMMES ENCEINTES FRANÇAISES AUX PHTALATES

Céline BOUDET

Céline BROCHOT

Karine TACK

Florence ZEMAN

Références

[1] Noriega N. C., Howdeshell K. L., Furr J., Lambright C. R., Wilson V. S., and Gray L. E. 2009. Pubertal Administration of DEHP Delays Puberty, Suppresses Testosterone Production, and Inhibits Reproductive Tract Development in Male Sprague-Dawley and Long-Evans Rats, Vol. 111, 163-178.

[2] Moyer B., Hixon ML. 2012. Reproductive effects in F1 adult females exposed in utero to moderate to high doses of mono-2-ethylhexylphthalate (MEHP). *Reproductive Toxicology* 34 (1):43-50.

[3] Vandentorren S., Zeman F., Morin L., Sarter H., Bidondo M-L., Oleko A., Leridon H., 2011. Bisphenol-A and phthalates contamination of urine samples by catheters in the Elfe pilot study : Implications for large-scale biomonitoring studies. *Environ. Res.* 111, 761-764.

[4] Lorber M., Angerer J., Koch H. M., 2010. A simple pharmacokinetic model to characterize exposure of Americans to Di-2-ethylhexyl phthalate. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 20, 38-53.

[5] Wittassek M., Koch H. M., Angerer J., and Bruning T., 2010. Assessing exposure to phthalates – the human biomonitoring approach. *Mol. Nutr. Food Res.* 55, 7-31.

[6] Yan X., Calafat A., Lashley S., Smulian J., Ananth C., Barr D., et al., 2009. Phthalates biomarker identification and exposure estimates in a population of pregnant women. *Hum Ecol Risk Assess.* 15, 565-578.

[7] Vrijheid M., Slama R., Robinson O., Chatzi L., Coen M., van den Hazel P., Thomsen C., Wright J., Athersuch T.J., Avellana N., Basagana X., Brochot C., Bucchini L., Bustamante M., Carracedo A., Casas M., Estivill X., Fairley L., van Gent D., Gonzalez J.-R., Granum B., Gražulevičienė R., Gutzkow K.B., Julvez J., Keun H.C., Kogevinas M., McEachan R.R., Meltzer H.M., Sabido E., Schwarze P.E., Siroux V., Sunyer J., Want E.J., Zeman F., Nieuwenhuijsen M.J. 2014. The Human Early-Life Exposome (HELIX): project rationale and design. *Environ Health Perspect* 122:535-544.

Les phtalates constituent une famille de composés chimiques couramment utilisés comme plastifiants. Ils servent notamment à assouplir certains comme le polychlorure de vinyle (PVC). Les cosmétiques sont le deuxième domaine d'application des phtalates où ils sont incorporés le plus souvent comme agents fixateurs. Les phtalates se retrouvent ainsi dans de très nombreux produits de la vie courante, tels que les emballages alimentaires, les parfums, les médicaments, les matériaux de construction, les peintures, les jouets pour enfants et même certains dispositifs médicaux. Lorsqu'ils ne font pas partie directement de la composition des produits, ces composés ne sont pas chimiquement liés aux plastiques dans lesquels ils sont employés et peuvent être relargués directement par simple migration. Les sources d'exposition aux phtalates sont ainsi très variées. Plusieurs études ont montré que ces molécules ont des effets sur la reproduction et sur le développement chez l'animal [1-2] et sont suspectées d'être des perturbateurs endocriniens chez l'homme.

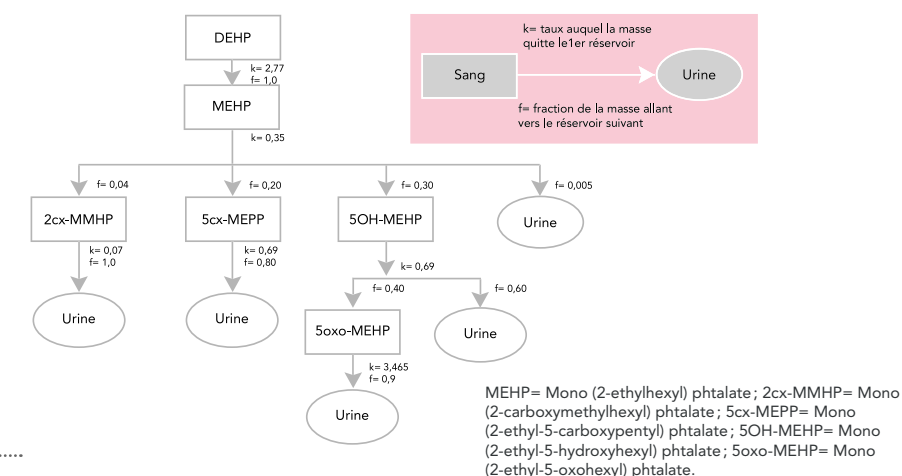
Les phtalates font ainsi partie des substances préoccupantes et prioritaires étudiées dans le cadre de la cohorte Elfe. C'est la première étude longitudinale française consacrée au suivi des enfants, de la naissance à l'âge adulte, qui aborde les multiples aspects de la vie de l'enfant sous l'angle des sciences sociales, de la santé et de la santé-environnement. Après une phase pilote lancée en 2007, elle est généralisée en France métropolitaine depuis avril 2011 et concerne plus de 18 000 enfants. Les résultats issus de l'étude pilote permettent une première évaluation de l'exposition des femmes enceintes aux phtalates.

Méthodes

Le recrutement de l'étude pilote a concerné toutes les naissances survenues du 1^{er} au 4 octobre 2007 dans 30 maternités du département de Seine-Saint-Denis et dans la région Rhône-Alpes [3]. Au total, 279 échantillons d'urine ont été collectés en salle de naissance juste avant l'accouchement. Différents métabolites de phtalates à chaînes courtes (DEP, DnBP, DiBP,

Figure 1

Modèle toxicocinétique du DEHP et ses métabolites proposé par M. Lorber



The ubiquitous use of phthalate esters in plastics, building materials, medical devices, personal care products and food packaging materials results in widespread general population exposure. This study reports measurements of urinary concentration of phthalate metabolites in France and provides the first exposure assessment of French pregnant women to these compounds. For most of the phthalate metabolites, concentrations measured in urine were similar to those reported in previous studies except for two phthalates: High levels of DiNP (Di-iso-nonylphthalate) and DEHP (Di (2-ethylhexyl) phthalate) metabolites compared to other European and American studies were observed. In a second part of the study, a pharmacokinetic model was used in order to better understand the exposure to DEHP. A high concentration of the primary metabolite of DEHP was identified in this case, with a suspicion of very recent exposure in hospital due to perfusion materials. The pharmacokinetic modelling highlighted the importance of information availability about the time between exposure and biomonitoring measurements for non-persistent pollutants.

BBzP) et à chaînes longues (DEHP, DiNP, DnOP, DCHP) ont été analysés **Tableau 1**.

Un modèle toxicocinétique [4] a été utilisé pour mieux interpréter les concentrations mesurées des différents métabolites du DEHP **Figure 1**. Ce modèle permet de décrire le devenir du DEHP et de 4 de ses métabolites dans le sang et l'urine.

Principaux résultats

Pour la plupart des phtalates étudiés, les concentrations mesurées dans les urines sont similaires à celles reportées dans la littérature [5], excepté pour deux phtalates. En effet, de fortes concentrations de métabolites du DiNP et du DEHP comparées aux études précédentes réalisées aux États-Unis ou en Europe ont été identifiées.

L'approche a mis en évidence une concentration en métabolite primaire du DEHP, le MEHP, plus importante que celle attendue par le modèle toxicocinétique, suggérant

une exposition très récente au DEHP des femmes à l'hôpital (quelques heures avant les prélèvements urinaires). Cette concentration en MEHP plus importante que celle attendue était aussi significativement plus élevée pour les femmes ayant eu un accouchement compliqué (césarienne ou forceps) par rapport à celles ayant eu un accouchement par voie basse sans forceps. L'hypothèse d'une exposition par le système de perfusion, déjà observée dans une étude précédente [6], a été privilégiée. Les femmes ayant accouché par césarienne ou forceps auraient été perfusées plus longtemps que celles ayant eu un accouchement classique, ce qui se traduirait par une concentration supérieure en MEHP (métabolite primaire) et non en métabolites secondaires qui n'auraient pas eu le temps d'être formés.

Conclusion

L'étude pilote Elfe est la première étude à avoir déterminé l'exposition à de nombreux

phtalates chez les femmes enceintes françaises. Les résultats de cette étude ont montré une exposition des femmes enceintes françaises significative pour le DEHP mais aussi pour le DiNP, DnOP et BBzP. La modélisation toxicocinétique a permis de mettre en évidence une exposition au DEHP très récente des femmes probablement à l'hôpital par le système de perfusion. Elle a aussi montré l'impact majeur pour les polluants non persistants, comme pour les phtalates, du temps entre le moment où un individu est exposé et celui où le prélèvement est réalisé pour les mesures de biosurveillance. Ces modèles toxicocinétiques sont de plus en plus utilisés pour estimer l'exposition d'une population à partir de données de biosurveillance et intégrés dans les études visant à mieux appréhender les expositions aux facteurs environnementaux comme dans le projet HELIX (Human Early-Life Exposure) qui s'intéresse à l'exposome dans les premières années de vie [7].

Tableau 1

Liste des métabolites mesurés, nom de leur parent et abréviations

Phtalate parent		Métabolite primaire		Métabolite secondaire	
Nom	Abréviation	Nom	Abréviation	Nom	Abréviation
Diethyl phthalate	DEP	Mono-ethyl phthalate	MEP		
Di(2-ethylhexyl) phthalate	DEHP	Mono(2-ethylhexyl) phthalate	MEHP	Mono(2-ethyl-5-hydroxyhexyl)phthalate Mono(2-ethyl-5-oxohexyl)phthalate Mono(2-ethyl-5-carboxypentyl)phthalate Mono(2-carboxymethyl-hexyl)phthalate	5OH-MEHP 5oxo-MEHP 5cx-MEPP 2cx-MMHP
Di-n-butyl phthalate	DnBP	Mono-n-butyl phthalate	MnBP		
Di-iso-butyl phthalate	DiBP	Mono-iso-butyl phthalate	MiBP		
Di-iso-nonyl phthalate	DiNP	Mono-iso-nonyl phthalate	MiNP	Mono(hydroxyisononyl)phthalate Mono(oxoisononyl)phthalate Mono(carboxyisononyl)phthalate	OH-MiNP oxo-MiNP cx-MiNP
Butyl-benzyl phthalate	BBzP	Mono-benzyl phtalate	MBzP		
Di-n-(octyl) phthalate	DnOP	Mono-n-(octyl) phthalate	MnOP		
Di-cyclohexyl phtalate	DCHP	Mono-cyclohexyl phtalate	MCHP		

EFFETS DU BISPHÉNOL A SUR LES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES ÉVALUÉS EN MÉSOCOSME

Références

- [1] Beaudouin R., Ginot V. and Monod G., 2012. Improving mesocosm data analysis through individual-based modelling of control population dynamics: a case study with mosquitofish (*Gambusia holbrooki*). *Ecotoxicology*, 21:155-164.
- [2] de Kermoisan G., Joachim S., Baudouin P., Lonjaret M., Tebby C., Lesaulnier F., Lestremau F., Chatellier C., Akrouz Z., Pheron E., Porcher J.-M., Pery A.R.R. and Beaudouin R., 2014. Effects of bisphenol A on different trophic levels in a lotic experimental ecosystem. *Aquatic Toxicology*, 144:186-198.
- [3] Péry A. and Beaudouin R., 2013. Biology-Based and Population Dynamics Modeling in Ecotoxicology. In: J.-F. Féraud and C. Blaise (Editor), *Encyclopedia of Aquatic Ecotoxicology*. Springer reference, London, pp. 205-210

Le bisphénol A (BPA; 4,4'-dihydroxy-2,2-diphénylpropane) est une substance chimique de synthèse utilisée depuis plus de 50 ans. Un très grand nombre d'usages, d'articles et de préparations susceptibles de contenir du BPA ont été identifiés récemment. Ses deux principales utilisations sont la fabrication de matières plastiques de type polycarbonate et de résines époxydes. En raison de sa fréquente utilisation, le BPA est retrouvé régulièrement dans les eaux de surface à des concentrations proches du dixième de µg/L mais qui peuvent aller jusqu'à une vingtaine de µg/L. De plus, de nombreuses publications ont mis en évidence la capacité du BPA à perturber le système endocrinien chez différentes espèces animales. Par conséquent, la question d'effets possibles sur les écosystèmes aquatiques se pose. L'évaluation des substances chimiques s'appuie généralement sur la mise en œuvre de bioessais pour évaluer l'écotoxicité des substances et établir des valeurs seuils de concentration. Ces tests standardisés présentent de nombreux avantages (reproductibilité, fiabilité, rapidité...) mais ont leurs

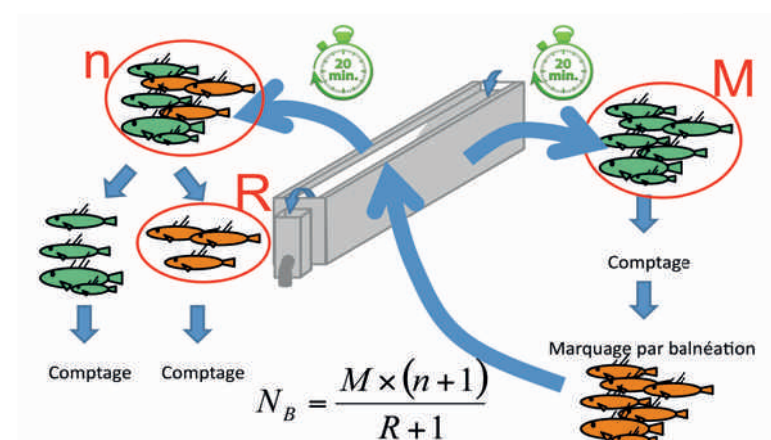
limites : ils sont réalisés en conditions de laboratoire souvent peu représentatives des conditions écologiques (e.g., pas de prise en compte de la compétition pour la nourriture ou la prédation). Les écosystèmes artificiels (appelés mésocosmes) permettent d'étudier de manière plus « réaliste », du point de vue écologique, l'impact d'une substance chimique sur un système complexe de communautés d'organismes vivants [1]. Les effets sur le système endocrinien des organismes aquatiques du BPA ont été observés en laboratoire, mais son impact environnemental dans des conditions écologiques réalistes est inconnu. Les effets à long terme du BPA ont donc été étudiés sur les organismes, populations et communautés aquatiques en mésocosmes [2].

Méthodes

L'impact du BPA sur les écosystèmes a été étudié sur trois niveaux de concentration : 1, 10 et 100 µg/L. Parmi les espèces présentes dans les écosystèmes, l'étude s'est focalisée sur 3 taxons particuliers : (i) les macrophytes car aucune donnée

Figure 1

Estimation de l'effectif des populations par Capture, Marquage et Recapture (CMR)



Bisphenol A (BPA) is commonly used by manufacturers and can be found in many aquatic ecosystems. Data relative to BPA ecotoxicity are only available for studies in laboratory conditions on macro-invertebrates and fish. There is thus a lack of information for other trophic levels such as macrophytes. Moreover, the impacts of BPA within an ecosystem context, i. e. with populations from different trophic levels studied at long term in environmental conditions, have never been assessed. We carried out a long-term lotic mesocosm study in 20 m long channels under three exposure concentrations of BPA (nominal concentrations of 0, 1, 10 and 100 µg/L) delivered continuously for 165 days. Three trophic levels were followed: macrophytes, macro-invertebrates (with a focus on *Radix balthica*) and fish (*Gasterosteus aculeatus*). Significant effects were shown at 100 µg/L BPA on the three trophic levels. BPA had a direct impact on macrophyte community structure, direct and indirect impacts on macro-invertebrates and on fish population structure. Gonad morphology of fish was affected at 1 and 10 µg/L of BPA, respectively for female and male sticklebacks. In addition to these ecotoxicity data, our results suggest that fish are good integrators of the responses of other communities (including macro-invertebrates and macrophytes) in mesocosm systems.

écotoxicologique n'existait sur ce groupe pour le BPA, (ii) un escargot d'eau douce (*Radix balthica*) présenté comme très sensible au BPA, et (iii) l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*), poisson qui intègre les effets sur les différents compartiments en étant au bout de la chaîne alimentaire reconstituée dans les rivières. Lors de l'expérience, les canaux ont été distribués aléatoirement de façon à obtenir trois canaux par concentration et trois canaux témoins. La date de contamination a été choisie pour laisser aux populations d'épinoches adultes un temps d'adaptation au milieu, et permettre la mise en place de la reproduction, tout en s'assurant que les premiers alevins sont exposés dès leur naissance. Un système automatisé de dilution et de diffusion des concentrations de BPA a permis d'alimenter en continu les mésocosmes. Pendant l'exposition, différentes variables des populations ont été suivies (par exemple, l'effectif des populations d'épinoches; **Figure 1**). Après

récupération des populations de poissons, différentes variables ont été analysées.

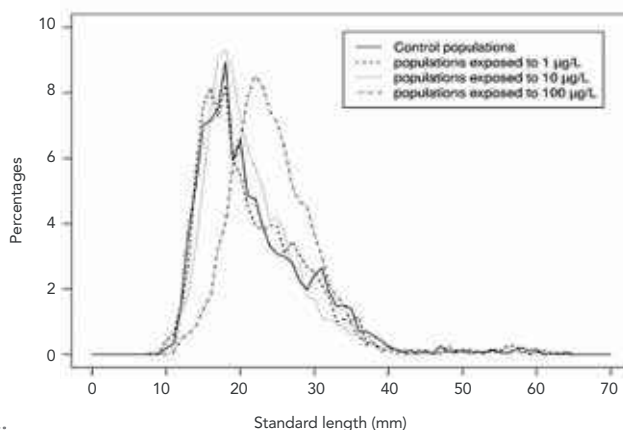
Résultats

Des effets ont été observés sur l'ensemble du réseau trophique (communautés de végétaux, d'invertébrés et de poissons) à 100 µg/L et sur les individus (poissons) à des concentrations inférieures. À 100 µg/L, la croissance des végétaux comme le cresson et la callitriche est affectée dès 59 jours d'exposition. À la même concentration, la structure de la communauté des macro-invertébrés est également affectée, avec un impact notable sur la taille des populations de *Radix balthica*. Un impact du BPA sur la structure des populations de l'épinoche est observé à une concentration de 100 µg/L **Figure 2**. Les adultes sont plus nombreux et la taille standard des juvéniles est plus grande (20 mm) que dans les populations témoins. Ces effets observés pourraient être la conséquence des effets observés sur les macro-invertébrés via le réseau trophique

(effet dit indirect). Un autre effet est relevé : une classe de taille de juvénile quasi absente (10-15 mm). Cette absence de juvéniles serait l'effet direct du BPA sur la reproduction. En effet, des atrophies des gonades sont observées sur des individus, à partir de 10 µg/L pour les mâles et dès 1 µg/L pour les femelles. Cependant, aucune conséquence de ces effets physiologiques sur le comportement et la structure des populations n'a pu être démontrée aux concentrations inférieures à 100 µg/L. Des examens histologiques sont en cours pour poursuivre l'interprétation. Ces observations ont comme intérêt principal de fournir des données pour l'établissement de seuils de concentrations de référence. Cependant, les mésocosmes étant une représentation simplifiée d'un écosystème aquatique plus complexe et divers [3], ces résultats devront être confirmés par d'autres études sur d'autres systèmes aquatiques expérimentaux dont les hypothèses (e.g. espèces sélectionnées, structure de l'habitat) seront différentes de celles de cette étude.

Figure 2

Distribution moyenne des tailles des poissons dans les populations exposées à différentes concentrations de BPA



CONTAMINATION DES POISSONS D'EAU DOUCE PAR LES MICROPLASTIQUES

Références

[1] PlasticEurope (2013) *Plastics – the Facts 2013 - An analysis of European latest plastics production, demand and waste data*. 37 p.

[2] Faure F., Corbaz M., Baecher H., De Alencastro L.F., 2012 *Pollution due to plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea*. *Arch Sci* 65, 157–164.

[3] Imhof H.K., Ivleva N.P., Schmid J., Niesner R., Laforsch C., 2013 *Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles*. *Curr Biol* 23, R867–R868.

[4] Sanchez W., Bender C., Porcher J.M., 2014 *Wild gudgeons (*Gobio gobio*) from French rivers are contaminated by microplastics: Preliminary study and first evidence*. *Environ Res* 128: 98-100.

[5] Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R., 2011 *Accumulation of microplastic on Shorelines worldwide: sources and sinks*. *Environ Sci Technol* 45, 9175–9179.

[6] Rochman C.M., Kurobe T., Flores I., The S.J., 2014 *Early warning signs of endocrine disruption in adult fish from the ingestion of polyethylene with and without sorbed chemical pollutants from the marine environment*. *Sci Tot Environ* 493, 656-661.

En raison de leurs propriétés physiques et de leur faible coût, les plastiques ont envahi depuis maintenant plusieurs années notre quotidien et trouvent désormais leur place dans un nombre très important d'applications. De ce fait, la production mondiale de plastiques a augmenté, passant de 1,5 million de tonnes en 1950 à 288 millions de tonnes en 2012 [1] et, avec elle, la contamination de l'environnement par les matières plastiques tant sous forme de macro que de micro-déchets. Cette contamination de l'environnement et celle des espèces sauvages est très largement décrite en milieu marin où elle fait d'ailleurs l'objet d'une surveillance spécifique. A contrario, peu de données existent sur la contamination des écosystèmes dulçaquicoles par les déchets plastiques et en particulier les microplastiques dont la taille est inférieure à 5 mm. De récents travaux ont mis en évidence, de par le monde, la contamination de certains plans d'eau par les microplastiques [2-3], posant alors la question du transfert vers les organismes aquatiques et des effets associés. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les travaux menés

par l'INERIS sur cette thématique et qui utilisent le goujon, poisson très répandu dans les cours d'eau européens, comme sentinelle de cette nouvelle contamination.

Développer une méthodologie spécifique

Du fait d'une absence d'harmonisation, de nombreuses méthodologies ont été développées pour détecter et quantifier les microplastiques dans l'eau, les sédiments et dans une moindre mesure les organismes. Les premiers essais de détection de microplastiques chez les poissons réalisés à l'INERIS ont été faits par observation directe du contenu stomacal à l'aide d'une loupe binoculaire. Il est très vite apparu la nécessité de développer une méthodologie spécifique afin de faciliter la détection et l'identification des microplastiques. Ainsi, un protocole en deux étapes a été mis au point. Celui-ci combine une séparation densitométrique réalisée à l'aide d'une solution saturée de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à une coloration des particules surnageantes avec du « Nile Red ». Cette méthodologie permet de conserver intacts

Figure 1

Exemples de microplastiques observés sous loupe binoculaire. Filament par observation directe du tube digestif (a). Fragment de plastique après fractionnement (b). Filament coloré après fractionnement (c).



In recent years an emerging suite of contaminants, plastics, have received increased attention due to the fact that those particles have been detected in marine ecosystems across the world while posing risk to the biota. In contrast to the marine environment, freshwater ecosystems received less attention although the vast majority of plastic is produced onshore and finally is introduced into the marine environment by rivers. Recent scientific evidence confirms that freshwater is also contaminated by microplastics. Based on a novel methodology specifically developed, INERIS' works are the first demonstrating that fish living in rivers ingest microplastics. However, further studies are needed to assess adverse effects associated with this contamination.

les microplastiques et facilite leur observation en les isolant de la matière organique présente dans les tubes digestifs des poissons. Elle permet, contrairement à l'observation directe, la détection de microbilles.

Évaluer l'occurrence environnementale de cette contamination

Les travaux de l'INERIS sont les premiers à mettre en évidence la contamination des poissons dulçaquicoles par les microplastiques. En collaboration avec l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 812 goujons ont été échantillonnés par pêche à l'électricité sur 33 sites répartis sur différents cours d'eau français. La présence de microplastiques a été recherchée en utilisant la méthodologie préalablement présentée. Ce travail a montré que 10 % des poissons analysés étaient contaminés par des microplastiques de nature diverses [4]. En effet, des microfibrilles, imputables en partie aux rejets des machines à laver [5], des microbilles mais aussi des fragments de débris ont été retrouvés **Figure 1**.

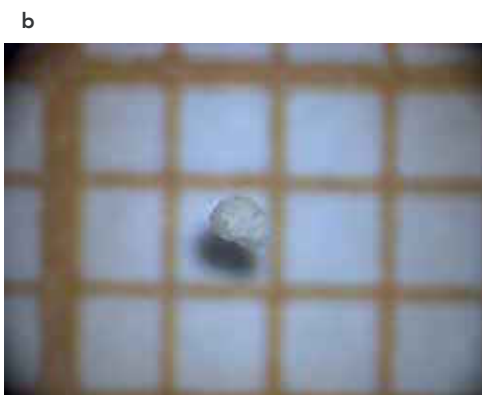
Ce taux de contamination est cohérent avec les résultats des études réalisées en milieu marin qui rapportent des taux de contamination compris entre 2 et 40 % selon les espèces considérées. Il est d'ailleurs à noter que les travaux réalisés à l'INERIS ne portent que sur une espèce benthique et que des travaux complémentaires devraient être réalisés sur des poissons pélagiques mais aussi sur d'autres phylums afin de statuer sur l'importance de cette contamination au sein des chaînes trophiques.

Explorer le lien entre contamination et effets

La présence de microplastiques dans les poissons des cours d'eau pose indéniablement la question des effets que ces polluants pourraient induire sur les organismes. En effet, il est démontré que les plastiques sont une source de polluants organiques notamment perturbateurs endocriniens via les constituants chimiques des plastiques et/ou les polluants adsorbés sur les particules. Cette contamination est alors susceptible d'induire des effets néfastes sur la santé des

organismes aquatiques, notamment par des effets perturbateurs endocriniens, comme cela a été récemment mis en évidence chez des médakas exposés en laboratoire à des microplastiques [6]. Aussi, en continuité des travaux visant à déterminer l'occurrence de la contamination par les microplastiques, une étude a été réalisée afin d'explorer la relation entre la contamination des organismes et la présence d'individus intersexués au sein des populations piscicoles. Parmi les 812 poissons étudiés incluant 48 goujons intersexués, un seul individu intersexué était contaminé par des microplastiques. Ce résultat tend à indiquer une absence de lien, en conditions environnementales, entre la contamination des poissons par les microplastiques et la survenue d'effets perturbateurs endocriniens évalués au travers de la mesure de l'intersexualité.

Ces travaux confirment la réalité de la contamination des poissons dulçaquicoles par les microplastiques. Ils doivent désormais se poursuivre afin d'identifier l'origine de ces polluants et les conséquences éventuelles sur la santé des organismes aquatiques.



FOCUS

Enrico
MOMBELLI

L'APPLICATION DE LA MODÉLISATION QSAR À LA NANOTOXICOLOGIE

Les nanomatériaux présentent des propriétés physico-chimiques qui ouvrent des perspectives industrielles prometteuses. Cependant, ces mêmes propriétés peuvent aussi présenter un danger toxicologique et donner lieu à des phénomènes physiologiques particuliers comme, par exemple, une capacité accrue à franchir les barrières biologiques.

La caractérisation toxicologique expérimentale chez l'animal du grand nombre de combinaisons structurales auxquelles les nanomatériaux peuvent donner lieu serait extrêmement exigeante en termes financiers et éthiques. Dans ce contexte, le développement d'outils (Q)SAR (relation structure-activité [quantitative]), qui modélisent la relation entre propriétés physico-chimiques et effets sur le vivant, apparaît comme un enjeu important en matière de toxicologie prédictive. Ces outils sont déjà utilisés pour l'évaluation du danger des substances chimiques conventionnelles.

Récemment quelques études prometteuses ont démontré que le paradigme structure-toxicité peut s'appliquer aux

nanomatériaux. Cependant, plusieurs défis restent encore à relever. Notamment, il est essentiel de définir les tests *in vitro* qui corréleront le plus avec les effets *in vivo* puisque des études à large échelle chez l'animal ne sont pas envisageables. En parallèle, la caractérisation physicochimique des nanomatériaux est un domaine de recherche en soi en raison de la complexité structurale de ces derniers. En effet, les déterminants structurels du comportement biologique des nanostructures peuvent se retrouver à l'intérieur ou à la surface des nanomatériaux. Les interdépendances fonctionnelles qui peuvent exister entre ces deux niveaux d'organisation peuvent être complexes.

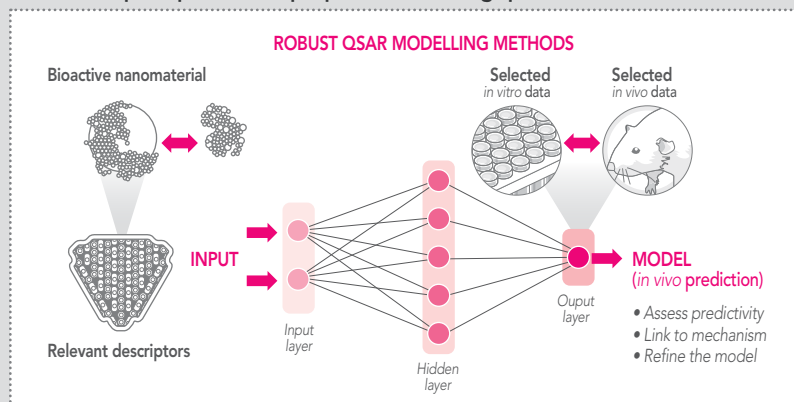
Un développement efficace de modèles QSAR applicables dans un contexte réglementaire pourra avoir lieu si trois conditions sont réunies: (i) une synergie parmi tous les acteurs d'un règlement sur la toxicité chimique, (ii) la prise en compte des exigences réglementaires lors du développement des outils et (iii) une production de données *in vitro* pertinentes par le biais de méthodes de criblage à haut débit.

Référence

Winkler D.A., Mombelli E., Pietroiusti A., Tran L., Worth A., Fadeel B., McCalm M.J. Applying quantitative structure-activity relationship approaches to nanotoxicology: current status and future potential *Toxicology*, 2013, 313 (1) : p. 15-23

Figure 1

Méthodologie QSAR: formalisation numérique de la structure des nanomatériaux sous forme de descripteurs physicochimiques. Calibration du modèle (ici un réseau de neurones) qui corréle les descripteurs à l'activité biologique d'intérêt. Après validation, le modèle peut être utilisé pour prédire les propriétés toxicologiques des nanomatériaux.



DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES QSPR VALIDÉS POUR LA PRÉDICTION DE LA STABILITÉ THERMIQUE DES PEROXYDES ORGANIQUES

Guillaume
FAVET

Patricia
ROTUREAU

Le règlement européen REACH encourage le développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale. Dans ce contexte, l'INERIS a coordonné le projet de recherche PREDIMOL⁽¹⁾. Conduit entre 2010 et 2014, il visait à montrer que la modélisation moléculaire (en particulier, les Relations quantitatives structure-propriétés (QSPR) et les méthodes de simulation moléculaire [Dynamique moléculaire, méthodes de Monte-Carlo]) étaient une alternative aux essais expérimentaux pour évaluer des propriétés physico-chimiques dangereuses comme l'inflammabilité et l'explosibilité des amines et des peroxydes organiques.

Après avoir développé des modèles QSPR fiables pour prédire la chaleur de décomposition de composés nitrés [1-2], l'INERIS s'est intéressé à ces propriétés pour les peroxydes organiques et à la mise en place de modèles QSPR. Ces méthodes consistent à relier de manière quantitative une propriété expérimentale à la structure moléculaire d'une substance, décrite par des descripteurs moléculaires. Deux

modèles QSPR sur la stabilité thermique des peroxydes organiques avaient déjà été élaborés (chaleur et température de décomposition) [3], en tenant compte des mécanismes réactionnels impliqués. Développés selon une méthode robuste, ils répondent à des critères de validation définis par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) [4] autorisant leur utilisation dans un contexte réglementaire tel que celui de REACH.

Propriétés des peroxydes organiques

Les peroxydes organiques, substances liquides ou solides contenant la liaison peroxyde -O-O- sont très utilisés dans l'industrie chimique. Du fait de la liaison peroxyde relativement faible (20-50 kcal/mol), ils sont plus ou moins stables et peuvent générer des radicaux instables lors de leur décomposition et conduire à des accidents. En effet, ils peuvent mener à une décomposition explosive, brûler rapidement, et, sensibles à l'impact ou à la friction, ils peuvent réagir

Références

- [1] Fayet G., Rotureau P., Joubert L., Adamo C., *Development of a QSPR model for predicting thermal stabilities of nitroaromatic compounds taking into account their decomposition mechanisms*, *J. Mol. Model.*, 2011, 17, p. 2443.
- [2] Prana V., Fayet G., Rotureau P., Adamo C., *Development of validated QSPR models for impact sensitivity of nitroaliphatic compounds*, *J. Hazard. Mater.*, 2012, 235-236, p. 169.
- [3] Prana V., Rotureau P., Fayet G., André D., Hub S., Vicot P., Rao L., Adamo C., *Prediction of the thermal decomposition of organic peroxides by validated QSPR models*, *J. Hazard. Mater.*, 2014, 276, p. 216.
- [4] *Guidance Document on the validation of (quantitative) structure-activity relationships [(Q) SAR] models*, OECD, 2007.
- [5] Lu Y., Ng D., Mannan M.S., *Prediction of the Reactivity Hazards for Organic Peroxides Using the QSPR Approach*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, 50, p. 1515.
- [6] Benassi R., Taddei F., *Homolytic bond-dissociation in peroxides, peroxyacids, peroxyesters and related radicals: ab-initio MO calculations*, *Tetrahedron*, 1994, 50, p. 4795.

Figure 1

Molécules de peroxydes organiques



Peroxyde de di-tert butyle

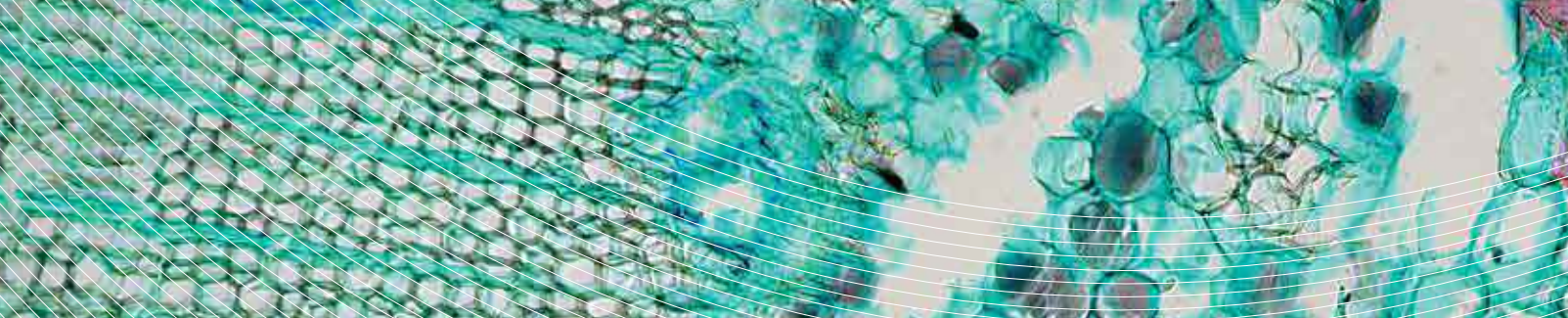


Peroxyde de benzoyle

Résultats majeurs du projet PREDIMOL (www.ineris.fr/predimol)

La modélisation moléculaire est une alternative pertinente à l'expérimentation pour caractériser de manière précise et rapide les propriétés physico-chimiques des substances, à partir de la connaissance de leur structure moléculaire. Des modèles prédictifs, utilisables pour REACH, ont été développés pour évaluer les propriétés des peroxydes organiques et des amines. Au-delà de l'aspect réglementaire, les méthodes prédictives contribuent à l'identification précoce de dangers physico-chimiques et à une meilleure compréhension des réactions chimiques dangereuses. De fait, ces méthodes ont un rôle à jouer dans le développement de nouveaux produits, en amont de l'étape expérimentale, dans le cadre d'approches R&D de type « safety by design » ou dans la mise en œuvre de politiques de substitution de produits dangereux.

⁽¹⁾ Projet ANR (PREdiction des propriétés physico-chimiques des produits par modélisation MOLéculaire), auquel ont participé l'IFPEN, Chimie ParisTech, l'université de Paris Sud XI, Arkema et Materials Design



Organic peroxides are unstable chemicals which can easily decompose and may lead to explosion. Such a process can be characterized by physico-chemical parameters such as heat and temperature of decomposition, whose determination is crucial to manage related hazards. These thermal stability properties are also required within many regulatory frameworks related to chemicals in order to assess their hazardous properties. In this work, performed in the PREDIMOL project, new quantitative structure-property relationship (QSPR) models were developed to predict accurately the thermal stability of organic peroxides from their molecular structure only in compliance with the OECD guidelines for regulatory acceptability of QSPRs. Based on the acquisition of 38 reference experimental data using differential scanning calorimetry apparatus in homogenous experimental conditions, multi-linear models were derived for the prediction of the decomposition heat and of the onset temperature using different types of molecular descriptors. Being rigorously validated, models presented the best performances in terms of fitting, robustness and predictive power and the descriptors used in these models were linked to the peroxide bond whose breaking represents the main decomposition mechanism of organic peroxides. These models will be available soon in a QSAR toolbox for REACH application files to supplement physical trials.

➔ dangereusement avec d'autres substances. Thermiquement instables, ils sont généralement commercialisés en faible concentration (dilués dans des solvants) pour diminuer les risques. Ces substances dangereuses aux propriétés bien connues sont traitées par la réglementation du transport de matières dangereuses dans la classe 5.2. peroxydes organiques et du SGH (système global harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques).

La stabilité thermique, utilisée comme indicateur du potentiel explosif d'un peroxyde organique, est une propriété très importante dans la procédure complexe de classification des peroxydes organiques. Si la chaleur de décomposition d'un peroxyde organique est inférieure à 500J/g, les essais de classification ne sont pas nécessaires. La stabilité thermique, généralement mesurée à l'aide de méthodes calorimétriques (telles que la DSC - Differential Scanning Calorimetry), peut faire gagner un temps précieux dans la procédure de classification des produits. Pour des raisons de sécurité mais aussi techniques, ces essais peuvent

être difficiles à réaliser pour des substances instables comme les peroxydes organiques. Aussi, le développement des méthodes prédictives est intéressant (gain de coût et de temps) pour la recherche et le développement de nouveaux peroxydes et peut permettre d'accélérer leurs procédures d'enregistrement pour REACH.

Prédiction de la stabilité thermique des peroxydes organiques

Un seul modèle QSPR [5], développé à partir d'une base de données expérimentales de seulement 16 peroxydes organiques, existe. Les conditions expérimentales ne sont pas entièrement définies (notamment au niveau du type de diluant utilisé), il n'a pas de validation externe et ne répond pas aux principes de validation des modèles selon l'OCDE.

De nouveaux modèles multilinéaires, répondant à tous les principes OCDE [3], ont été développés par l'INERIS, à partir d'une nouvelle base de données expérimentales, fiable et homogène, constituée pour 38 peroxydes organiques. Alimentée par des essais réalisés par l'INERIS et Arkema, elle renseigne 5 propriétés physico-chimiques (stabilité thermique, point d'éclair, densité relative, sensibilité à l'impact, et puissance explosive). Il s'agit de la plus grande base de données expérimentales relative à ces composés après la Datatop, base de données, dont l'origine est souvent inconnue, compilées par le TNO en 2005, qui regroupe les propriétés explosives de 116 peroxydes organiques.

À partir des 38 valeurs de chaleur de décomposition mesurées par DSC dans le projet PREDIMOL et en considérant plus de 300 descripteurs dont des descripteurs quantiques (calculés pour chaque peroxyde organique), un modèle quantitatif représenté par une équation multilinéaire à 4 descripteurs a été obtenu pour la chaleur de décomposition (divisée par la concentration en peroxyde organique) :

$$\Delta H/C = 54 \text{ 'K} - 990 n_{OO} + 12934 d_{OO} + 2631 Q_{OO} - 19371 \text{ (Eq. 1)}$$

où 1K est un indice topologique (indice de Kier shape d'ordre 1), n_{OO} est le nombre de liaisons peroxy, d_{OO} est la distance entre les 2 atomes d'oxygène de la liaison peroxy et Q_{OO} est la moyenne des charges (de Mulliken) de ces deux atomes d'oxygène. D'un point de vue chimique, la présence des trois derniers descripteurs, représentatifs de la liaison -O-O-, s'explique par le rôle central de la rupture de cette liaison dans la décomposition des peroxydes organiques [6].

Ce modèle est caractérisé par une corrélation remarquable ($R^2=0,97$, $RMSE=99 \text{ J/g}$), comme le montre la Figure 2. Il est robuste ($Q^2_{LOO}=0,94$) et présente un pouvoir prédictif important ($R^2_{ext}=0,81$) dans son domaine d'applicabilité.

Ce modèle QSPR est, pour l'Institut, le premier modèle répondant aux exigences d'une utilisation dans un cadre réglementaire (5 principes OCDE) pour prédire la chaleur de décomposition des peroxydes organiques. En effet, il a été validé avec des méthodes de validation interne (pour caractériser la robustesse) et externe (caractérisant la prédictivité) et son domaine d'applicabilité a été clairement défini. Un autre modèle QSPR a également été obtenu pour la prédiction de la température de décomposition avec de bonnes performances [3].

Ces deux modèles peuvent être utilisés pour obtenir les données requises dans le cadre de REACH ou par les industriels pour le screening de nouveaux peroxydes organiques. Dans une démarche d'acceptabilité réglementaire, ces modèles sont proposés à la QSAR Toolbox [2] et à la base de données du Joint Research Centre (JRC) de la Commission Européenne [3].

Collaborations

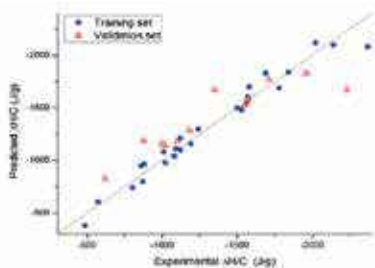
Ces travaux ont été réalisés en collaboration avec Chimie ParisTech (Équipe de Modélisation des Systèmes Complexes) et Arkema.

[2] QSAR Toolbox, www.qsartoolbox.org.

[3] (Q)SAR Model Reporting Format Inventory, qsar.db.jrc.it/qmrf/.

Figure 2

Corrélation entre les valeurs expérimentales (de chaleur de décomposition divisée par la concentration) et calculées par le modèle (Eq. 1)



DÉTERMINATION DE LA CIS ET TRANS-PERMÉTHRINE ET DE LEURS MÉTABOLITES DANS LE SANG ET LES ORGANES DE RAT

François
LESTREMEAU

Les pyréthrinoïdes représentent environ un quart des insecticides vendus dans le monde. La perméthrine est une des substances de cette famille la plus utilisée. Elle agit en tant que neurotoxique sur les insectes. De nombreuses études suggèrent également que l'exposition à cette substance pourrait conduire à des effets nocifs sur les mammifères.

La perméthrine est commercialisée sous forme de mélange contenant deux isomères, *cis* et *trans*. Afin de pouvoir évaluer l'exposition des mammifères à cette substance, une méthode analytique a été développée pour la mesure respective de chacun des isomères ainsi que pour celle de leurs métabolites associés dans diverses matrices de rat (sang, cellules rouges, plasma, cerveau, testicules, foie, rein, graisse, muscle et fèces).

Après prélèvement, ces matrices biologiques étaient extraites à l'aide de méthanol et d'acide chlorhydrique. Les extraits étaient ensuite concentrés et injectés dans

le matériel analytique. La séparation des substances ciblées était ainsi mise en œuvre par chromatographie en phase gazeuse et la détection effectuée par spectrométrie de masse en tandem grâce à l'utilisation d'une trappe d'ion *Figure 1*.

Cette méthode analytique a été validée avec des limites de quantification comprises entre 25 et 50 ng/mL pour les matrices liquides et 50 à 100 ng/g pour celles solides.

Elle a été ensuite appliquée pour des études toxico-cinétiques d'une durée de 24 heures avec des doses administrées aux rats de 5 et 20 mg/kg de perméthrine. Ces études ont permis de déterminer des différences de distribution et de métabolisation des différents isomères avec un taux d'élimination de la forme *trans* plus rapide que celui du *cis* et une accumulation des deux formes dans les tissus lipophiles *Figure 2*. Les résultats obtenus vont contribuer à l'élaboration de modèles toxico-cinétiques sur le rat et par extrapolation sur l'homme.

Référence

Lestremeu F., Willemin M.-E., Chatellier C., Desmots S., Brochot C., Determination of *cis*-permethrin, *trans*-permethrin and associated metabolites in rat blood and organs by gas chromatography-ion trap mass spectrometry, *Anal Bioanal Chem* (2014) 406:3477–3487

Figure 1

Chromatogramme d'une solution étalon pour l'analyse de la *cis*, *trans*-perméthrine et de leurs métabolites associés

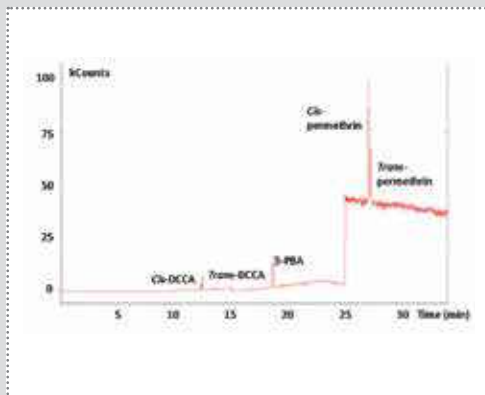
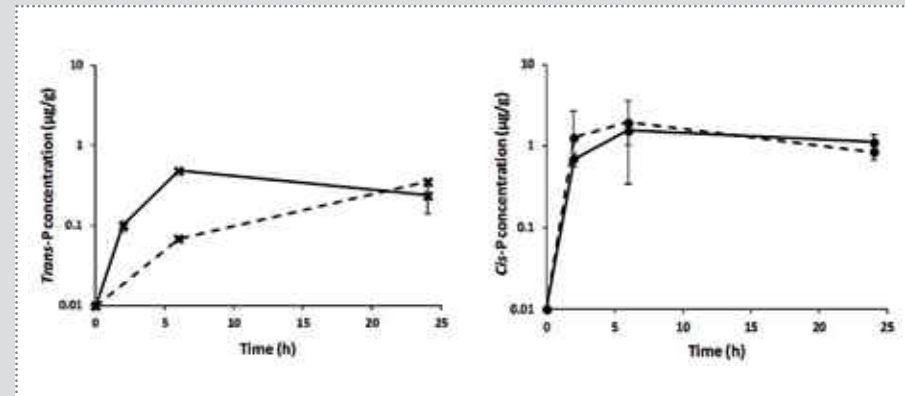


Figure 2

Profil de concentration vs. Temps pour la *cis*-perméthrine (*cis*-P) et *trans*-perméthrine (*trans*-P) dans la graisse après une administration orale de 5 mg/kg (ligne discontinue) et 20 mg/kg (ligne continue) de la *cis*- ou *trans*-perméthrine. Valeurs moyennes +/- écart types pour n = 2 à chaque point.





Cléo
TEBBY

François
BRION

Nathalie
HINFRAY

LE MODÈLE EMBRYONNAIRE DE POISSON ZÈBRE TRANSGÉNIQUE *cyp19a1b*-GFP

Références

- [1] Brion F., Le Page Y., Piccini B., Cardoso O., Tong SK., Chung BC., Kah O. (2012). Screening estrogenic activities of chemicals or mixtures *in vivo* using transgenic (*cyp19a1b*-GFP) zebrafish embryos. *PLoS One*, 2012; 7(5):e36069.
- [2] Tong SK., Mouriec K., Kuo MW., Pellegrini E., Gueguen MM., Brion F., Kah O., Chung BC. (2009) A *cyp19a1b*-gfp (aromatase B) transgenic zebrafish line that expresses GFP in radial glial cells. *Genesis*. 2009 Feb; 47(2):67-73.
- [3] Petersen K., Fetter E., Kah O., Brion F., Scholz S., Tollefsen KE. (2013). Transgenic (*cyp19a1b*-GFP) zebrafish embryos as a tool for assessing combined effects of oestrogenic chemicals. *Aquatic Toxicology*, 15; 138-139:88-97.

Les perturbateurs endocriniens et en particulier les agonistes des récepteurs des œstrogènes (ou œstrogènes mimétiques) ont été largement étudiés au cours de ces dernières années en raison de leurs effets sur la reproduction et le développement des organismes aquatiques tels que les poissons. Face aux préoccupations que posent ces composés pour les espèces et les milieux aquatiques, il est important de disposer d'outils aptes à caractériser les effets des substances seules vis-à-vis du système endocrinien des poissons dans une démarche d'évaluation du risque a priori, c'est-à-dire avant que les substances ne contaminent les milieux. Il convient aussi de considérer que, dans l'environnement, les poissons sont le plus souvent exposés simultanément à des mélanges de différents produits chimiques pouvant agir comme des œstrogènes mimétiques. Présents généralement à des concentrations faibles, ils peuvent néanmoins induire des réponses biologiques et ce, même si chacune des substances du mélange est présente à une concentration inférieure à celle conduisant à un effet. Ce constat a stimulé ces dernières années de nombreux travaux visant à évaluer les effets combinés de substances en mélange pour s'assurer *in fine* que les

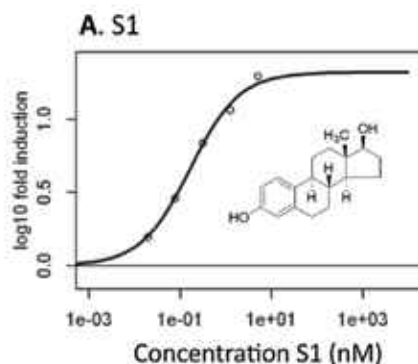
risques associés aux mélanges de composés chimiques puissent être correctement pris en compte. Cependant, les études sur la toxicité combinée des substances requièrent des plans d'expériences complexes et sont demandeuses en ressources expérimentales ce qui explique probablement qu'elles se soient majoritairement basées jusqu'à présent sur l'utilisation de modèles *in vitro*.

Test EASZY : quantifier le potentiel œstrogénique des substances seules

Récemment, l'INERIS a développé un bioessai *in vivo* sur embryon de poisson zèbre transgénique *cyp19a1b*-GFP permettant de cribler rapidement les composés œstrogéniques [1]. Ce test dénommé EASZY (Detection of Endocrine Active Substance, acting through estrogen receptors, using transgenic *cyp19a1b*-GFP Zebrafish embryos) se base sur la mesure d'un rapporteur fluorescent, la GFP (Green Fluorescent Protein) qui mime parfaitement l'expression du gène *cyp19a1b* [2]. L'expression du gène de l'aromatase cérébrale *cyp19a1b* est strictement régulée par les œstrogènes et rapidement et fortement induite dans le cerveau des embryons lorsqu'ils sont exposés à des

Figure 1

Effets œstrogéniques de substances (S1, S2) et en mélange (S1+S2). A-B Les plans d'expériences pour tester les mélanges sont construits à partir des données pour les substances seules. C La simplicité du modèle embryonnaire *cyp19a1b*-GFP permet de tester plusieurs ratios de mélanges (ex. 1:3, 1:1, 3:1) sur des gammes de concentrations étendues, avec des plans d'expériences en rayon. Les données expérimentales S1 + S2 (courbes rouge, vert, bleu ciel) sont confrontées à celles prédites par les modèles d'additivité (courbes en pointillés mélange [S1 + S2]) prédites selon le modèle de concentration addition). D L'analyse des données par le modèle de Jonker montre que le mélange S1 (œstradiol) et S2 (génistéine) a un effet antagoniste sur l'expression de la GFP.



plan d'expérience du mélange S1+S2

Agonist ligands of estrogen receptors have been extensively studied in recent years because of their effects on reproduction and development of aquatic organisms such as fish. While there is a need to develop fish-specific mechanism-based bioassays to screen estrogenic potency of chemicals alone, it is also important to consider that organisms are often exposed to mixtures of endocrine disruptors (EDs) that are able to produce significant effects, even when each chemical is present at low doses that individually do not induce observable effects. We recently developed an in vivo mechanism-based assay called EASZY that uses transgenic zebrafish *cyp19a1b*-GFP embryos expressing GFP under the control of the *cyp19a1b* promoter. EASZY is a rapid and cost-effective assay allowing to screen estrogenic activity of chemicals and was further used to explore combined effect of ED. The tested mixtures of estrogenic compounds acted predominantly in an additive manner on the expression of GFP demonstrating that combined effects of estrogenic compounds can be predicted by using dose addition, although in some cases deviations were observed. The effects of combinations of EDs from different categories were also explored by testing a binary mixture of estradiol and testosterone. Overall, we show that the use of *cyp19a1b*-GFP zebrafish embryo assay combined with predictive modelling is relevant to further explore the effect of complex mixture of EDs.

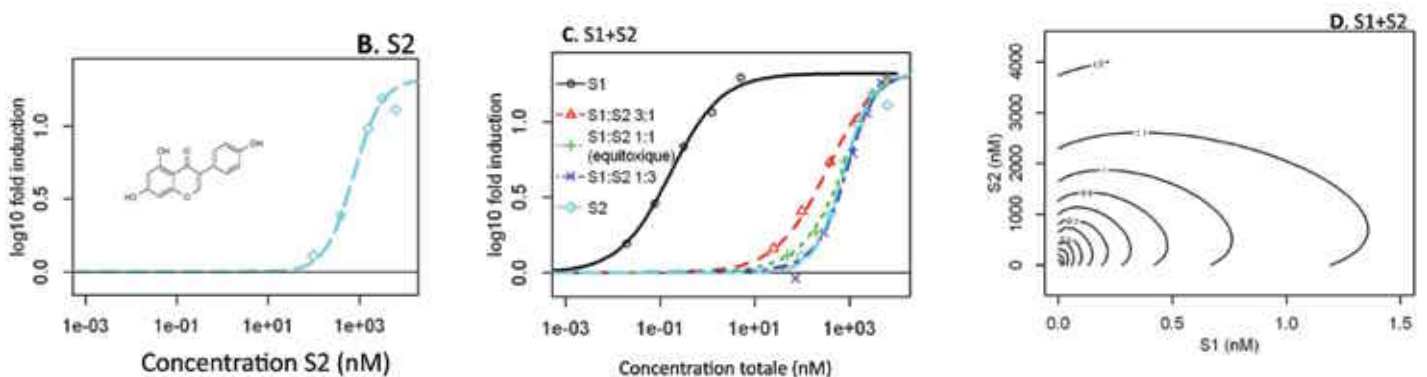
substances œstrogéniques. Le bio-essai sur embryon *cyp19a1b*-GFP offre de nombreux avantages puisqu'il conjugue des expositions courtes (4 jours), des volumes d'eau faibles et des acquisitions simples et non invasives de la fluorescence tout en tenant compte de la biodisponibilité et de la pharmacodynamique des composés testés. Ainsi, le potentiel œstrogénique de plus d'une soixantaine de substances seules a pu être quantifié [1] démontrant que de nombreuses substances sont capables d'agir, directement ou indirectement, dans le cerveau des poissons en développant en modulant l'expression de l'aromatase cérébrale.

Programme MIXEZ : évaluer les effets des substances en mélange

En raison des flexibilités expérimentales qu'offre le modèle embryonnaire *cyp19a1b*-GFP, la question des effets des substances

en mélange a été évaluée à l'aide de deux modèles d'additivité : le modèle d'addition des concentrations et le modèle d'indépendance d'action *Figure 1*. Les effets de mélanges plus ou moins complexes de deux, trois ou quatre substances œstrogéniques ont été évalués. Dans la majorité des cas, les composés agissent de manière additive sur l'expression de l'aromatase cérébrale, les modèles d'additivité permettant de prédire les effets combinés de substances agissant par un même mécanisme [1]. Cependant, dans certains cas des déviations par rapport aux modèles d'additivité ont pu être notées. Ainsi, les modèles d'additivité sous-estiment les effets combinés d'un mélange d'éthinylœstradiol, d'œstradiol et d'œstriol et surestiment les effets additifs d'un mélange de bisphénol A, octylphénol, éthinylœstradiol et œstriol à des concentrations élevées [3]. Dans le cadre de travaux engagés dans le programme MIXEZ

(Effect of Mixture of Endocrine Disruptors in Zebrafish) financé par le Programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens, un antagonisme sur l'expression de l'aromatase a été mis en évidence dans le cas d'un mélange binaire d'œstradiol et de génistéine. De manière originale, l'étude s'intéresse aux effets combinés de composés appartenant à des catégories différentes en testant par exemple des mélanges binaires d'un œstrogène (l'œstradiol) et d'un androgène aromatisable (la testostérone). L'ensemble de ces travaux démontre l'intérêt de tests biologiques simples et rapides pour le criblage de l'activité œstrogénique de substances seules et en mélanges tels que le modèle embryonnaire de poisson zèbre *cyp19a1b*-GFP. Combiné à de la modélisation prédictive, ce modèle permet d'appréhender la problématique des effets combinés de substances pour en comprendre et en évaluer les effets.







SITES ET TERRITOIRES

RISQUES NATURELS ET TECHNOLOGIQUES

36

Protéger les infrastructures de transport contre les accidents majeurs

38

De nouveaux modèles pour appréhender la construction de la sécurité industrielle

40

Dispositifs et stratégies de monitoring pour la surveillance de sites de stockage géologique

42

Dissolution des évaporites : formalisation et développement de modèles numériques bi & tri-phasiques

44

FOCUS La plate-forme expérimentale et de démonstration de Saint-Maximin

45

Rôle des effondrements karstiques dans les désordres survenus sur les digues de Loire

RISQUES SANITAIRES ET ENVIRONNEMENTAUX

47

FOCUS Les échantillonneurs passifs pour mesurer la qualité des eaux souterraines au droit des sites pollués

48

Combustion de saules utilisés en phytoextraction

50

Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale

52

Évaluation des risques sanitaires à l'échelle d'un territoire

54

Quantification des relations spatiales entre données environnementales, socio-économiques et sanitaires à différents niveaux géographiques

56

Interaction d'échelles dans les modèles de chimie-transport pour mieux connaître l'impact des grandes villes sur leur environnement

58

Impact des incendies de forêts russes d'août 2010 sur la qualité de l'air et les propriétés de l'atmosphère

60

Effets thermiques locaux potentialisés par les ondes radiofréquences

PROTÉGER LES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT CONTRE LES ACCIDENTS MAJEURS

Référence

Mazri C., Lucertini O., Olivotto A., Prod'homme G., Tsoukias A., *Protection of transport infrastructures against major accidents in land use planning policies. A decision support. Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 27: p. 119-129.

⁽¹⁾ Effets létaux significatifs (ELS), Effets létaux (EL) et Effets irréversibles (EI)

Les Plans de prévention des risques technologiques (PPRT) ont depuis leur instauration en 2003 profondément modifié le paysage de la gestion des risques industriels majeurs en France. Si les impacts sur les riverains industriels et résidentiels ont été largement discutés et médiatisés, le cas des infrastructures de transport l'a été moins et pourtant les enjeux sont importants.

Une voie ferrée ou une autoroute à forts trafics peuvent exposer plusieurs centaines d'usagers faiblement protégés; le cas le plus critique étant l'occurrence de l'accident durant la période de saturation (embouteillages, arrêt du train etc). De plus, ces infrastructures peuvent s'avérer très coûteuses à protéger ou à dévier (de 25 000 à 300 000 euros par mètre linéaire selon les spécificités de construction). Enfin, selon leur importance et la complexité de leur gestion, chacune de ces infrastructures peut être au centre d'un large réseau d'acteurs économiques, sociaux et territoriaux.

Pour apporter des réponses à la hauteur des défis techniques et sociétaux requis par la protection des usagers des infrastructures de transport dans le cadre des PPRT, l'INERIS a développé une démarche d'aide à la décision

permettant d'évaluer différentes alternatives de protection disponibles. En plus d'un guide technique, cette approche suggère aussi un cadre participatif permettant aux différentes parties prenantes d'être associées à la prise de décision.

Basée sur les apports des sciences de la décision d'une part, et des techniques de protection des infrastructures d'autre part, l'approche de l'INERIS se base sur quatre étapes.

Étape 1 : Classification des scénarios d'accidents

Les scénarios d'accidents fournis par l'étude de danger et dont les zones d'effets⁽¹⁾ impactent l'infrastructure sont classés en quatre catégories sur la base d'une matrice combinant probabilité ou fréquence du scénario ainsi que niveau de conséquences sur les usagers de l'infrastructure. S'agissant de ce dernier critère, il est lui-même le résultat d'une agrégation des niveaux d'intensité et d'un calcul d'un index de fréquentation de l'infrastructure. Du fait de la linéarité des infrastructures, un seul scénario génère fréquemment différents niveaux de conséquences sur différentes portions. Il peut donc être représenté simultanément à différents niveaux de la matrice.

Tableau 1

Exemple de matrice d'acceptabilité pour les infrastructures de transport²

Niveaux de conséquences sur les usagers de l'infrastructure	PROBABILITÉS/FRÉQUENCES				
	O à 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ à 10 ⁻³	10 ⁻³ à 10 ⁻²	10 ⁻² à 1
	E	D	C	B	A
Désastreux					
Catastrophique	S ^S _{VS}		S ^S _{VS}		
Important	S ^S _S ; S ^S _{VS}				
Sérieux	S ^S _S		S ^S _S		
Modéré	S ^S _{Si} ; S ^S _{Si} ; S ^S _{Si} ; S ^S _S		S ^S _{Si}		

S^x_y: Scénario numéro x au regard du niveau de conséquence y
VS: Conséquences très sérieuses
S: Conséquences sérieuses
Si: Conséquences significatives

² Les seuils d'acceptabilité décrits par la matrice ont valeur d'exemple et ne reflètent pas des choix réglementaires ou des prescriptions spécifiques de l'INERIS.

Tableau 2

Exemples de scénarios d'accidents

SCÉNARIOS D'ACCIDENTS	fréquence	L Très sérieux (Km)	L Sérieux (Km)	L Significatif (Km)	FI Très sérieux	FI Sérieux	FI Significatif	K (h)
1. Blève froid sphère	E	0	0,24	0,1	0	1,93	0,80	0
2. Fuite 10 % entre la valve de sphère et la pompe de distribution	E	0	0	0,413	0	0	3,32	1
3. Rupture franche de tuyauterie dans la réseau en aval de la pompe de distribution	C	0,17	0,05	0,02	1,36	0,40	0,16	0,5
4. Rupture du bras de chargement	E	0,08	0,02	0,04	0,64	0,16	0,32	0
5. Blève chaud wagon durant dépotage	E	0,37	0,13	0,12	2,98	1,04	0,96	2
6. Blève chaud sphère après incendie	E	0,413	0	0	3,32	0	0	18

Users of transport infrastructures nearby hazardous plants may represent important populations potentially impacted by a major accident. The Toulouse catastrophe in 2011 has been an illustrative example as it strongly impacted highway users. Therefore, transport infrastructure users (road and railway users mainly) represent a population to be protected within a land use planning policy as it is the case for inhabitants. Accordingly, this paper presents a decision support approach aiming to help local stakeholders identify the most cost effective measures to protect transport infrastructures from major accidental consequences. The suggested approach takes into account both technical and participatory constraints with the aim of offering an equal chance to all involved stakeholders to understand the issues under discussion and formulate opinions and values.

Cette démarche a été appliquée à un site pilote. Il comprend un réseau ferré reliant deux centres urbains, avec un trafic estimé à 2900 passagers par jour. Une usine est localisée dans une zone proche faisant ainsi de la protection des passagers un enjeu majeur du PPRT.

La matrice est décomposée en quatre zones : rouge (inacceptable), orange (tolérable), bleue (zone de suraccident) et verte (acceptable), permettant une hiérarchisation du risque associé aux usagers de l'infrastructure **Tableaux 1 et 2**.

Étape 2 : Identification des options

Lors de cette étape, l'ensemble des scénarios situés en zones bleue, orange et rouge sont traités individuellement pour identifier les options permettant de les ramener à un niveau de risque moindre. Pour ce faire, il est proposé la typologie d'actions suivante :

(i) Pour les scénarios en zone bleue, les acteurs peuvent recourir à des options permettant d'éviter ou de réduire l'occurrence de suraccidents résultant des pertes de contrôle par les conducteurs de véhicules après une exposition à un accident majeur. Une signalisation adaptée ainsi qu'une meilleure séparation des voies

de circulation sont des exemples d'options envisageables.

(ii) Pour les scénarios en zones orange et rouge, les options suivantes peuvent être étudiées en concertation avec l'ensemble des parties prenantes :

- Mesures organisationnelles de réduction de la fréquentation de l'infrastructure. À ce niveau, une réduction permanente de la fréquentation de l'infrastructure peut être envisagée. Si la cinétique du scénario le permet, il est aussi envisageable de mettre en place un dispositif d'alerte permettant la fermeture de l'infrastructure en cas d'accident. Enfin, il est aussi envisageable de planifier certaines activités ponctuelles à risques (dépotage par exemple) lors des phases de faible fréquentation de l'infrastructure.
- Réduction des risques à la source. Plutôt que d'agir sur l'infrastructure elle-même, ce type d'options vise à réduire la probabilité ou l'intensité des scénarios en agissant sur les systèmes à leur origine. La mise en place de barrières de sécurité supplémentaires ou l'éloignement des équipements à risques sont à ce titre des exemples.

Étape 3 : Mesures physiques de réduction de la vulnérabilité

Si les différentes options identifiées ci-dessus n'ont pas permis d'éliminer l'ensemble des scénarios en zone rouge, cela implique qu'il est nécessaire de recourir aux mesures physiques de réduction de la vulnérabilité.

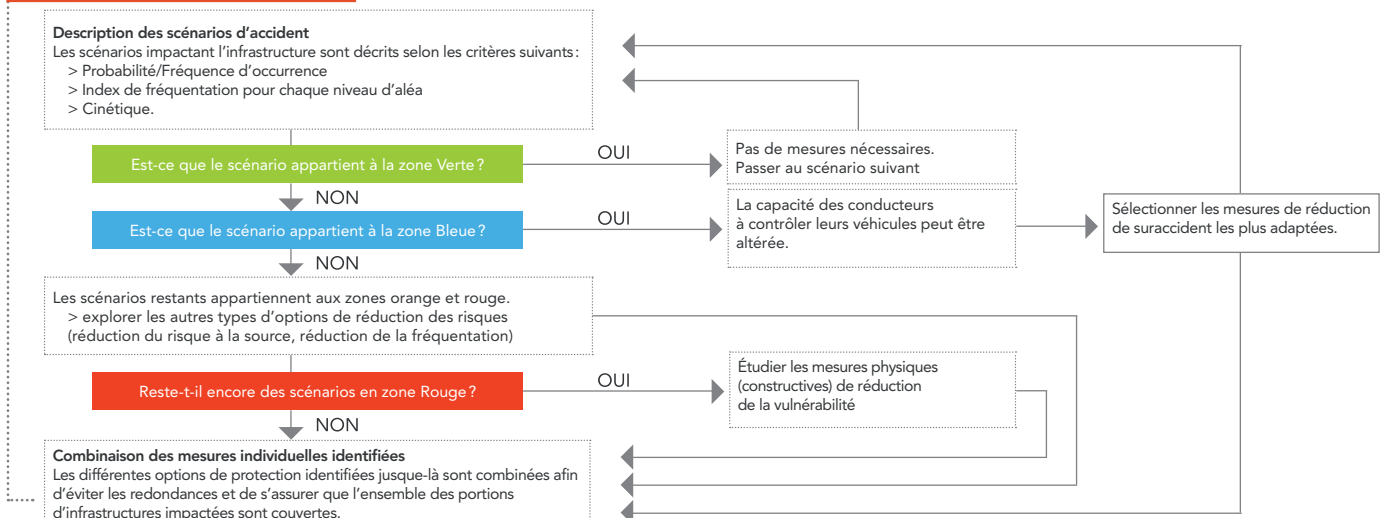
Étape 4 : Élaboration des combinaisons d'options

Les scénarios d'accidents ont été jusque-là considérés individuellement et ont possiblement abouti à l'identification de différentes options. Il s'agit maintenant de combiner ces différentes options afin de fournir un niveau de protection maximal à un coût raisonnable. La combinaison adaptée se doit de respecter un certain nombre de propriétés :

- (i) éviter les redondances entre mesures ;
- (ii) assurer une complémentarité pour couvrir l'ensemble des portions d'infrastructure impactées ;
- (iii) privilégier autant que possible les mesures les moins coûteuses par rapport à celles suggérées en étape 3.

Le récapitulatif de la démarche est présenté ci-dessous.

Récapitulatif de la démarche



DE NOUVEAUX MODÈLES POUR APPRÉHENDER LA CONSTRUCTION DE LA SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Références

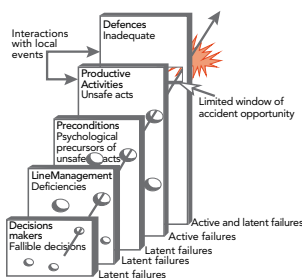
Le Coze J.-C. 2014. *New models for new times. An anti dualist move. Safety Science. 59.200-218.*

Rasmussen J. 1997. *Risk management in a dynamic society: a modeling problem. Safety Science 27 (2/3) 183-213.*

Reason J. 1997. *Managing the risk of organizational accidents. Ashgate.*

Figure 1

Modèle de trajectoire accidentelle



La sécurité industrielle comme thématique spécifique de recherche pour les sciences humaines et sociales (SHS) prend appui sur des travaux fondateurs et innovants élaborés dans les années 1980 et 1990. Certaines de ces innovations ont été particulièrement graphiques. Dans ce domaine, les « safety models » ou « accident models » chez les Anglo-Saxons mobilisent de nombreuses analogies ou métaphores. Les modèles de James Reason (1997) ou Jens Rasmussen (1997) en sont de très bons exemples qui servent toujours de références. Le premier représente la sécurité (ou l'accident) comme la trajectoire d'une flèche dans une série de plan représentant des barrières de défense prévues en conception et exploitation. Les trous dans ces plans symbolisent des vulnérabilités dans ces barrières. L'alignement des trous explique la survenue d'un accident *Figure 1*. Ce modèle a évolué au cours des années et est maintenant popularisé sous le nom du « modèle du fromage suisse ».

Le second conceptualise la problématique de la sécurité industrielle (et des accidents) comme le franchissement de limites de fonctionnement sûr représentées métaphoriquement par une enveloppe. Ce franchissement résulte des configurations obtenues par les interactions d'acteurs faisant usage du degré de liberté dont ils disposent au sein des systèmes sociotechniques sous l'influence de contraintes dynamiques multiples, technologiques, de marché ou sociales *Figure 2*. Face à ces diverses contraintes et les incertitudes qu'elles engendrent, les ingénieurs, managers et opérateurs adaptent leur comportement au quotidien. L'agrégation de ces comportements produit parfois des résultats non souhaités. Les systèmes sociotechniques sont eux envisagés plus globalement comme l'interaction de plusieurs strates ou niveaux qui génèrent une dynamique spécifique à l'ensemble *Figure 3*. Ces deux modèles combinés permettent, de manière différente, de saisir de manière heuristique les enjeux d'une

Figure 2

Modèle de migration de Jens Rasmussen

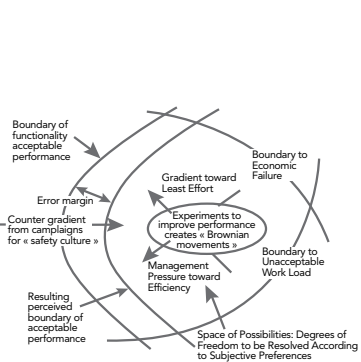


Figure 3

Vue du système sociotechnique

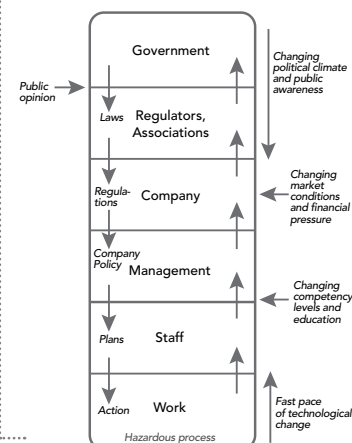


Tableau 1

Sélection des forces et faiblesses des modèles classiques de la sécurité industrielle

	Modèle de James Reason <i>Figure 1</i>	Modèles de Jens Rasmussen <i>Figures 2 & 3</i>
Forces (sélection)	<ul style="list-style-type: none"> > Ce modèle provoque une compréhension intuitive et immédiate ainsi qu'une proximité avec l'univers de la technologie des "défenses en profondeur" qui se déplace métaphoriquement très bien du technologique à l'organisationnel. > Il exprime et simplifie la complexité du problème de l'accident en indiquant les potentiels alignements (malchanceux, dans l'optique de l'auteur) de trous qui caractérisent un scénario spécifique 	<ul style="list-style-type: none"> > Ces modèles indiquent l'importance d'approcher de manière interdisciplinaire et de manière transverse les problématiques de sécurité industrielle. > Ils caractérisent les notions de variabilité et d'adaptation d'une entreprise au sein d'un environnement complexe de changements technologiques, économiques et sociaux en relation avec l'idée de l'exploration aux frontières du fonctionnement sûr.
Faiblesses (sélection)	<ul style="list-style-type: none"> > Le modèle n'explique pas clairement ce que sont les trous dans la réalité, les utilisateurs sont laissés à eux-mêmes pour faire cette traduction, le modèle est plutôt suggestif et pas analytique sur ce point. > Il n'explique pas comment les trous peuvent s'aligner, malgré les ajouts par James Reason qui a essayé d'expliquer visuellement le compromis production et sécurité mais qui ne fait que fournir un principe vague, peu applicable. 	<ul style="list-style-type: none"> > Ils impliquent une vision hiérarchique du système sociotechnique, avec le gouvernement et les autorités en haut, qui semblent apparaître comme dans une position de contrôle, ce qui est évidemment problématique par rapport à la réalité aujourd'hui. > Ils laissent penser que le flux d'information est de nature cybernétique et séquentiel, premièrement n'indiquant pas qu'il n'existe pas de communication directe entre des niveaux séparés, deuxièmement sans indiquer non plus les filtres existants entre les niveaux.

The article revisits two very popular safety models to show that it might be time, after several decades, to review their value for the field. Indeed, many of the influential safety models are the product of the 80's and 90's: two major models by James Reason and Jens Rasmussen spring to mind. The former has been known for his 'Swiss cheese model' and the latter for his 'Migration model' and 'Sociotechnical view'. This paper very briefly introduces the basics of these safety models in order to identify some of their strengths but also weaknesses in relation to evolution in research and also evolutions in the operating constraints of high risk systems. Indeed, over the past 20 years, on the one hand, a number of works in the social sciences have provided analytical insights which need to be acknowledged, while, on the other hand, the world has gone through an intensified stage of globalization which created a new environment shaping the configurations of high risk systems. The paper concludes with an alternative graphical representation of the sociotechnical view in order to stress key features such as circular causalities, polycentrism as well as the importance of materializing the multitude of expertise embodied in individuals interacting with each other and their material environment.

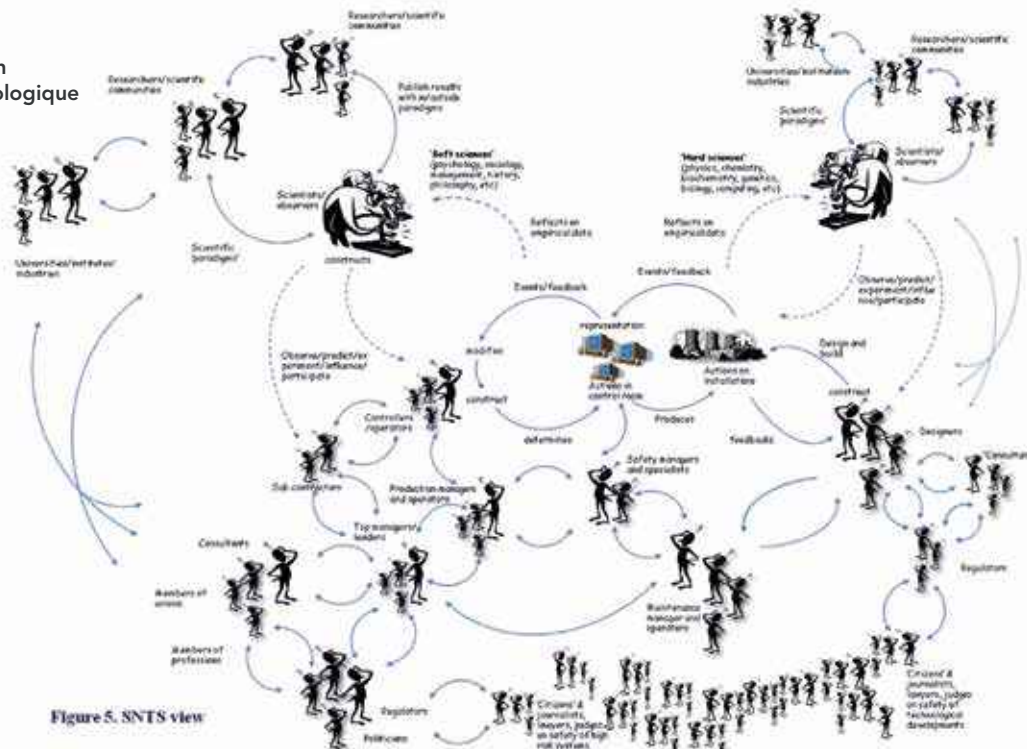
recherche en sécurité industrielle ainsi que de prévention des accidents technologiques. Cependant, il est devenu nécessaire de s'interroger sur les limites de ces travaux au vu des évolutions des travaux de recherche en sciences sociales ainsi que des conditions d'exploitations des systèmes à risque au cours des 20 dernières années (et en particulier par rapport aux implications des processus de globalisation pour les entreprises), comme en témoignent les accidents de BP et Transocean dans le domaine pétrolier aux États-Unis en 2010 et de Tepco dans le domaine nucléaire au Japon en 2011. Dans ce but, en dressant les forces et les faiblesses **Tableau 1** des modèles qui viennent d'être très succinctement présentés **Figures 1 à 3**,

des pistes sont ouvertes pour apporter de nouvelles perspectives graphiques. D'une part, les transformations technologiques, économiques, sociales, politiques et culturelles des dernières décennies et d'autre part, l'évolution des recherches en sciences cognitives, en sociologie, en gestion ou sciences politiques nous amènent bien à réviser ces sources d'inspiration graphiques. Prenons l'exemple de la vue du système sociotechnique de Jens Rasmussen **Figure 3** pour en proposer une vision alternative. Cette vue ne rend pas bien compte d'un ensemble d'aspects que l'on sait aujourd'hui être au cœur des dynamiques de construction de la sécurité industrielle. Il est pertinent de ce point de vue :

- (i) d'abandonner la représentation hiérarchique et verticale de la représentation en faveur d'une approche plus polycentrique ou acentrique ;
- (ii) d'illustrer les causalités complexes au sein des systèmes sociotechnologiques ;
- (iii) de représenter des acteurs interagissant entre eux et avec leur environnement ;
- (iv) d'introduire les scientifiques qui cherchent à saisir la dynamique de l'ensemble depuis un point de vue toujours situé dans une discipline, afin de montrer les limites d'approches disciplinaires au profit de démarche multi et interdisciplinaires.

En prenant en compte ces ajustements, une représentation alternative peut être proposée **Figure 4**.

Figure 4
Nouvelle représentation
du système sociotechnologique



DISPOSITIFS ET STRATÉGIES DE MONITORING POUR LA SURVEILLANCE DE SITES DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE

Stéphane
LAFORTUNE

Zbigniew
POKRYSZKA

Gaëtan
BENTIVEGNA

Références

[1] Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G. (2010). Development of methods for gaseous phase geochemical monitoring on the surface and in the intermediate overburden strata of geological CO₂ storage sites. *Oil and Gas Science and Technology (Revue IFP)*, 65(4), p. 653-666.

[2] Lafortune S., Pokryszka Z., Bentivegna G., Chaduteau C., Agrinier P. (2011). First steps in coupling continuous carbon isotopic measurements with already proven subsurface gas monitoring methods above underground carbon dioxide storage sites. *Energy Procedia*, 4, p. 3526-3533.

Tauziède C., Pokryszka Z., Jodart A. (1997). Measurement of the gas flux from a surface. Patent EP0807822.

La géochimie des gaz et de l'eau joue un rôle majeur dans la surveillance des sites de stockage géologique (par exemple vis-à-vis du CO₂ ou du CH₄). La surveillance (ou monitoring) géochimique a plusieurs objectifs : (i) l'établissement de l'état environnemental initial en surface et subsurface des sites avant que l'injection ne débute dans le sous-sol (ou état zéro); (ii) la détection des fuites qui se manifesteraient par une modification de l'état zéro; (iii) la démonstration de la faisabilité d'un stockage sûr.

L'INERIS travaille depuis de nombreuses années au développement de dispositifs et de stratégies de monitoring pour établir l'état zéro et réaliser la surveillance des sites aussi bien lors d'opérations d'injection, qu'après l'arrêt de l'exploitation. L'Institut travaille également à la caractérisation de fuites de gaz et à la compréhension de la dynamique de migration de gaz dans le sous-sol.

Techniques de monitoring de surface

La mesure de flux de gaz à l'interface sol-atmosphère est une méthode de surveillance développée par l'INERIS sur le principe de

la chambre à accumulation [1]. C'est une mesure directe et très flexible qui permet de détecter toute anomalie significative dans le temps, aussi longtemps que des mesures sont régulièrement effectuées et qu'elles sont statistiquement représentatives. C'est également une méthode qui peut être utilisée rapidement pour confirmer ou infirmer tout doute concernant la présence d'une fuite en surface. À noter que la mesure de flux peut être facilement couplée avec d'autres investigations effectuées dans le sol comme la mesure des teneurs en gaz et des signatures isotopiques. Enfin, la mesure de flux apparaît être un outil de communication utile pour établir la confiance du public dans la sécurité d'un projet de stockage. En effet, la méthode mise au point par l'INERIS est directe et repose sur un principe facilement compréhensible *Figure 1*.

Les sols émettent naturellement des gaz (par exemple le CO₂) en raison des activités biologiques. Afin d'avoir une idée du flux naturel de CO₂, des mesures sont régulièrement réalisées depuis plusieurs années une quinzaine de lieux répartis sur le territoire national. Ces mesures constituent une base

Figure 1

Mesure du flux de gaz à l'interface sol-atmosphère à l'aide de la chambre à accumulation développée par l'INERIS.

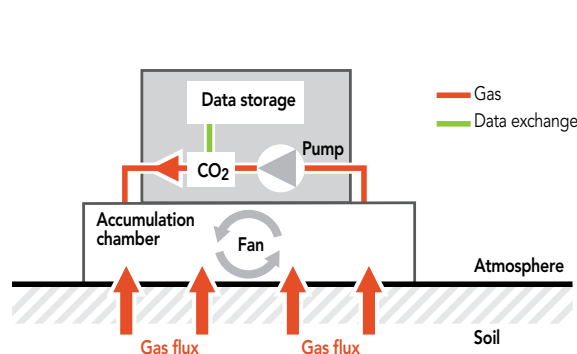
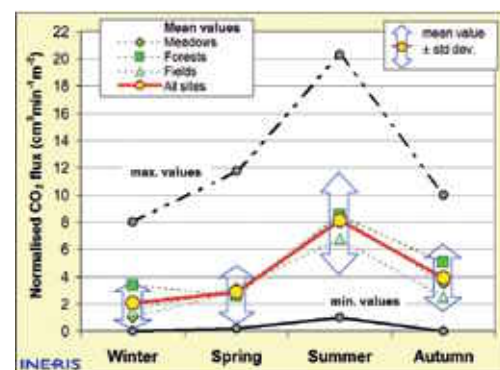


Figure 2

Flux naturel de CO₂ en fonction de la saison



Involved in several research projects funded by the European Union on carbon capture and storage, INERIS has been involved in the design, development, testing and field-deployment of gas monitoring devices in soil and sub-surface on industrial sites. The Institute has developed strong experience using self-designed devices dedicated to the characterization of future CO₂ storage sites and analogues of natural or anthropogenic CO₂-leaking systems (e.g. former mining areas). A special interest is given to the monitoring of gas flux at surface and gas migration in the subsurface. Gas monitoring in wells and surface gas measurements are used for storage sites before, during and after injection starts, in order to characterize leaking processes that may impact urban areas. After many years of worldwide research conducted by many researchers and corporations, it is now time to adopt a "monitoring-ready" approach. It has to be available to challenge industrial and stakeholders' expectations for efficient, field-deployable and cheap solutions in performing efficient gas monitoring in the soil and the sub-surface.

de données donnant une gamme de flux émis naturellement par l'activité biologique dans tout le pays pour différents usages du sol (forêt, prairie, champ agricole *Figure 2*). La plage des valeurs observées s'étend de 0 à 20 cm³.m⁻².min⁻¹ (soit de 0 à 70 10⁻⁸ kg.m⁻².s⁻¹). Les résultats montrent une forte relation entre la valeur du flux de CO₂ et les conditions climatiques. La température atmosphérique apparaît être un facteur clef pour le contrôle de l'émission de CO₂ à l'interface sol-atmosphère. Toute autre contribution importante à l'émission (comme une fuite de CO₂ à partir d'un site de stockage) augmenterait la quantité de gaz émis naturellement et serait ainsi détectée.

Techniques de monitoring de subsurface

Avant d'atteindre la surface, le gaz migre depuis le stockage au travers du sous-sol. La connaissance des processus qui peuvent influencer cette migration est fondamentale pour déterminer les conséquences potentielles d'une fuite à la surface. Le monitoring de subsurface est réalisé

dans des puits de profondeur variable, au sein desquels sont contrôlés les teneurs en gaz et les paramètres physiques comme la température et la pression *Figure 3*.

L'INERIS travaille depuis plusieurs années à la caractérisation des processus de migration de gaz dans les formations peu profondes non saturées, car ces formations superficielles constituent le dernier obstacle avant que le gaz n'atteigne la surface. Dans une certaine mesure, les milieux poreux souterrains peuvent en effet constituer des « volumes tampons » qui accumulent du gaz en phase dissoute (milieu poreux saturé) ou gazeuse (milieu poreux non saturé). Le gaz accumulé peut être libéré et migrer vers la surface, par exemple en cas de baisse importante de la pression atmosphérique.

Caractérisation des situations anormales en vue d'une remédiation

Lorsqu'une anomalie est détectée en ce qui concerne l'émission de gaz en surface, une caractérisation rapide doit être faite pour

évaluer les risques pour les personnes et, si nécessaire, pour proposer des solutions d'urgence.

Cette caractérisation doit avoir pour objectif: (i) de déterminer le mécanisme de production de gaz ou l'origine du gaz; (ii) d'identifier les voies de migration (émissions diffuses ou localisées); (iii) d'identifier et de caractériser les mécanismes et la dynamique des émissions (force motrice de l'écoulement et variations temporelles).

L'INERIS dispose de différents moyens pour caractériser les émissions anormales de gaz à la surface et dans le sous-sol *Tableau 1*. Toutes ces techniques ont été utilisées à plusieurs reprises dans différents contextes liés à la surveillance d'émissions ou de migration de gaz.

Les mesures correctives peuvent concerner tant le milieu géologique que le bâti. Différentes solutions peuvent être proposées, concernant par exemple la limitation de la migration des gaz dans le sous-sol, le renforcement de la ventilation ou de l'étanchéité du bâti.

Figure 3

Monitoring des gaz dans la subsurface par l'intermédiaire d'un puits.

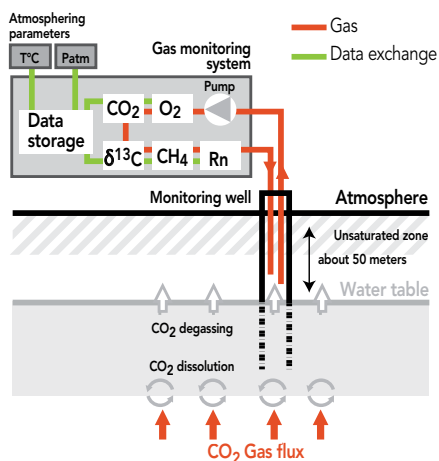


Tableau 1

Panel d'outils de monitoring disponibles pour caractériser les émissions de gaz à la surface et dans le sous-sol

Objectif	Mesures	Protocole
Détermination des mécanismes de production ou de l'origine du gaz	Teneurs en gaz	Mesure des teneurs en gaz dans des espaces confinés (par ex. : caves) ou dans le sol pour déterminer la nature et la composition des gaz.
	Analyses isotopiques	Mesure de la signature isotopique du carbone pour déterminer l'origine du CO ₂ [2].
Identification des chemins de migration	Flux gazeux à l'interface sol-atmosphère	Cartographie des émissions de gaz en surface pour identifier les zones émissives.
	Gaz traceur artificiel ou naturel	Mesurer les teneurs en gaz traceur pour caractériser les chemins de migration et les vitesses de transfert dans le sous-sol.
Identification des mécanismes et l'évaluation de la dynamique d'écoulement	Pression en gaz	Mesure du gradient de pression, pour évaluer sa contribution à l'écoulement.
	Température	Mesure du gradient de température, et de son évolution pour évaluer la contribution du tirage thermique à l'écoulement.
	Sens d'écoulement	Détermination du sens d'écoulement (entrant/sortant) en certains points bien définis (par ex. : fractures, forages, ouvrages miniers etc.).



**Farid
LAOUAFA**

DISSOLUTION DES ÉVAPORITES : FORMALISATION ET DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES NUMÉRIQUES BI & TRI-PHASIQUES

Références

Laouafa F., Luo H., Quintard M., Debenest G. A numerical method for cavity dissolution in salt formation 7. Conference on the Mechanical Behavior of Salt « SaltMech7 ». Taylor & Francis Group, 2012, 313-320

Luo H., Quintard M., Debenest G., Laouafa F. Properties of a diffuse interface model based on a porous medium theory for solid-liquid dissolution problems. Comput Geosci (2012). DOI 10.1007/s10596-012-9295-1

Luo H., Laouafa F., Quintard M. Numerical modeling of three-phase dissolution of underground cavities using a diffuse interface model. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. DOI: 10.1002/hag.2274

La question scientifique motivant cette recherche concerne les risques naturels de cavités formées par dissolution au sous-sol. Elle porte sur la quantification de l'évolution spatio-temporelle des vides souterrains créés par dissolution. Dans le cadre de l'analyse des risques induits par la présence de cavités souterraines, il est nécessaire de pouvoir estimer la vitesse à laquelle les cavités se créent et se développent. Les modèles numériques développés par l'INERIS ont pour vocation de quantifier ces phénomènes. Les systèmes de dissolution naturelle dans le gypse ou dans les formations calcaires ou de sel sont concernés comme ceux des anciennes exploitations souterraines. Dans ce contexte, une meilleure connaissance de la physique de la dissolution et l'utilisation d'outils de modélisation spécifiques peuvent permettre d'optimiser les méthodes d'exploitation. La dissolution n'est pas spécifique au domaine souterrain, elle peut affecter les versants rocheux et induire des glissements de terrains ou des chutes de blocs. Les roches concernées ont la spécificité d'être plus ou moins solubles selon leur composition minérale et la nature

des sollicitations hydrodynamique, chimique et climatique. La dissolution se traduit par un transport de masse et la création de vide au sein du milieu. L'INERIS s'est principalement intéressé au lessivage qui correspond à une dissolution de surface plus qu'à une dissolution matricielle qui elle affecte la matrice du solide poreux. Le lessivage modélisé se différencie de la suffusion où les cavités sont principalement formées par érosion mécanique.

Formalismes et modèles numériques

La modélisation numérique de l'évolution de la géométrie des cavités formées par dissolution est complexe *Figure 1*. Les processus physico-chimiques en présence sont nombreux et interagissent. Le problème est multi-échelle et multi-physique. Les réactions chimiques sont régies par les lois d'équilibre définies dans le cadre de la thermodynamique et la cinétique chimique. La dissolution étant conditionnée par la nature du fluide, il est nécessaire de reproduire correctement la concentration des espèces et son évolution

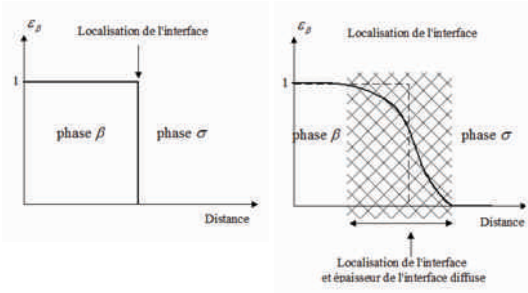
Figure 1

Illustration d'un effondrement induit par une dissolution *in situ* (à gauche) et explicitation des variables du modèle à l'échelle locale au niveau de l'interface (à droite). V_∞ , V_β , $W_{\beta\sigma}$, $n_{\beta\sigma}$ représentent respectivement la vitesse d'écoulement du fluide loin de l'interface, la vitesse de la phase au voisinage de l'interface, la vitesse de récession, et la normale à l'interface.



Figure 2

Illustration géométrique du concept d'interface diffuse entre les phases (à droite) à comparer avec une interface franche (à gauche)



Natural evaporite dissolution at sub-surface can lead to cavities having critical dimensions in the sense of mechanical stability resulting in natural hazards. Geomechanical effects may be significant for people and infrastructures since the underground dissolution may lead to subsidence or collapse (sinkholes). The knowledge of the cavity evolution in space and time is thus crucial in many cases. We describe the use of a local nonequilibrium Diffuse Interface Model (hereafter denoted as DIM) for solving dissolution problems involving multi-moving interfaces within two or three phases, i.e., solid-liquid-gas as found in superficial aquifers and karsts. On one hand, a local non-equilibrium dissolution porous medium theory allows to describe the solid-liquid interface as a diffuse layer characterized by the evolution of a phase indicator (e.g. porosity). On the other hand, the liquid-gas interface evolution is computed using a classical porous medium two-phase flow model involving a phase saturation, i.e., generalized Darcy's laws. Such a DIM formulation is suitable for the implementation of a finite element or finite volume numerical model on a fixed grid without an explicit treatment of the interface movement. A numerical model has been implemented using a finite volume formulation with adaptive meshing (AMR: Adaptive Mesh Refinement), which improves the computational efficiency and accuracy significantly since fine gridding may be attached to the dissolution front.

au sein du fluide. Il est donc indispensable de décrire précisément les écoulements et le transport des espèces dissoutes dans le milieu. Le principal défi scientifique relatif à la formalisation du problème, réside dans la prise en compte simultanée des couplages thermo-hydro-chimiques et l'évolution de la géométrie du domaine. L'INERIS a étudié des systèmes bi-phasiques (fluide-solide) et des systèmes tri-phasiques (gaz-liquide-solide). Le formalisme mathématique de la dissolution est basé sur une approche thermodynamique, contrôlée par la condition d'équilibre à la surface. Le passage d'une description microscopique (échelle du pore) à une description macroscopique (échelle d'un certain volume) de milieu poreux intégrant un grand nombre de pores s'effectue par homogénéisation (théorie de la moyenne). La résolution du problème de transport avec évolution de l'interface a été traitée en utilisant deux

méthodes d'interface : Franche (Arbitrary Lagrangian Eulerian) et Diffuse (Diffuse Interface Method). La prise en compte des effets densitaires induits par la dissolution crée dans de nombreux problèmes des instabilités de Rayleigh reproduits précisément par notre modèle. Pour optimiser le temps de calculs, une méthode de raffinement adaptatif du maillage a été développée. La méthode de champ de phase introduite il y a une vingtaine d'années pour décrire la solidification de mélanges polyphasiques permet de s'affranchir de la difficulté du suivi du front de dissolution, en créant une interface spatialement diffuse d'épaisseur finie *Figure 2*. On passe alors d'un modèle discontinu à un modèle continu. L'interface diffuse est créée par l'intermédiaire de variables scalaires (variable de champ de phase, ici la porosité ϵ_p). Cette variable est constante dans la zone solide et décroît rapidement au sein

de l'interface. Cette approche est capable de modéliser l'évolution de morphologies arbitraires et de microstructures complexes.

Exemples d'application

De nombreuses applications ont été réalisées en 3D et 2D. La *Figure 3*, par exemple, simule un essai expérimental de dissolution (création de cavité) par injection d'eau douce en partie basse du tubage. On peut observer la forme complexe des champs de concentration et également le caractère très chahuté de l'écoulement à un instant donné. La *Figure 4* illustre les potentialités de l'approche lorsque l'on considère en plus une phase gazeuse. L'approche développée a été mise en œuvre avec succès dans des cavités réelles.

Remerciement : ce travail fait l'objet d'une collaboration scientifique avec l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT).

Figure 3

Instantanés de (a) champ de concentration, (b) lignes de courant et (c) lors de la dissolution et évolution temporelle du taux de dissolution en trois endroits d'une cavité saline.

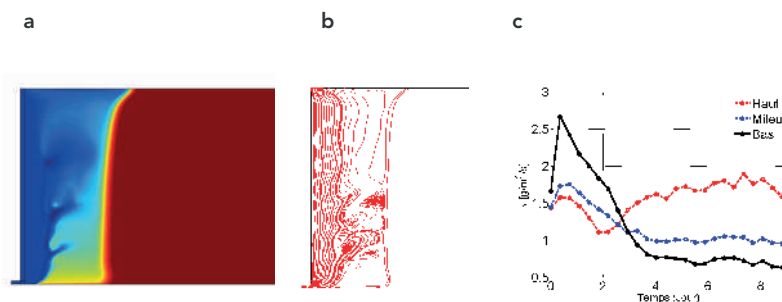
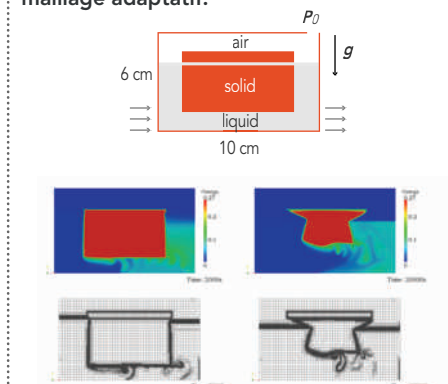


Figure 4

Dissolution tri-phasique : air-sel-eau pure. problème (à gauche) et concentration à deux instants et représentation du maillage adaptatif.



Marie
DEGAS

LA PLATE-FORME EXPÉRIMENTALE ET DE DÉMONSTRATION DE SAINT-MAXIMIN

Une plate-forme souterraine d'expérimentation et de démonstration dédiée aux risques liés à la présence de cavités souterraines a été développée récemment par l'INERIS, au sein de la carrière Parrain à Saint-Maximin (Oise). Elle vise deux objectifs : diffuser les connaissances relatives à la gestion des risques induits par les cavités vers tous les interlocuteurs concernés, et plus particulièrement les collectivités locales et territoriales, et acquérir de nouvelles connaissances en développant des expérimentations *in situ*, en partenariat avec la communauté scientifique et les acteurs concernés.

Cette plate-forme est organisée en ateliers démonstratifs présentant les différents types de cavités souterraines et les phénomènes d'instabilités qu'elles peuvent entraîner (remontée de voûte, fracturation des piliers...). Les moyens de gestion et de prévention du risque sont également présentés : mise en œuvre de travaux adaptés (confortement,

comblement), mesures d'aménagement ou de surveillance (caméra téléguidée à distance, sondes microsismiques et microphoniques, filets détecteurs de chute de blocs...). Ces moyens permettent de maîtriser l'impact des mouvements de terrain en surface.

La partie expérimentale de ce laboratoire, en développement, consiste pour le moment à déterminer le comportement à long terme d'un pilier sous l'action du poids des terrains de recouvrement. Pour ce faire, un pilier de la carrière a été instrumenté avec des capteurs géomécaniques et climatiques pour mesurer sa vitesse de déformation (extensomètre à double ancrage et canne de convergence) en fonction de l'évaluation des paramètres climatiques (température, humidité ambiante en galerie, humidité de la roche). Ce volet expérimental devrait s'enrichir par des projets de recherche et développement.

Le site a également pour vocation de tester et de valider des matériels innovants pour

optimiser le travail des experts : système de localisation du souterrain par rapport à la surface (fond/jour), outil de numérisation du milieu souterrain (scanner laser 3D), drones roulants pouvant reconnaître des zones non accessibles par l'homme.

La plate-forme expérimentale de l'INERIS a bénéficié des subventions du ministère en charge de l'écologie et de celles de la Région Picardie.

Référence

Degas M., Cherkaoui A., Watelet J.M., 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) : p. 35-41

Figure 1

Montée de voûte



Figure 2

Pilier instrumenté



Figure 3

Scan 3D d'une partie de la plate-forme



Philippe
GOMBERT

RÔLE DES EFFONDREMENTS KARSTIQUES DANS LES DÉSORDRES SURVENUS SUR LES DIGUES DE LOIRE

La vallée de la Loire est principalement protégée des crues par des « levées », digues construites avec les matériaux alluviaux sablo-argileux en place. Elles reposent sur quelques mètres d'alluvions qui, sur un linéaire cumulé d'environ 200 km tout au long de la vallée de la Loire, surmontent un substratum calcaire potentiellement karstique. C'est notamment le cas du Val d'Orléans qui se trouve à la confluence entre la Loire et le Loiret. Du fait d'une configuration hydrogéologique spécifique, il existe dans cette zone de nombreux conduits souterrains reliant les pertes de la Loire aux sources du Loiret, distantes d'une quinzaine de kilomètres. Ces conduits karstiques passent donc pour la plupart sous les digues de la Loire. Dans le Val d'Orléans, 63 000 personnes habitent dans une zone potentiellement inondable qui s'étend sur près de 40 km de longueur et jusqu'à 7 km de largeur. Elles sont protégées par des digues atteignant 6 mètres de hauteur et datant, pour

certaines, du Moyen Âge. Du fait de leur longue histoire, ces digues ont déjà subi plusieurs ruptures. Ainsi, lors des crues centennales du XIX^e siècle, 35 ruptures de digues ont engendré des inondations catastrophiques du Val d'Orléans. La dernière crue centennale de la Loire datant de 1866, il est toutefois difficile d'apprécier aujourd'hui le comportement de ces digues lors de la prochaine crue majeure et notamment d'estimer le rôle potentiellement aggravant du karst dans le risque de rupture. Ainsi, lors de la récente étude de dangers des levées de Loire, l'aléa « effondrement karstique » a été jugé suffisamment sérieux pour qu'un groupe de travail soit lancé sur ce sujet par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Centre, gestionnaire de l'ensemble des digues de ce fleuve. En effet, les dégâts estimés en cas d'inondation majeure du Val d'Orléans seraient de l'ordre du milliard d'euros.

Références

Gombert P., Orsat J., Mathon D., Alboresha R., Al Heib M., Deck O., 2014. Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le Val d'Orléans (France). *Bull Eng Geol Environ*, DOI 10.1007/s10064-014-0594-8.

Gombert P., Bouzeman M., Al Heib M., Deck O., Alboresha R., Mathon D., 2014. Caractérisation de l'aléa « effondrement karstique » dans le Val d'Orléans (Loiret) et risque d'instabilité des digues de la Loire. 24^e Réunion des Sciences de la Terre, 27 au 31 octobre 2014, Pau.

Figure 1

Exemples de désordres subis par les digues de Loire dans le Val d'Orléans

Crédit photo : DREAL Centre



a Jargeau, 2006



b Sandillon, 2008



The Loire Valley is protected from flooding by « levees » (dikes) constituted by sandy clay materials. They are based on alluvium that may overlay a karstifiable limestone bedrock, as in the Val d'Orléans. This 40 km long and up to 7 km wide area is located in the central part of the Loire valley. More than 580 karstic collapses have been recorded here. Some of them have already damaged road infrastructures, houses and dikes. 35 breaches appeared during major floods in the 19th century, leading to catastrophic floodings. INERIS takes part in a working group devoted to characterization of the karst collapse hazard. Diameter is a relevant criterion for the intensity of this geohazard: most collapses are less than 3 m in diameter but some of them are larger than 10 m. Their probability is not easy to calculate because the date of old collapses is not known precisely. The knowledge of predisposal factors is therefore a best approach: influence of local density of old collapses, thickness and nature of alluvium, distance from the Loire, extremal conditions (frost, snow, heavy rain, flood, low ground water table, etc.). Research is ongoing to characterize the mechanism of karst collapse: roof collapse of a karst void, emptying of a sandy karst cavity, suffosion inside alluvium, etc.

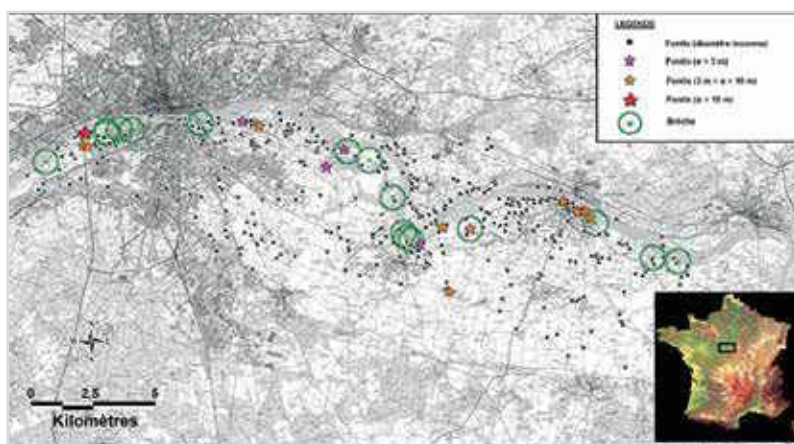
➔ L'INERIS a participé à ce groupe de travail en mettant à jour la base de données existante et en proposant plusieurs mécanismes de formation de fontis karstiques. Le premier travail a permis de recenser 580 fontis, dans le Val d'Orléans. Certains d'entre eux ont déjà créé des dégâts dans les infrastructures routières, les bâtiments de surface et quelques tronçons de digues **Figure 1**. Le second travail a identifié plusieurs mécanismes pouvant expliquer la survenue de fontis d'origine karstique, susceptibles d'affecter significativement une digue : il se base sur une analyse bibliographique montrant que ce phénomène est également signalé à l'étranger (Moyen-Orient, Chine, États-Unis...) dès lors que le substratum karstique est recouvert de quelques mètres de formations à dominante sableuse. Les principales questions qui se posent concernent la quantification de l'intensité et de la probabilité de cet aléa, ainsi que le

rôle aggravant potentiellement joué par le fleuve (notamment lors d'une crue majeure). Sur le plan de l'intensité du phénomène, la majorité des fontis du Val d'Orléans mesure moins de 3 mètres de diamètre en surface mais 11 % d'entre eux dépassent 10 mètres, le maximum avéré étant de 18 mètres (Saint-Pryvé-Saint-Mesmin, 2010) **Figure 2**. En ce qui concerne leur probabilité de survenue, on note – depuis deux siècles – une moyenne de 3 fontis par an avec des années exceptionnelles comme 2013 (16 fontis). Cependant, il semble y avoir une accélération du phénomène depuis une dizaine d'années, avec au moins un fontis par an touchant une digue – la question d'une éventuelle relation avec le changement climatique en cours est d'ailleurs posée. La datation des anciens fontis n'étant pas assez fiable pour pouvoir calculer une véritable probabilité d'occurrence, l'Institut a plutôt cherché à estimer des facteurs de prédisposition à l'aléa « effondrement karstique ». Les facteurs

ainsi mis en évidence sont la densité locale d'anciens effondrements, l'épaisseur et la nature des alluvions, la proximité du tracé de la Loire, ainsi que les conditions hydroclimatiques extrêmes (gel, neige, fortes pluies, crues, étiages...) Cependant, le mécanisme d'effondrement karstique à l'origine de la plupart de ces fontis n'est pas encore connu : rupture du toit d'une cavité karstique, vidange de poches karstiques remplies de sables, suffosion au sein des alluvions (mobilisation de particules limono-argileuses au sein du squelette alluvial sablo-graveleux), etc. Des travaux sont donc en cours pour caractériser ce phénomène, notamment dans le cadre du programme de recherche EREVAN de l'INERIS « Évaluation et réduction de la vulnérabilité des biens exposés aux aléas naturels et miniers » ou au sein du groupe de recherche MeGe « Couplages multiphysique et multi-échelle en mécanique géo-environnementale » dont l'INERIS est membre.

Figure 2

Localisation des fontis et des ruptures de digues dans le Val d'Orléans



LES ÉCHANTILLONNEURS PASSIFS POUR MESURER LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES AU DROIT DES SITES POLLUÉS

Julien MICHEL

En France et d'une manière générale en Europe, les échantillonneurs passifs sont une méthode émergente pour la mesure de la qualité des eaux souterraines dans le contexte des sites et sols pollués. Une enquête menée par l'INERIS auprès des bureaux d'étude français du domaine a montré que ces dispositifs n'étaient pas très utilisés en France à cause d'un manque de tests et de guides de bonnes pratiques à l'échelle nationale.

Dans ce contexte, l'INERIS a testé 5 échantillonneurs passifs (PDB = Polyethylene Diffusion Bags, membranes de dialyse, dosimètres en céramique, modules Gore Sorber et Sorbicells) au cours de plusieurs projets de recherche, sur 3 sites atelier dont les eaux souterraines étaient contaminées par des solvants chlorés. Ces tests consistaient à comparer les concentrations dans les eaux souterraines données par ces dispositifs à celles mesurées dans des échantillons prélevés à l'aide de la technique conventionnelle,

à savoir à l'aide d'une pompe après purge du piézomètre. En particulier, au cours du projet CityChlor, 4 piézomètres à intervalles crépinés courts (1,5 m) ont été spécialement installés à différentes profondeurs (PzF1, F2, F3 et F4). D'une manière générale, les concentrations obtenues avec les échantillonneurs passifs et la technique conventionnelle étaient comparables *Figure 1*.

Ces tests ont montré que les échantillonneurs passifs étaient des outils très prometteurs pour une utilisation dans le cadre de la surveillance des eaux souterraines sur des sites pollués. Très faciles et rapides à mettre en œuvre, ils sont en général moins onéreux que la technique conventionnelle et évitent les contaminations croisées. Ces dispositifs peuvent également fournir des informations complémentaires à la technique de prélèvement conventionnelle puisqu'ils permettent un prélèvement multi-niveau et à un intervalle donné d'un aquifère. Cette propriété est en cours d'évaluation.

Références

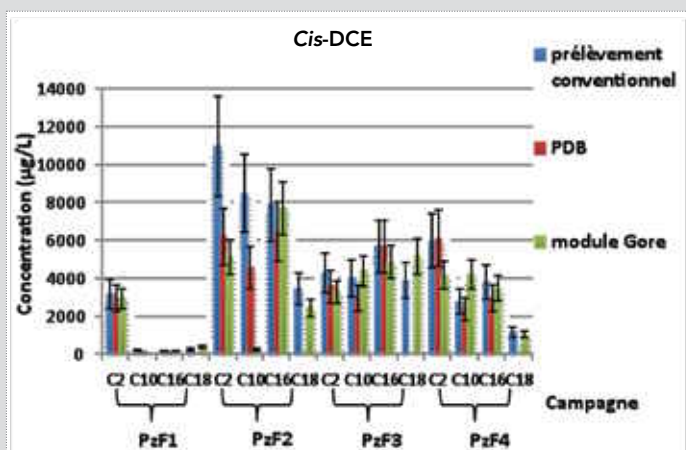
Michel J., Lemoine M., Lucas L., Guillot F., Richez F. *Passive samplers and natural vertical flow measurement as an innovative way of sampling groundwater 12. International UFZ-Deltares conference on Groundwater-Soil-Systems and Water Resource Management (AquaConSoil 2013)*, 16/04/2013 -19/04/2013, Barcelone, Espagne

Michel J. *Passive samplers for groundwater CityChlor final conference*, 16/05/2013 - 17/05/2013, Ghent, Belgique

Michel J., Lemoine M., Rollin C., Masselot G., Molina P., Guillot F., Richez F. *Échantillonneurs passifs : une méthode innovante pour la mesure de la qualité des eaux souterraines. Journées Techniques sur la gestion des sites pollués "Les substances volatiles : caractérisation, modélisation des transferts, surveillance"*, 28/05/2013 - 29/05/2013, Paris, France

Figure 1

Concentrations en *cis*-1,2-dichloroéthylène obtenues par prélèvement conventionnel et par les PDB et modules Gore Sorber, pour les 4 piézomètres et les 4 campagnes réalisées au cours du projet CityChlor



Marion DELPLANQUE Serge COLLET Florence DEL GRATTA

Benoit SCHNURIGER Rodolphe GAUCHER Valérie BERT

COMBUSTION DE SAULES UTILISÉS EN PHYTOEXTRACTION

Références

[1] Bert V, Hadj-Sahrouai A, Leyval C, Fontaine J, Ouvrard S (2012). *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués, état de l'art et guide de mise en œuvre*, Paris : EDP Sciences, ISBN 978-2-7598-0805-2.

[2] Delplanque M, Collet S, Del Gratta F, Schnuriger B, Gaucher R, Robinson B, Bert V (2013). *Combustion of Salix used for phytoextraction: the fate of metals and viability of the processes*, Biomass and bioenergy, 2013, 49: 160-170.

Remerciements :

L'INERIS remercie Voies Navigables de France pour avoir permis d'accéder au terrain de dépôt de sédiment et pour avoir fourni des saules pour les essais. Ces essais ont été financés dans le cadre du projet européen GREENLAND (FP7, KBBE-2010-4, 26124).

La région Nord-Pas-de-Calais est fortement concernée par la problématique des sédiments contaminés notamment par les éléments traces métalliques (ETM). La mise en dépôt, à défaut de filières de valorisation à l'échelle industrielle, est encore le débouché majoritaire. Pour gérer ces pollutions, la phytoextraction, utilisation *in situ* de plantes pour réduire les concentrations de polluants dans les sols [1], est une des options possibles. L'étude rapportée ici utilise la combustion de saules, espèce à croissance rapide d'intérêt pour la phytoextraction et pour la valorisation en bois-énergie [2]. La phytoextraction réduirait l'impact environnemental de ces sédiments tout en permettant une valorisation économique de l'espace immobilisé, via la vente de la biomasse produite dans une filière non alimentaire existante.

Description des essais - Figure 1

Des saules issus d'un taillis à très courte rotation mis en place par Voies Navigables de France ont été échantillonnés *in situ*, sur un terrain de dépôt de sédiment pollué par les ETM. Deux objectifs : diminuer la concentration en cadmium (Cd) du sédiment et produire de la biomasse. Les sédiments ont été collectés au pied des saules pour calculer les facteurs

de bioconcentration. Les concentrations en ETM ont été mesurées dans les feuilles et le bois des saules afin de calculer leurs performances de phytoextraction.

Des essais de combustion ont été réalisés dans la chaudière pilote de l'INERIS (40 kW) sur des saules collectés sur le terrain de dépôt de sédiment pollué, et sur des saules commerciaux, achetés chez un pépiniériste *Figure 1*. Des mesures de concentrations d'ETM ont été réalisées dans les différents produits de la combustion (cendres sous foyer, fractions gazeuse et particulaire des cendres volantes) de façon à étudier la distribution des ETM et à établir des bilans de masse.

Efficacité de la phytoextraction du Cd chez le saule 'Tora' - Tableau 1

La concentration en Cd est plus importante dans les feuilles que dans le bois. Le facteur de bioconcentration (BCF) pour le Cd, ratio entre la concentration de Cd dans les feuilles ou le bois des saules sur la concentration en Cd dans le sédiment, est de 5 quand il est calculé à partir des concentrations foliaires et de 3 quand il est calculé à partir des concentrations du bois. Le saule 'Tora' est donc un arbre phytoextracteur efficace pour

Tableau 1

Efficacité phytoextractrice du Cd pour le saule 'Tora'. Collaboration : Université de Lincoln, Nouvelle-Zélande

	Cd (mg kg ⁻¹ DW)	BCF	Rendement (Mg ha ⁻¹)	Extraction Cd (kg ha ⁻¹ an ⁻¹)	Temps (an)	Cd extrait par coupe (kg ha ⁻¹)	Nombre de coupes	Nombre de TTCR
Scénario 1 (2,39 à 2 mg kg ⁻¹ DW)								
Bois	7,3	3,1	16,8	0,04	62	0,12	21	3
Feuilles	11,8	4,9	1,7	0,02		0,02		
Bois + feuilles				0,006	41	0,14	18	2
Scénario 2 (2,39 à 2 mg kg ⁻¹ DW)								
Bois	13,9	4,4	16,8	0,07	33	0,23	11	2
Feuilles	33,1	10,5	1,7	0,05		0,05		
Bois + feuilles				0,13	19	0,29	9	2
Scénario 3 (3,16 à 2 mg kg ⁻¹ DW)								
Bois	13,9	4,4	16,8	0,07	97	0,23	32	4
Feuilles	33,1	10,5	1,7	0,05		0,6		
Bois + feuilles				0,13	56	0,29	26	4

Scénario 1 : concentrations moyennes en Cd sédiment et parties aériennes des plantes (bois, feuilles, bois et feuilles)

Scénario 2 : concentrations moyennes en Cd sédiment et concentrations maximales en Cd parties aériennes des plantes

Scénario 3 : concentrations maximales en Cd sédiment les parties aériennes des plantes

Les données : concentrations en Cd dans les parties aériennes (mg kg⁻¹ DW = poids sec), BCF ; production de biomasse (Mg ha⁻¹), extraction annuelle de Cd (kg ha⁻¹ an⁻¹) et par coupe (kg ha⁻¹) et temps de dépollution estimé pour atteindre une concentration de 2 mg kg⁻¹ poids sec. Les hypothèses pour les calculs : extraction linéaire, densité de sédiment de 1,3, 8 coupes possibles sur un cycle de 24 ans (Taillis à Très Courte Rotation, TTCR).

Phytoextraction may reduce the environmental risk posed by contaminated sediments while simultaneously providing an economic return via bioenergy production. There is a lack of information on the combustion of metal enriched willows used for phytoextraction. This work aimed at determining the Cd phytoextraction efficiency of Salix on a case study in France and assessing the distribution of metals in the emissions and end products of the combustion process. Three willow clones were cultivated in short rotation coppice (SRC) on a metal contaminated dredged sediment landfill site. Combustion assays were performed in a biomass boiler of 40 kW with a Zn and Cd enriched Salix wood 'Tora' harvested from a part of the SRC and a commercial 'Tora', for comparison. In a best-case scenario, phytoextraction could reduce total Cd concentrations of the sediment from 2.39 to 2 mg kg⁻¹ DW in 19 years. Combustion assays showed that Cd and Zn occurred at the highest concentrations in the particulate fraction of the flue gas (flyash), rather than in the bottom ash. This was also observed for Cd in the flue gas of the commercial 'Tora'. Irrespective of the wood provenance, the use of industrial or collective boilers, equipped with efficient filters, is required to minimize air pollution.

le Cd sur ce terrain de dépôt. L'efficacité de la phytoextraction se mesure par comparaison entre la concentration de Cd résiduelle et le seuil de dépollution souhaité. Plusieurs scénarios ont été considérés pour calculer les rendement d'extraction du Cd. Le temps nécessaire pour réduire la concentration de Cd, de 2,39 mg kg⁻¹ à 2 mg kg⁻¹ dans les 50 premiers cm de sédiment, est de 19 ans dans le meilleur des cas. Ce calcul prend en compte l'exportation du bois et des feuilles. Le temps est estimé à 33 ans dans le cas où seul le bois est exporté. La collecte des saules au printemps, n'étant pas une pratique usuelle, il faudrait vérifier que cette option est techniquement possible et économiquement viable.

Distribution du zinc (Zn) et du Cd dans les produits de combustion du saule 'Tora' - Tableau 2

Les expériences suivaient deux objectifs : comprendre le comportement du Zn et du

Cd lors de la combustion de biomasse et comparer les résultats de ces tests avec des bois commerciaux. La répartition du Zn et du Cd dans les émissions (cendres sous foyer, cendres volantes et gaz de combustion) durant les combustions étudiées montre la même tendance. Elle dépend principalement de la répartition des températures dans le foyer de combustion. La majorité du Cd et du Zn est mesurée dans la fraction particulière des fumées (cendres volantes) ce qui s'explique par la volatilisation du Zn et du Cd à la température du foyer de la chaudière et une condensation de ces métaux sur des particules de faible diamètre [2].

Conclusions et perspectives

Cette étude montre que le temps nécessaire pour dépolluer un sédiment faiblement pollué en Cd n'est pas excessif et peut, dans ce cas, ne pas représenter une contrainte, en particulier si la phytoextraction peut être combinée avec la production d'une biomasse végétale valorisable.

Les études réalisées sur deux types de saules 'Tora', l'un accumulant le Cd, l'autre commercial, présentant une concentration naturelle en ETM, ont montré que dans les deux cas les concentrations les plus élevées en Cd et en Zn étaient mesurées dans la fraction particulière des fumées (cendres volantes). Le gisement actuel issu de phytoextraction est insuffisant pour alimenter en propre des chaudières à biomasse. Si le gisement devenait significatif, l'utilisation de bois, contenant des métaux, issus d'opération de phytoextraction, pourrait être envisagée dans des chaudières industrielles ou collectives équipées de filtres efficaces pour éviter tout transfert de polluant à l'atmosphère.

La question des transferts de polluants se pose pour chaque filière où la biomasse peut être combustible, ou matière première (bio-raffinerie) et pour assurer le développement des phytotechnologies comme ressources de biomasse supplémentaire sur des sols impropres à l'alimentation.

Figure 1

Chaudière pilote (40 kW) et dispositifs de mesure associés utilisés lors des essais de combustion à l'INERIS.

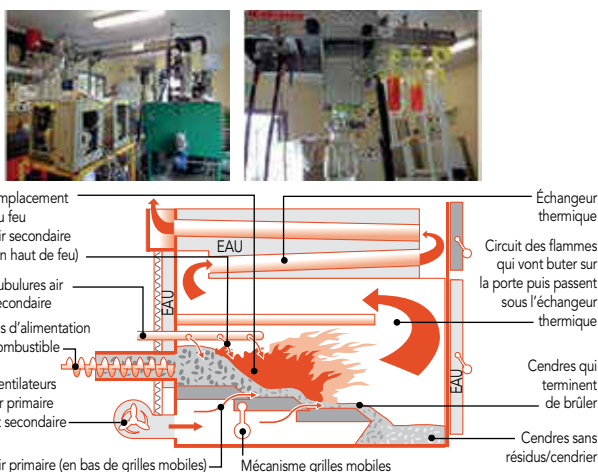


Tableau 2

Concentrations et pourcentage en masse en Cd et Zn dans les cendres sous-foyer et les fumées du bois de saule témoin (« Contrôle » *S. viminalis* 'Tora') et du saule utilisé en phytoextraction (« phytoextraction » *S. viminalis* 'Tora'). [1]

		"contrôle"		"phytoextraction"	
		Concentration (mg kg ⁻¹ poids sec)	%	Concentration (mg kg ⁻¹ poids sec)	%
Cd	Bois	1.4	100	7.3±4.2	100
	Cendres sous-foyer	0.02	1.4	0.06	0.8
	Fumées	1	71	6.3	86
Zn	Bois	38	100	285±94	100
	Cendres sous-foyer	1.5	3.9	15	5.3
	Fumées	50	131	358	126

AIDE AU CHOIX DE SUBSTANCES PRIORITAIRES EN SANTÉ ENVIRONNEMENTALE

Céline BOUDET

Jean-Marc BRIGNON

Guillaume KARR

Martine RAMEL

Anne Christine LE GALL

Laurence ROUIL

Références

[1] Grammont V., Boudet C. Hiérarchisation des substances: Identification des listes existantes de substances prioritaires. INERIS 2009; rapport N° DRC-09-104007-10463A; <http://www.ineris.fr/centredoc/rapport-drc-09-104007-10463a-1352824865.pdf>.

[2] Le Gall AC. Panorama des méthodes d'analyse multicritère comme outils d'aide à la décision. Rapport INERIS N° DRC-09-102861-12257A; <http://www.ineris.fr/centredoc/le-gall-2009-drc-09-102861-12257a-mcda-action-18a-1352824541.pdf>

[3] Karr G., Boudet C., Ramel M. Définition d'une méthode d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes. Application au cas particulier de la préparation du troisième Plan National Santé Environnement. Rapport INERIS ref. DRC-12-125943-04682A.

[4] The REACH baseline study - A tool to monitor the new EU policy on chemicals; REACH (Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of Chemicals). Eurostat, 2009.

Une des priorités du deuxième Plan National Santé-Environnement (PNSE2) est de définir une méthode d'identification et de hiérarchisation des substances toxiques les plus préoccupantes.

La notion même de substance préoccupante revêt un sens différent selon les réglementations, les politiques publiques, les exercices de hiérarchisation existants ou les opinions individuelles.

Différents critères peuvent être mis en avant, par exemple: le danger, le caractère Persistant Bioaccumulable et Toxique (PBT), la protection de populations sensibles et le risque individuel inacceptable.

En termes d'actions publiques, le choix de substances prioritaires s'appuie généralement sur des ordres de substances construits sur la base d'un avis d'experts.

Le processus décrit ici propose de fournir, en complément, des ordres de substances basés sur des points de vue identifiés parmi d'autres acteurs de la décision: groupe de décideurs, représentants d'intérêts divers, personnes issues de la société, etc.

La méthode générale du processus a réuni trois étapes:

(i) une analyse et un recensement des listes de substances prioritaires existantes [1];

(ii) un recensement et une analyse des méthodes multicritères utilisées comme aide à la décision [2];

(iii) l'implication de deux types d'acteurs (des experts scientifiques et techniques, des parties prenantes, réparties en différents collèges: industriels, ONG/associations, élus, État, monde académique et syndicats).

Le processus élaboré par l'INERIS propose d'appliquer ces méthodes dans le cas particulier de la hiérarchisation de substances préoccupantes, pour la première fois.

Résultats

Une application du processus a été réalisée en 2012 [3], pour aider à l'identification des substances prioritaires du futur Plan National Santé-Environnement (PNSE3). L'objectif retenu était de définir les substances préoccupantes dont il faut réduire prioritairement les expositions. Cette application permet d'illustrer chacune des composantes du processus.

Le nombre de substances chimiques présentes sur le marché européen est estimé à

Figure 1

Schéma présentant l'approche double retenue pour le processus d'identification et de hiérarchisation de substances préoccupantes élaboré par l'INERIS

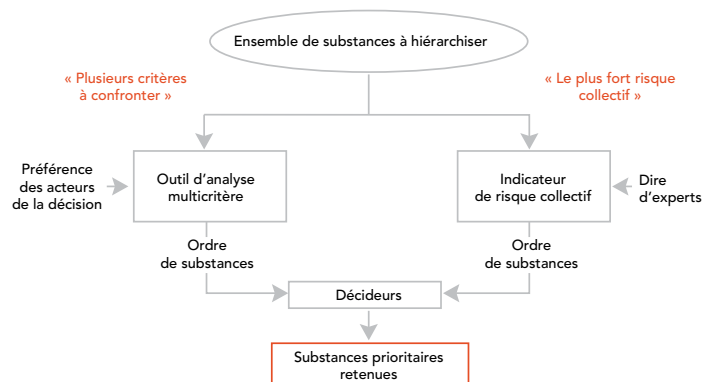


Tableau 1

Deux points de vue multicritères identifiés avec des parties prenantes, lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le PNSE3

Critères	Sélections de poids	
	P1	P2
Sources anthropiques/naturelles	14 %	7 %
Dispersion de l'exposition	3 %	20 %
Enjeu groupe sensible	19 %	4 %
Risque pour l'environnement	8 %	9 %
Risque sanitaire	5 %	2 %
Permanence de l'Imprégnation dans les milieux	5 %	11 %
Danger intrinsèque pour la santé	30 %	30 %
Coût et difficulté technique de la réduction des émissions	16 %	17 %

Identifying and ranking substances of concern is a complex task: the notion of substance of concern has a different meaning depending on regulations, public policies, existing ranking exercises or individual opinions. The choice of priority substances is generally supported by orders of substances constructed on an expert opinion. The process suggests providing, in addition, orders of substances elaborated on the basis of views identified among other people involved in the decision process: groups of decision makers, stakeholders, people from civil society, etc. This process advises using participatory multi-criteria methods. These methods give structure to the participatory approach, they make explicit the underlying logic of each generated order and they can be adapted to the available data. The process can adapt to any type of context and ranking objective. An application conducted in 2012, to support the choice of the priority substances of the future French Environmental Health National Action Plan (PNSE3), illustrate the process.

environ 100000. La première étape a donc consisté à pré-sélectionner un nombre de substances plus limité. Cet univers de substances a été construit sur la base d'une combinaison de listes existantes, définie en fonction de l'objectif de hiérarchisation retenu.

Sur cette base, le processus de hiérarchisation a abouti à fournir aux décideurs plusieurs ordres de substances, correspondant à différents points de vue sur ce qu'est une substance préoccupante devant faire l'objet d'actions prioritaires. Deux axes de travail ont été menés en parallèle **Figure 1** :

1. La réalisation d'une analyse multicritère participative

Un ordre de substances correspond à une logique de décision particulière, un point de vue multicritère. Plusieurs ordres de substances peuvent donc potentiellement être générés.

Dans le cadre de l'exercice du futur PNSE3, la méthode multicritère retenue a été ELECTRE III, basée sur une agrégation par surclassement de synthèse. Les huit critères retenus **Tableau 1** sont issus d'échanges avec les parties prenantes, sur la base d'une

proposition initiale élaborée par des experts de l'INERIS. Deux points de vue multicritères **Tableau 1** ont été identifiés, en utilisant des techniques de révélation des préférences. En première analyse, le point de vue P1 mettrait en avant la notion de population fragile à protéger des pollutions humaines, alors que le point de vue P2 semblerait plutôt mettre en avant l'ampleur de la population exposée, quelle que soit l'origine de la pollution.

2. La construction d'un Indicateur de Risque Collectif (IRC)

Il s'agit ici d'obtenir une liste hiérarchisée, monocritère, fondée sur la notion de risque collectif, basée, ici, sur l'indicateur utilisé par Eurostat pour suivre l'efficacité de la mise en place du règlement REACH [4].

Ainsi, trois ordres ont été élaborés : deux par analyse multicritère et un par calculs d'IRC. En tête de ces ordres se trouvent des substances classiquement considérées comme préoccupantes ⁽¹⁾ et d'autres qui le sont moins ⁽²⁾.

35 substances sont communes aux 100 premiers rangs de ces trois ordres **Tableau 2**.

Discussion et conclusion

Le processus mis en œuvre constitue un mode de gestion de la complexité inhérente à un exercice de hiérarchisation appuyant une décision en matière de santé-environnement : connaissances scientifiques imparfaites, diversité de points de vue, enjeux multiples, etc. Les décideurs disposent d'une part d'une formalisation de plusieurs points de vue qui, dans une certaine mesure, permet d'appréhender la diversité des points de vue pour répondre à l'objectif retenu. D'autre part, des éléments explicites et construits de manière transparente, permettent de justifier des raisons de leurs choix et donc de leur donner plus de cohérence et de robustesse.

Ce processus peut s'adapter à tout type de contexte et d'objectif de hiérarchisation. Il peut donc être entièrement redécliné pour d'autres objectifs que celui du PNSE3, par exemple dans des contextes plus locaux.

⁽¹⁾ Par exemple : mercure, dioxines, benzo(a)pyrene, PolyChloroBiPhényles (PCB), pesticides classiques, benzène, DEHP, formaldéhyde, etc

⁽²⁾ Par exemple : 4,4-méthylènedianiline (MDA); 4-tert-butylphénol; 2-nitrotoluène; sulfite de sodium; diméthoate, etc.

Tableau 2

Substances communes aux 100 premiers rangs des trois ordres obtenus lors de l'exercice de hiérarchisation préparant le PNSE3

Arsenic	Chloroforme	Dichloroéthane	Furannes	PCB
Benzène	Chlorure de vinyle	Dieldrine	Hexachlorobenzène	Plomb
Benzidine	Chrome VI	Dioxines	Hexachlorocyclohexane	Tétrachloroéthylène
Benzo(a)anthracène	DBP	Endosulfan	Isodrine	Tétrachlorure de carbone
Benzo(a)pyrène	DDT	Endrine	Mercure	Toxaphène
Butadiène	DEHP	Epichlorohydrine	Paraffines chlorées à chaîne courte (SCCP)	Trichloroéthylène
Cadmium	(1,2- 1,3- 1,4-) Dichlorobenzènes	Formaldéhyde	Paraffines chlorées à chaîne moyenne (MCCP)	Vinclozoline

ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES À L'ÉCHELLE D'UN TERRITOIRE

Références

[1] Caudeville J., Boudet C., Govaert G. et al. (2011). Construction d'une plate-forme intégrée pour la cartographie de l'exposition des populations aux substances chimiques de l'environnement. *Environnement, risques et santé*. 10(3), 239-242.

[2] Liroy P.J. and Rappaport S.M. 2011. Exposure science and the exposome: An opportunity for coherence in the environmental health sciences. *Environ Health Perspect*. 119(11), 466-467.

[3] Caudeville J., Bonnard R., Boudet C. et al. (2012). Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale. *Journal of Total Environment*. 432, 297-308.

Dor F., Zmirou-Navier D., Boudet C. et al. (2013). The health risk assessment approach, a tool for managing risks on the scale of a territory : a french experience. *Human and Ecological Risk Assessment* 19(6), 1440-1456.

Guide pour la conduite d'une étude de zone, INERIS 2011 : <http://www.ineris.fr/centredoc/drc-guide-etude-zone-v5final101111-1321430999.pdf>

Évaluation des risques sanitaires dans les analyses de zone, HCSP 2011 : <http://www.hcsp.fr/explore.cgi/avisrapportsdomaine?clefr=193>

Évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires - Démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les installations classées, INERIS 2013 : <http://www.ineris.fr/centredoc/drc-guide-ers-2013-v4d-complet-lienscompact-1378197912.pdf>

En France, depuis le début des années 2000, la réglementation demande une analyse des effets directs et indirects des Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) sur la santé des populations riveraines, dans le cadre de l'étude d'impact du dossier de demande d'autorisation d'exploiter. L'INERIS a publié en 2013 un guide décrivant une démarche intégrée combinant l'évaluation des émissions de l'installation, l'évaluation des enjeux et des voies d'exposition, l'évaluation de l'état des milieux, et l'évaluation prospective des risques sanitaires. Cette démarche « monosite » ne considère pas les autres sources d'émissions polluantes présentes aux alentours de l'installation.

Étude de zone

En dehors du cadre réglementaire *stricto sensu*, le risque sur un territoire est souvent lié à un cumul d'expositions provenant de sources et compartiments environnementaux (air, eau, sol) variés voire à un cumul d'expositions mêlant substances toxiques

et agents physiques. C'est pour mettre au point les outils qui permettent de prendre en compte cette multiplicité des sources et compartiments qu'il a fallu développer les études de zone. Déclinée en régions suite au second Plan National Santé-Environnement, une étude de zone est une démarche globale d'évaluation des impacts des activités humaines sur l'état des milieux et des (sur) expositions et risques sanitaires inhérents pour les populations. Il s'agit d'un instrument d'appui à la gestion destiné à identifier et à hiérarchiser des actions sans se restreindre à une source, pour prendre en charge et maîtriser les risques ou impacts. Bien que conçue à l'origine pour évaluer l'impact cumulé de plusieurs exploitants industriels proches, la méthodologie des études de zone n'est pas limitée aux seules installations classées mais peut aussi prendre en compte les infrastructures routières ou portuaires, et d'autres sources de pollution. Elle peut constituer l'un des éléments d'une analyse plus globale, qui prend en compte d'autres composantes du territoire étudié : économiques, sociales,

Figure 1

Exemple de représentation des résultats d'une évaluation des risques sanitaires adaptée aux spécificités des sous-populations de la zone d'étude



In France, regulatory analysis of the environment and potential consequences for human health is implemented for an isolated industrial activity that requests an authorization to operate using the health risk assessment method. Outside the regulatory process, the question is enlarged to the impact of the combination of multiple sources of pollution on the same territory. The main conclusions of the work launched by the French High Council of Public Health focus on four key points: (i) the utility of conducting such an analysis at a territory scale, (ii) the delimitation of the area, (iii) the conditions for the different stakeholders' involvement, and (iv) the methodological specificities of the "zone health risk assessment". INERIS was most specifically involved on the last key point, using the pragmatic approach provided in its guide for conducting a zone assessment. Initial results of a research program aiming at developing and applying integrated exposure tools onto Geographic Information Systems so that future zone assessments can be as close as possible to the reality of cumulative exposure were also used. Indeed, among methodological specificities, cumulative environmental exposure comes first, with the necessity in the near future of developing multidisciplinary approaches that combine different fields of expertise (emissions characterization, dispersion models, "space-time-activity" behaviors, toxicology and epidemiology) following the exposome concept.

sanitaires, etc. L'INERIS a contribué aux premières études de zone et a publié en 2012 un guide méthodologique dédié.

En parallèle, l'Institut a été impliqué dès 2010 dans les travaux lancés par le Haut Conseil de la santé publique sur le sujet. Ces derniers se sont basés sur une revue de la littérature, des séminaires, et des interviews des principaux acteurs. Les principales conclusions publiées en 2013 mettent l'accent sur quatre points clés :

(i) **L'utilité de procéder à une telle analyse à l'échelle du territoire.** L'étude de zone doit être au cœur du processus de gestion des risques mis en œuvre sur un territoire et être suffisamment flexible et adaptable aux spécificités de la zone.

(ii) **La délimitation de la zone** doit intégrer les aspects économique, politique, environnemental, et populationnel.

(iii) **Les conditions de la participation** des différentes parties prenantes, qui sont des

acteurs clés des comités de suivi de l'étude et de surveillance des actions mises en œuvre. (iv) **Les spécificités méthodologiques** de la conduite d'une évaluation du risque sanitaire sur l'ensemble d'une zone.

L'INERIS a été plus particulièrement impliqué sur ce dernier point clé, sur la base de l'approche pragmatique développée dans son guide et structurée en cinq phases : (1) état des lieux, schéma conceptuel des expositions, (2) modélisation de la dispersion atmosphérique et des transferts, (3) diagnostic de l'état des milieux, (4) analyse de l'état actuel de l'environnement et, le cas échéant, (5) évaluation quantitative des risques sanitaires.

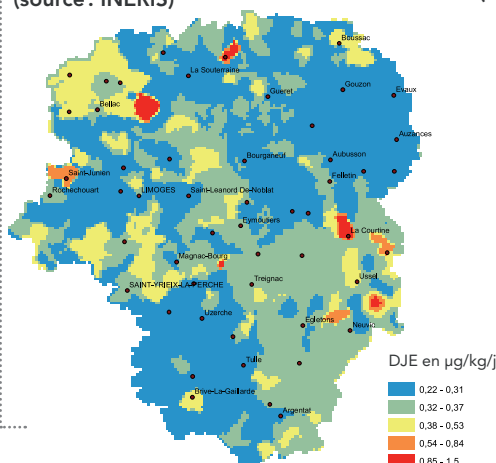
Perspectives

Les premiers résultats d'un programme de recherche visant à superposer modélisation de l'exposition et techniques de spatialisation pour fournir des indicateurs

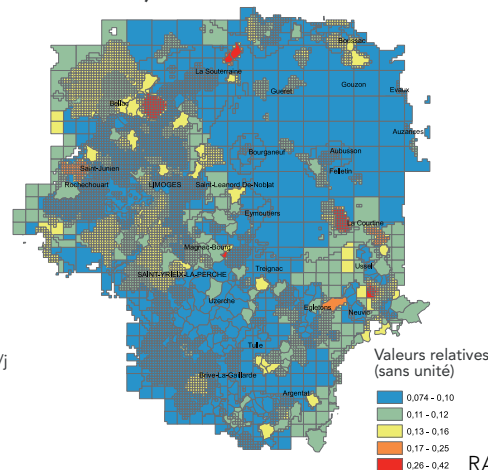
intégrés plus proches de la réalité des expositions cumulées par les populations sur un territoire ont également été utilisés [1]. En effet, parmi les spécificités méthodologiques relevées dans l'article, l'exposition environnementale cumulative vient en premier, avec la nécessité dans un avenir proche de développer des approches multidisciplinaires qui combinent différents domaines d'expertise (caractérisation des émissions, les modèles de dispersion, les comportements « espace-temps-activité », de la toxicologie et de l'épidémiologie), déclinant ainsi le concept d'exposome [2]. Les travaux de recherche se poursuivent depuis à l'Institut, et sont passés d'une logique « points noirs environnementaux - étude de zone » à une logique d'intégration spatiale des approches de l'exposition multisource et multimilieu, dans le cadre de l'évaluation des inégalités environnementales [3].

Figure 2

Exemple de carte de dose journalière d'exposition au plomb dans le Limousin (source : INERIS)



Exemple d'indicateur spatialisé d'exposition pour le plomb dans le Limousin (source : INERIS)



QUANTIFICATION DES RELATIONS SPATIALES ENTRE DONNÉES ENVIRONNEMENTALES, SOCIO-ÉCONOMIQUES ET SANITAIRES À DIFFÉRENTS NIVEAUX GÉOGRAPHIQUES

Mahdi-Salim SAIB
Julien CAUDEVILLE

Références

[1] *Environmental health inequalities in Europe*. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe, 2012.

[2] Besse G., Caudeville J., Michelot F. et al. *Inégalités territoriales, environnementales et sociales en santé. Regards croisés en régions: de l'observation à l'action. Rapport: ministère des Affaires sociales et de la Santé, ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie*, 2014, 68p.

[3] Saib M.S., Caudeville J., Carre F., Ganry O., Trugeon A., Cicolella A., *Spatial relationship quantification between environmental, socioeconomic and health data at different geographic levels*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11 (4) p. 3765-3786

[4] Caudeville J., Bonnard R., Boudet C., Denys S., Govaert G., Cicolella A. *Development of a spatial stochastic multimedia model to assess population exposure at a regional scale*. *Journal of Total Environment* 2012 Volume 432, Pages 297-308.

[5] Rey G., Jouglu E., Fouillet A., Hémond D. *Ecological association between a deprivation index and mortality in France over the period 1997 - 2001: variations with spatial scale, degree of urbanicity, age, gender and cause of death*. *BMC Public Health* 2009, 9:33.

[6] Goovaerts P. (2006) *Geostatistical analysis of disease data: accounting for spatial support and population density in the isopleth mapping of cancer mortality risk using area-to-point Poisson kriging*. *Int J Health Geogr* 5(52).

[7] Briant A., Combes PP., Lafourcade M. *Dots to boxes: do the size and shape of spatial units jeopardize economic geography estimations?* *Journal of Urban Economics* 2010, 67:287-302.

Le rapport récent de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), relatif aux inégalités en santé environnementale en Europe [1], indique que les groupes socio-économiquement défavorisés sont souvent à la fois potentiellement surexposés aux nuisances et pollutions environnementales et plus vulnérables aux effets sanitaires qui en résultent. En conséquence, réduire les inégalités de santé implique l'identification et la caractérisation des facteurs sociaux et des facteurs d'exposition, afin d'interpréter la façon dont ils se cumulent sur un territoire dans l'objectif d'identifier et de hiérarchiser les interventions. La construction de méthodes permettant la caractérisation des inégalités territoriales environnementales et sociales de santé (ITESS) est un pré-requis utile à la mise en œuvre d'actions de santé publique, visant à la protection des populations [2]. Ce point est d'ailleurs un axe prioritaire des différents Plans Nationaux Santé-Environnement (PNSE). Néanmoins la

robustesse et l'opérationnalité d'approches de croisement posent un certain nombre de questions scientifiques et requièrent des développements, objets des travaux rapportés ci-après [3].

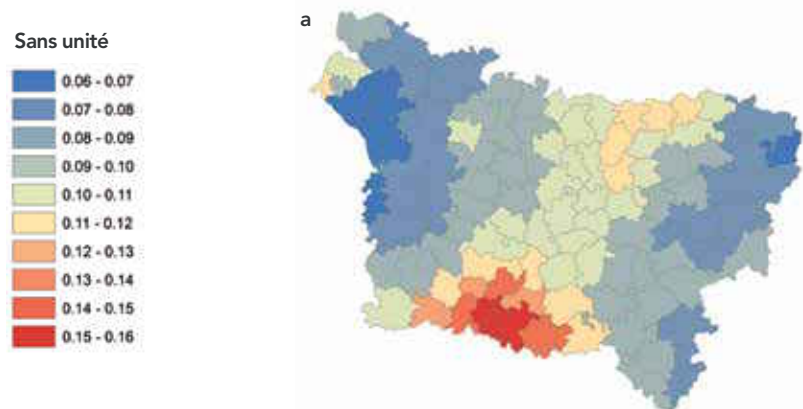
Il s'agit d'explorer, sur le territoire limité d'une région (la région Picardie) les techniques de croisement d'indicateurs spatialisés pour adapter et calibrer des méthodes de cumul et de caractérisation des ITESS intégrant les spécificités statistiques liées à la manipulation de données spatiales.

Cet objectif nécessite :

- (i) le traitement et la construction d'indicateurs environnementaux, socio-économiques et sanitaires pertinents et adaptés aux objectifs et aux échelles spatio-temporelles d'analyse ;
- (ii) de caractériser et d'intégrer les phénomènes spatiaux associés à l'utilisation des indicateurs dans les procédures de croisement ou de cumul des inégalités.

Figure 1

Cartes de l'indicateur d'exposition aux éléments traces métalliques par inhalation agrégé : (a) au canton, (b) sur la maille (8 km de côté), (c) à l'IRIS (région Picardie)



Spatial health inequalities have often been analyzed in terms of socioeconomic and environmental factors. The present study aimed to evaluate spatial relationships between spatial data collected at different spatial scales. The approach was illustrated using health outcomes (mortality attributable to cancer) initially aggregated to the county level, district socioeconomic covariates, and exposure data modeled on a regular grid. Geographically weighted regression (GWR) was used to quantify spatial relationships. This approach requires continuous exploratory analysis to assess the role of the modifiable areal unit problem (MAUP) and downscaling the health data on the study of the relationship, which will allow decision-makers to develop interventions where they are most needed.

Exploitation de bases de données géoréférencées

L'exposition aux polluants de la famille des éléments traces métalliques (Cd, Cr, Ni, Pb) est caractérisée pour les voies d'inhalation *Figure 1* et d'ingestion par une approche multimédia. La construction de ces indicateurs a été réalisée dans le cadre du développement de la Plate-forme d'analyse des inégalités environnementales (PLAINE) [4].

L'indice de défaveur sociale (FDep), développé dans le contexte français [5], a été reconstruit à l'échelle des îlots regroupés pour l'information statistique (IRIS) à partir des données de recensement de la population de 2008 (Insee) et des revenus fiscaux des ménages de 2008 (Insee-DGI). Quatre variables ont été utilisées : le pourcentage d'ouvriers dans la population active, le pourcentage de bacheliers chez les 15 ans et plus, le pourcentage de chômeurs dans la population active et le revenu médian par foyer.

La mortalité par cancer a pu être renseignée par canton à partir des données du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès de l'Inserm, pour la période 2000-2009, standardisée sur l'âge des populations et lissée à partir de méthodes géostatistiques (« poisson kriging »).

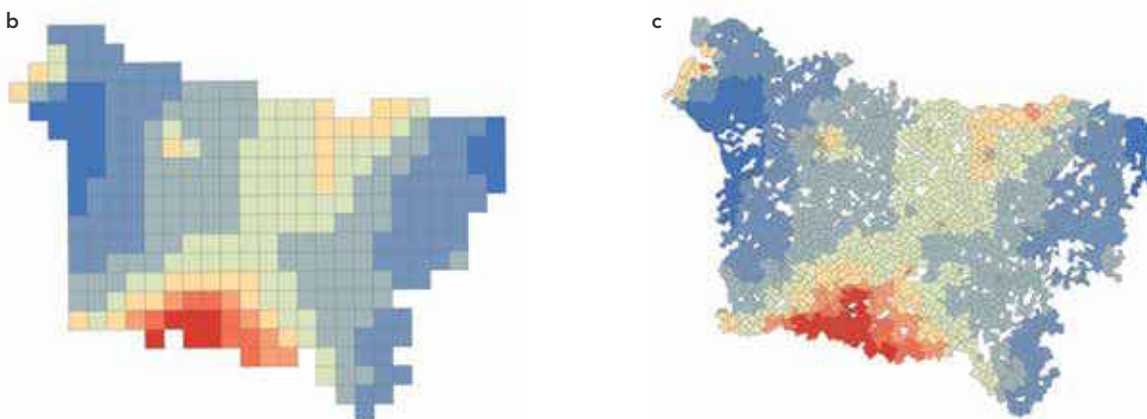
Des techniques d'analyse spatiale sont mobilisées pour traiter les bases de données d'entrée et les rendre pertinentes au regard des objectifs. L'impact de l'échelle spatiale sur l'analyse de corrélations a été estimé à partir de régressions géographiques pondérées sur 3 niveaux géographiques : l'IRIS, une maille de 8 km de côté et le canton *Figure 1*.

L'approche nécessite la construction de l'ensemble des indicateurs sur les supports géographiques communs [6] (canton, maillage ou IRIS). Le problème des unités géographiques modifiables [7] (MAUP) lié à l'utilisation d'indicateurs construits initialement sur des niveaux d'agrégation différents entraîne des biais d'analyse. La désagrégation des données

de mortalité par cancer sur des échelles plus fines (IRIS) génère des incertitudes supplémentaires en particulier quand on ne prend pas en compte d'informations secondaires pour guider cette opération. À l'inverse, l'agrégation sur des échelles plus grossières (canton) lisse les hétérogénéités locales et entraîne une diminution de la sensibilité de la méthode. Le choix d'une échelle spatiale d'analyse dépend à la fois de la sensibilité des relations étudiées et de l'hétérogénéité spatiale des variables de prédiction.

Perspectives

Les résultats obtenus permettront de calibrer les paramètres de modélisation pour construire des indicateurs des ITESS intégrant l'autocorrélation et l'hétérogénéité spatiale des variables. La construction de tels indicateurs à partir de méthodes de combinaison des différentes variables peut permettre l'identification de zones de cumul des inégalités où orienter des politiques de gestion.





Guillaume
SIOUR

Augustin
COLETTE

INTERACTION D'ÉCHELLES DANS LES MODÈLES DE CHIMIE-TRANSPORT POUR MIEUX CONNAÎTRE L'IMPACT DES GRANDES VILLES SUR LEUR ENVIRONNEMENT

Références

Siour G., Colette A., Menut L., Bessagnet B., Coll I., Meleux F. Bridging the scales in a eulerian air quality model to assess megacity export of pollution *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46 : p. 271-282

Siour G., Thèse de doctorat Modélisation et évaluation de l'impact multi-échelles des mégapoles européennes, Univ. Paris Est Créteil, 2012

Outre leur impact direct sur la santé de leurs habitants, les mégapoles contribuent significativement à la pollution de fond influençant des domaines géographiques allant bien au-delà (le continent par exemple). Dans le cadre d'une campagne effectuée au Mexique il a été démontré que dans un rayon de 100 km autour de la ville de Mexico, les concentrations de NO₂ et de CO₂ proviennent à 50 % des émissions de la ville elle-même. Afin de déterminer si l'on peut s'attendre à des chiffres équivalents en Europe, deux nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées au modèle de chimie-transport CHIMERE co-développé par le CNRS et l'INERIS. L'une est dédiée à l'estimation du flux de matière exportée autour d'une zone donnée. L'autre implique une modification du maillage du modèle afin de pouvoir effectuer un zoom

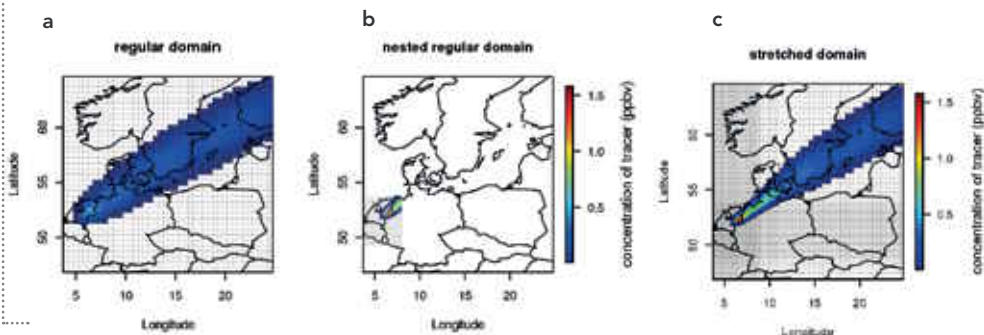
sur une région donnée de manière couplée, alors que l'utilisation classique de domaines imbriqués ne permet pas de rétroaction de la fine échelle vers le grand domaine.

Intégration de deux nouveaux modules

Résoudre les équations de la chimie et du transport atmosphérique sur une grille zoomée dans le modèle permet une représentation plus précise des conditions dans lesquelles les processus pilotant la formation des photo-oxydants ont lieu (dans et autour du domaine finement résolu). De plus, une meilleure résolution limite la diffusion numérique et permet de mieux définir l'intensité et la taille des panaches sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.

Figure 1

La nouvelle grille de simulation « zoomée » (a) pour le modèle de chimie-transport CHIMERE permet de raffiner le maillage sur une zone donnée (ici le sud-ouest du domaine), tout en préservant la possibilité d'étudier l'impact de cette zone sur son environnement à plus grande échelle, contrairement à la technique d'imbrication de domaines qui préexistait (b) tout en améliorant la représentation du panache par rapport à un modèle peu résolu (c).



In Chemistry Transport Models (CTMs), spatial scale interactions are often represented through off-line coupling between large and small scale models. However, such nested configurations cannot give account of the impact of the local scale on its surroundings. This issue can be critical in areas exposed to regions with sharp pollutant emission gradients such as megacities. We introduced a new development making use of a horizontal stretched grid, in the Eulerian CTM CHIMERE. This method, referred to as “zooming”, consists in the introduction of local zooms in a single chemistry-transport simulation. It allows online bridging of spatial scales from the city to the continental scale. Testing the approach over a continental European domain, zoomed over Benelux, we demonstrate that, compared with one-way nesting, the zooming method allows the representation of a significant feedback of the refined domain towards the large scale showing that this approach constitutes a useful tool to understand the interactions of megacities with their continental environment.

L'efficacité de la grille de modélisation zoomée a été démontrée dans le cadre des travaux menés dans les projets européens CITYZEN et MEGAPOLI (FP7). L'implémentation de cette technique a également permis de définir plus précisément le rayon d'impact d'une mégapole en décrivant mieux les concentrations d'ozone et de NO₂ alentour.

Un module novateur de calcul des flux de polluants échangés entre les différentes zones du domaine géographique ciblé a aussi été développé et validé. L'avantage des travaux réalisés, par rapport à d'autres études, est de pouvoir prendre en compte les processus de production d'espèces chimiques secondaires dans le système d'échange des flux, en parallèle des processus classiques d'émissions et de dépôt.

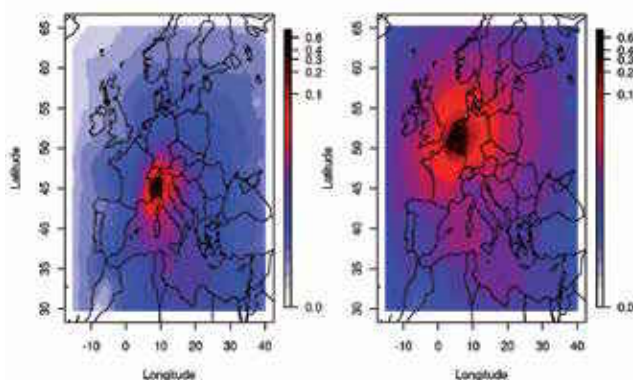
Résultats

L'étude s'est focalisée sur deux zones européennes particulièrement sensibles du point de vue de la pollution de l'air : le Benelux et la vallée du Pô. Le bilan des mégapoles est fortement en faveur de l'export de polluants primaires (tels que le NO₂ ou les particules de type PM₁₀ d'origine anthropique). Le bilan est plus complexe pour les polluants secondaires. Le Benelux exporte une grande quantité d'ozone et peut donc contribuer de façon directe à augmenter les niveaux de fond dans la région environnante. Par contre dans la vallée du Pô, à cause de mécanismes de recirculation dans cette région où les conditions atmosphériques stagnantes sont importantes, le bilan peut être en faveur de l'import.

Ce résultat est en effet confirmé par l'estimation du rayon d'impact des mégapoles, réalisée sur des simulations de dix années consécutives, et sur les mêmes deux zones géographiques. Ainsi il a été démontré que les émissions primaires de la vallée du Pô avaient tendance à rester confinées dans un rayon moyen de 200 km, contrairement aux émissions de la région du Benelux qui peuvent être transportées sur une plus large surface (au-delà de 500 km). De même, si leur zone d'influence est fortement dépendante des courants atmosphériques prédominants, les calculs montrent que la configuration régionale joue un rôle clé à l'échelle continentale : ainsi, alors que les émissions anthropiques de la région du Benelux sont majoritairement exportées vers l'Est, l'export des émissions de la vallée du Pô ne montre pas de voie préférentielle.

Figure 2

Zone d'influence des polluants primaires émis en vallée du Pô (gauche) et dans le Benelux (droite).





**Bertrand
BESSAGNET**

IMPACT DES INCENDIES DE FORÊTS RUSSES D'AOÛT 2010 SUR LA QUALITÉ DE L'AIR ET LES PROPRIÉTÉS DE L'ATMOSPHÈRE

Références

[1] Turquety S., Menut L., Bessagnet B., Anav A., Viovy N., Maignan F., et Wooster M., APIFLAME V1.0, high resolution fire emission model and application to the Euro-Mediterranean region, 2014, *Geoscientific Model Development*, 7, pp 587-612

[2] Péré J.-C., Bessagnet B., Mallet M., Vaquet F., Chiapello I., Minvielle F., Pont V. et Menut L., Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010, 2014, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14 (4): p. 1999-2013

L'impact des feux de forêts et des feux de biomasses de grande échelle sur la qualité de l'air est bien reconnu. Ils constituent une source importante de composés chimiques gazeux et particulaires susceptibles d'affecter non seulement la qualité de l'air mais aussi les propriétés chimiques de l'atmosphère, et donc plus globalement sa température et sa dynamique. Ces polluants sont des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4) mais aussi des oxydes d'azote (NO_x), des composés organiques volatils (COV) et surtout des particules (PM). Selon sa composition (qui dépend de la nature des végétaux brûlés, de l'intensité du feu...) le panache issu de ces feux affecte la qualité de l'air dans les territoires environnants et parfois à très grande distance (plusieurs milliers de kilomètres) en élevant les niveaux de pollution particulaire ou en contribuant à la formation de polluants secondaires tels que l'ozone ou certaines particules.

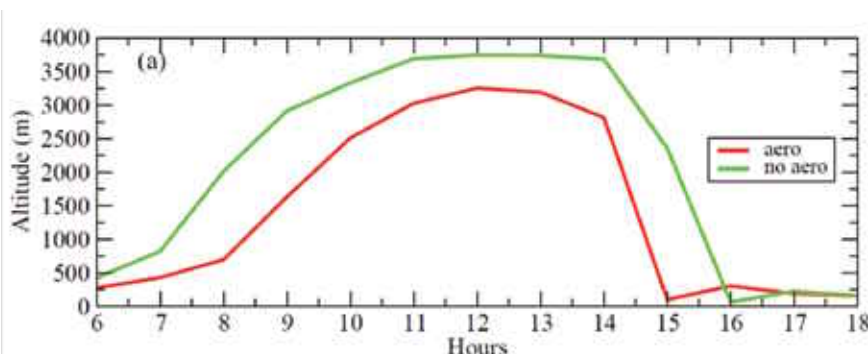
Qualité de l'air

Ces phénomènes sont assez largement étudiés depuis plusieurs années (les incendies au Portugal de 2003 constituent une excellente base de références) et continuent de faire

l'objet de l'attention particulière des chercheurs et modélisateurs de la qualité de l'air. En effet, ils disposent désormais de nouveaux moyens d'observations, les satellites, qui permettent d'accéder à une évaluation des émissions, et de leur évolution spatio-temporelle. L'influence de ces panaches d'incendies sur la qualité de l'air peut être telle que cette connaissance est indispensable pour bien prédire les épisodes de pollution particulaire. Ainsi, afin d'améliorer les performances du système PREV'AIR, l'INERIS s'est investi dans le projet APIFLAME, financé par le programme PRIMEQUAL⁽¹⁾, et coordonné le Laboratoire de météorologie dynamique de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL). Dans ce projet, l'observation satellite (MODIS) des surfaces brûlées et des incendies a permis de reconstruire un inventaire d'émissions et d'intégrer cette nouvelle source dans le modèle de chimie-transport CHIMERE que l'INERIS co-développe avec l'IPSL, et qui est mis en œuvre dans le système national de prévision de la qualité de l'air PREV'AIR (www.prevoir.org). Ces résultats sont détaillés dans Turquety et al. (2014) [1]. L'INERIS poursuit ses travaux sur le sujet, en utilisant notamment les

Figure 1

Évolution de la hauteur de la couche limite atmosphérique simulée avec (en rouge) et sans (en vert) prendre en compte la présence d'aérosols générés par les incendies à Moscou le 8 août 2010 (Source : Péré et al., 2014)



During mid-July to mid-August 2010, the western part of Russia was affected by a strong heatwave episode favourable to the development of numerous wildfires. When analysing the Russian meteorological situation, particularly the time series of temperature we became convinced that the huge PM concentrations were responsible for an attenuation of the maximum temperature in Moscow. The research performed with the LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique) showed a strong impact of particulate matter concentrations on the meteorology with a reduction of the solar radiations close to the ground and then a stabilization of the atmosphere and lower temperatures. The feedback on meteorology increased the PM concentrations in the low troposphere.

produits nouvellement proposés par le projet MACC-II du programme européen Copernicus de surveillance de l'environnement : des prévisions quotidiennes et mondiales d'émissions de feux (http://www.gmes-atmosphere.eu/about/project_structure/input_data/d_fire/).

Influence sur le climat

Mais les émissions de feux de forêts de grande ampleur peuvent également affecter les propriétés intrinsèques de l'atmosphère, et ainsi influencer le climat, soit directement par l'émission de gaz à effet de serre et des aérosols, soit indirectement en agissant sur les propriétés microphysiques des nuages. En interagissant avec le rayonnement solaire, les particules modifient l'équilibre radiatif de la Terre. Leur impact radiatif varie selon leur nature, et peut être à l'origine d'évolutions significatives sur les précipitations, la température, et la dynamique de l'atmosphère. C'est ce que l'INERIS

a investigué à une échelle plus locale dans une étude ciblée sur les importants incendies de forêt qui ont ravagé une part de la Russie occidentale durant l'été 2010. Ils furent à l'origine de niveaux de particules extrêmement élevés dans ces régions (plusieurs centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais dans ce cas l'Institut s'est plutôt intéressé à la modélisation des propriétés optiques et chimiques des aérosols et à leur effet sur le climat régional (température, et dynamique atmosphérique). Ce travail, réalisé en collaboration avec le Laboratoire d'optique atmosphérique, est basé sur un couplage du modèle CHIMERE avec le modèle météorologique WRF ^[2]. Les simulations d'aérosols et de leurs propriétés optiques ont été évaluées en 3D à l'aide des observations satellites disponibles (POLDER et lidar CALIOP embarqué). Elles montrent une réduction significative du rayonnement solaire (jusqu'à 80-150 W/m^2) dans les zones sous influence du panache des incendies en Europe de l'Est, et une réduction de la température

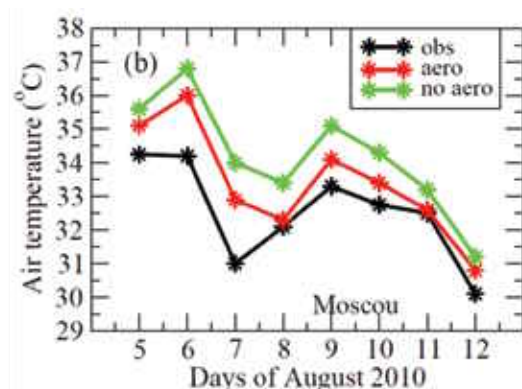
de 0,6 à 2,6 °C à la surface du sol. Le gradient thermique a donc été affecté, ce qui a conduit à stabiliser l'atmosphère, réduire la couche limite atmosphérique (de 13 à 65 %) et donc à favoriser le piégeage des particules près du sol *Figure 1*, et augmenter ainsi significativement leurs concentrations de +9 à +100 % sur les concentrations en PM_{10} début août 2010 *[2]*. Cette réduction du rayonnement solaire incident diminue ainsi la température dans les basses couches de l'atmosphère *Figure 2*; ce couplage permet d'obtenir des simulations de température plus proches des observations. Comprendre et bien simuler l'influence des sources sur la dynamique atmosphérique s'avère indispensable pour bien prédire la qualité de l'air.

^[1] Programme de recherche inter-organismes pour une meilleure qualité de l'air, financé par le ministère en charge de l'écologie et l'ADEME.

^[2] Weather Research and Forecasting Model du National Center for Atmospheric Research (US)

Figure 2

Impact de la présence des aérosols sur la température de surface à Moscou entre le 5 et 12 août 2010. Comparaison de simulations avec et sans impact des aérosols sur le bilan radiatif (respectivement « aero » et « no aero » sur le graphe) comparées aux observations. (Source : Péré et al., 2014)





René DE SEZE	Brahim SELMAOUI
Gyorgy THUROCY	Rania GHOSN

EFFETS THERMIQUES LOCAUX POTENTIALISÉS PAR LES ONDES RADIOFRÉQUENCES

Références

- [1] Elabbassi E.B. and De Seze R. "Mobile Phone Use and Temporal Skin Heat Sensation" The 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields 4-8 October, 2004, Kos Greece. Proceeding of the Workshop Volume I, pp 543-548.
- [2] Straume A., Oftedal G. and Johnsson A. Skin temperature increase caused by mobile phone: a methodological infrared camera study. *Bioelectromagnetics*. 26:510-519, 2005.
- [3] Anderson V. and Rowley J. Measurements of skin surface temperature during mobile phone use. *Bioelectromagnetics*. 28:159-162, 2007.
- [4] Monfrecola G., Moffa G. and Procaccini E.M. Non-ionizing electromagnetic radiations, emitted by a cellular phone, modify cutaneous blood flow. *Dermatology*. 207(1):3-5, 2003.

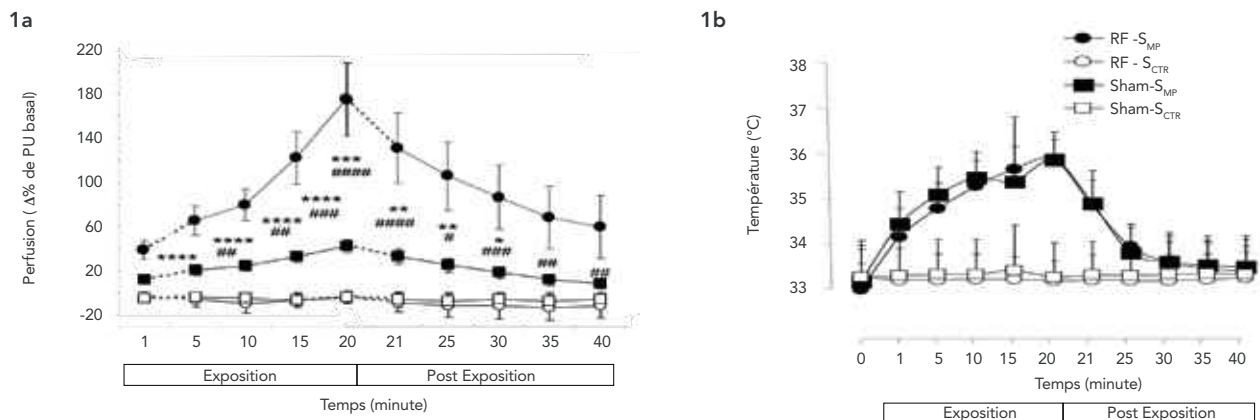
Quelques études ont montré que la chaleur dégagée par un téléphone portable en fonctionnement produit un échauffement cutané [1-3]. Monfrecola et al (2003) ont mis en évidence une modification du débit de la microvascularisation cutanée (« flux cutané ») par un téléphone mobile au contact de la joue [4]. Cette étude ne comportant ni groupe témoin, ni contrôle de la température ambiante, cette observation est difficile à interpréter, car la température ambiante peut affecter la température cutanée, et de ce fait le flux cutané.

La nouvelle étude vise à vérifier et approfondir ce travail en contrôlant l'ambiance thermique et en disposant d'un groupe contrôle vis-à-vis de l'exposition (« exposition sham ») versus exposition RF réelle (« exposition RF »). Il sera ainsi possible de savoir si les variations de flux observées sont dues à l'échauffement produit par le téléphone, ou si ces effets pourraient être spécifiques des ondes RF. Pour le démontrer, les variations de flux cutané et la température doivent être enregistrées en même temps et au même endroit. Nous avons également étudié la réactivité vasculaire des microvaisseaux cutanés lors de l'utilisation d'un téléphone portable, à l'aide d'un test de provocation thermique.

Pour réaliser cette étude, 21 jeunes adultes volontaires sains (13 femmes, 8 hommes, moyenne d'âge: 25 ± 1 ans) ont été soumis à deux sessions randomisées en double-aveugle, réalisées avec 2 téléphones portables identiques (Type Nokia 6650, bande GSM: 900 MHz, DAS max pour 10 g de tissu: 0,49 W/kg): une session (dite « réelle RF ») avec émission d'ondes RF et une autre (dite « sham ») sans émission d'ondes. Dans les deux sessions, le téléphone produit de la chaleur dissipée par ses composants électroniques. Dans la session sham, une charge résistive de 50 ohms a été placée sur le connecteur d'antenne distante (de voiture) du téléphone. Deux sondes thermo-LD (diamètre: 10 mm, épaisseur: 8 mm) ont été placées sur le visage en regard du lobe de l'oreille: une du même côté que le téléphone (ipsi-latérale) (side of mobile phone: S-MP), l'autre du côté opposé, constituant un côté contrôle (S-Ctr). Le flux cutané (exprimé en unités de perfusion, PU; valeur arbitraire de flux cutané) et la température ont été mesurés 5 minutes avant les sessions d'exposition pour définir le flux cutané basal, puis pendant une durée de 20 minutes pendant et après l'exposition (40 minutes au total). Le flux et la température cutanée ont été enregistrés en continu par

Figure 1a et Figure 1b

La significativité statistique des comparaisons entre le côté du visage exposé au téléphone (S-MP) et le côté non exposé (S-Ctr) est illustrée par *P <.05; **P <.01; *** P <.001 et **** P <.0001; et entre l'exposition réelle RF et l'exposition sham (côté S-MP) par #P <.05; ## P <.01 ; ###P <.001 et ####P <.0001



In this study, variations in skin micro blood flow and skin temperature were simultaneously recorded in 21 adults with a thermostatic laser Doppler system during radiofrequency (RF) and "sham" mobile phone exposure for 20 minutes. On the control side of the face (non exposed side), the sham and radiofrequency exposure sessions gave rise to similar response profiles for the mean skin blood flow and mean skin temperature values. During radiofrequency exposure, skin blood flow on the exposed side was greater during radiofrequency exposure than during sham exposure. No difference was observed for skin temperature between RF exposed and sham groups. Heating test: the early peak value for skin blood flow (i.e. the raw data after 1 minute of heating at 44 °C) on the exposed side of face was significantly greater after the radiofrequency exposure session than after the sham exposure session. As positive controls, on the contra lateral (non-exposed) side, no difference was found between radiofrequency and sham exposure sessions. These findings show the existence of a vasodilatory effect on skin perfusion of mobile phone radiofrequency emission, which was not due to a temperature difference.

un laser Doppler thermostatique (LD), à une longueur d'onde de 780 nm spécifique de la microcirculation cutanée.

Un test de provocation thermique consistant à chauffer la peau localement sous la sonde pendant 1 minute à 44 °C, a été réalisé à la 25^e minute post-exposition afin de déterminer la réserve vasodilatatrice des micro-vaisseaux cutanés.

Les tests statistiques ont comparé la température et le microdébit sanguin cutané entre les deux côtés du visage (côté exposé versus côté non exposé) et entre les deux sessions d'exposition (RF versus Sham). Les résultats sont présentés sous forme de valeurs moyennes ± déviation standard (DS); la significativité statistique étant définie par $P < 0,05$.

Flux cutané

Au cours de la session d'exposition réelle RF, l'augmentation de flux cutané (côté S-MP), croissante avec la durée d'exposition, est nettement plus importante que l'élévation de flux cutané pendant l'exposition sham **Figure 1a**. Cette différence est observée

alors que les courbes de température sont identiques tout au long de l'exposition, qu'elle soit réelle ou sham **Figure 1b**. Cela indique que l'échauffement de la peau produit par les composants électroniques du téléphone portable est identique entre les deux sessions d'exposition. Il semble donc que l'élévation du flux cutané soit un effet spécifique des ondes RF.

Hyperémie réactive

La variation de flux cutané pendant le test de provocation thermique, (flux max/flux basal, en %) est une réponse vasculaire appelée « hyperémie réactive ». Le flux cutané du côté du téléphone est plus élevé pendant la session d'exposition RF que pendant la session sham, le côté non exposé du visage ne montrant aucune différence entre les deux sessions **Figure 2**. Les micro-vaisseaux cutanés soumis à une exposition RF de téléphone portable ont donc une plus grande réserve vasodilatatrice (capacité plus grande à se dilater), que lors d'une exposition sham. Ce phénomène vasculaire local n'a jamais été mis en évidence auparavant.

Ces deux effets restant strictement locaux ne laissent pas envisager de conséquence sur la répartition sanguine ni sur la pression artérielle. Ils pourraient être utilisés avec bénéfice dans des pathologies vaso-constrictives comme le syndrome de Raynaud ou des accidents d'hypothermie avec lésion locale (gelures). L'étude du mécanisme impliqué permettra d'envisager d'éventuelles conséquences ou ouvrira des pistes pour rechercher d'autres effets similaires.

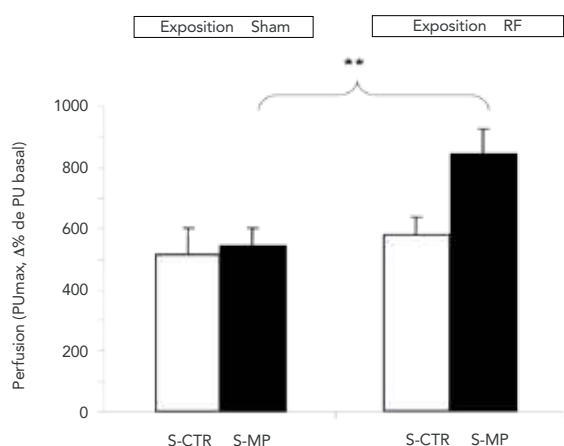
Les ondes RF d'un téléphone mobile modifient la vasomotricité cutanée, aussi bien le micro débit sanguin local que la capacité vasodilatatrice de ces micro-vaisseaux. Des expériences complémentaires permettront d'étudier différents mécanismes de contrôle du tonus vasomoteur (nerveux, endothélial, myogénique...), qui pourraient être activés ou modifiés lors de l'exposition RF.

Collaborations :

Laboratoire Périnatalité et Risques Toxiques (Péritox) (UFR Médecine, Université de Picardie Jules Verne), Centre de recherche clinique (CRC), CHU d'Amiens, Hôpital Sud d'Amiens.

Figure 2

**** P < .01 entre l'exposition réelle RF et l'exposition Sham (côté S-MP : téléphone mobile).**





ANNEXES

63

L'INERIS partenaire de 44 programmes européens

64

Programmes de recherche soutenus par l'ANR

65

Autres programmes

66

Gouvernance scientifique

68

Commissions scientifiques

69

Sujets de thèses sélectionnés en 2014
Indicateurs du contrat d'objectifs 2011-2015

70

Publications



L'INERIS, PARTENAIRE DE 44 PROGRAMMES EUROPÉENS

(en cours au 1^{er} septembre 2014)

COSMOS	Integrated <i>in silico</i> models for the prediction of human repeated dose toxicity of cosmetics to optimise safety
GREENLAND	Gentle remediation of trace element contaminated land
Q-NANO	A pan-European infrastructure for quality in nanomaterials safety testing
MARINA	Managing Risks of nanomaterials
HEROIC	Health and Environmental Risks: Organisation, Integration and Cross-fertilisation of Scientific Knowledge
ATOPICA	Atopic diseases in changing climate, land use and air quality
OCTAVIUS	Optimisation of CO ₂ capture technology allowing verification and implementation at utility scale
COMEX	COMplex mining Exploitation: optimizing mine design and reducing the impacts on human environment
CALEIDOS	Chemical Assessment according to Legislation Enhancing the <i>in silico</i> documentation and safe use
DEMCAMER	Design and manufacturing of catalytic membranes reactors by developing new nano-architected catalytic and selective membrane materials
ERANET SAFeRA	Coordination of European Research on Industrial Safety towards Smart and Sustainable Growth
MARSITE	New directions in seismic hazard assessment through focused Earth observation in the marmara supersite
APPRAISAL	Air pollution policies for assessment of integrated strategies at regional and local scale
4-FUN	The Future of Fully integrated human exposure assessment of chemicals: Ensuring the long-term viability and technology transfer of the EU-FUNded 2-FUNtools as standardized solution
SANOWORK	Safe Nano Worker
I ² MINE	Innovative Technologies and Concepts for the Intelligent Deep Mine of the Future
HELIX	The Human Early-Life Exposome – Novel tools for integrating early-life environmental exposures and child Health across Europe
NANOREG	Support for regulation needs in nanotechnologies
TOSCA	Total Operation Management for Safety Critical Activities
NECOBAUT	Innovative Automobile Electrochemical storage Applications Based on Nanotechnology
STABALID	Stationary Batteries LI-ion safe deployment
TWO STAGE SOLUTIONS	Solutions for present and future emerging pollutants in land and water resources management
CO ₂ QUEST	Impact of the quality of CO ₂ on transport and storage behaviour
SCAFFOLD	Innovative strategies, methods and tools for occupational risks management of manufactured nanomaterials in the construction industry
SAFELIFE X	Safe Life Extension management of aged infrastructures networks and industrial plants
FIRECOMP	European Fire and Rescue Competence-based Project
EDEN	End-user driven DEmo for cbrNE
NANOMILE	Engineered nanomaterial mechanisms of interactions with living systems and the environment: an universal framework for safe nanotechnology
RFCS EXPRO	Prediction and mitigation of methane explosion effects for improved protection of mine infrastructure and critical equipment

NANODEVICE	Novel concepts, methods and technologies for the production of portable easy to use devices for measurement and analysis of air borne engineered nanoparticles in work place air
RFCS 2013 COGAR	Underground Coal Gasification in operating mine and areas of high vulnerability
EDA EMERGE	Novel tools in effect directed analysis for identifying and monitoring emerging toxicants on a european scale
ETC/ACM 2014-2018	European Topic Centre on Air pollution and Climate change mitigation
BASIS	Blast Actions on Structure in Steel
CascEff	Modelling of dependencies and cascading effects for emergency management in crisis situations
IMFRA 2	Impacts de fragments sur des installations voisines (effets dominos)
RFCS 2014 GasDrain	Development of Improved Methane Drainage Technologies by Stimulating Coal Seams for Major Risks Prevention and Increased Coal Output
MACC 2 + MACC 3	Monitoring Atmospheric Composition and Climate
ASCENT	Advanced solid cycles with efficient novel technologies
ENVIROMONITOR	Demonstration of an onsite environmental monitoring
HUGE 2	Hydrogen oriented Underground Coal Gasification for Europe: environmental and safety aspects

PROGRAMMES DE RECHERCHE

soutenus par l'Agence nationale de la recherche - ANR (au 1^{er} septembre 2014)

2010

ECOTECH - ECHIBIOTECH	Outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi de traitements avancés des eaux usées et des boues
INCERD	Prise en compte des incertitudes pour les décisions durables
PREDIMOL	Prédiction des propriétés physico-chimiques des produits par modélisation moléculaire

2011

SEED CIPRES	Caractérisation des impacts potentiels du stockage géologique du CO ₂ sur la qualité de la ressource en eau souterraine
SEED DEMETER	Démonstration de la faisabilité technique et économique d'une boucle destockage/déstockage d'électricité renouvelable sur méthane de synthèse au moyen d'un électrolyseur à haute température réversible
POLYSAFE	Conduite en sécurité des réacteurs-échangeurs intensifiés continus en milieu polyphasique

2012

PROOFS	Effet de ligands environnementaux du récepteur de la progestérone sur la reproduction du poisson
PROLONGE	Propagation lointaine des ondes de grande énergie
PHYTOCHEM	Développement de procédés chimiques éco-innovants pour valoriser les biomasses issues des phytotechnologies



AUTRES PROGRAMMES

financements sur fonds publics – (en cours au 1^{er} septembre 2014)

ADEME

PHYTOSED	Efficacité et pérennité de la phytostabilisation aidée sur un sédiment excavé contaminé par les éléments traces
PASSOLAIR	Capteurs passifs pour l'air du sol
ERANET BIOENERGY EN-PME-TEST	Common European method for the determination of particulate matter emissions of solid fuel burning appliances and boilers
PHYTOAGGLO	Intégration des phytotechnologies de gestion et de traitement des sols pollués dans un projet de renouvellement urbain de la Communauté d'agglomération creilloise
PRO-EXTERN – AAP R&D	Analyses coûts-bénéfices du recyclage des déchets urbains en agriculture
PHYTOSED ECHELLE 1	Parcelle expérimentale de grande taille
CORTEA-EMNR	Emissions des moteurs de tondeuses et autres engins de jardinage
AMI Hydrogène/GRHYD	Gestion des réseaux par l'injection d'hydrogène pour décarboner les énergies
CYCLADE	Recyclage de batteries pour véhicules électriques
ÉTAT DE L'ART ÉMISSION COMBUSTION BIOMASSE	
CORTEA 2011	Émission 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
RSEIN 2012-2015	Recherche santé-environnement intérieur
CORTEA 2013 IDENTECH	Identification des technologies existantes permettant de réduire les émissions polluantes des foyers
CORTEA 2013 AFAC	Actualisation des facteurs d'émission des polluants des foyers domestiques alimentés au bois
CORTEA 2013 EMICER	Mesure et contrôle des émissions de poussières lors de la manutention et du séchage des céréales
CIDE 4éCOS	Évaluation des émissions des expositions et des risques sanitaires liés à l'activité d'un écosite
VALTRI-OR	Évaluation du tri optique de la matière organique
GESIPOL - TROPHE	Transfert et risque des organiques persistants pour l'homme et les écosystèmes
GESIPOL MEMOTRACES	Compréhension des mécanismes de mobilisations et de transferts de CAP oxygénés dans les eaux souterraines et les sols
ICT AGRI BIOGAZ	Coordination of ICT and Robotics in Agriculture and Related Environmental Issues
CORTEA 2014 CARABLACK	Caractérisation de sources de combustion vis-à-vis du black carbon et de la granulométrie des poussières
CARVE	Campagne de mesures de particules à l'émission des foyers domestiques alimentés au bois dans la vallée de l'Arve
TEMPAIR	Mesures du gaz pour l'évaluation de la qualité de l'air en intérieur de bâtiments

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

MOZAIC	Integrated modeling of endocrine disruption in zebrafish at different biological levels
MIXEZ	Effect of mixture of endocrine disruptors in zebrafish
PRIMEQUAL - ECOSTOX	Construction de valeurs toxicologiques de référence pour des expositions multiples

GOUVERNANCE SCIENTIFIQUE

au 1^{er} janvier 2014

Conseil scientifique

PRÉSIDENTE

Corinne GENDRON

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

VICE-PRÉSIDENT

Philippe FREYSSINET

Directeur scientifique énergie et environnement

Qatar National Research Foundation

MEMBRES

Philippe CHALMIN

Responsable du Master

« Affaires internationales »

Université Paris Dauphine

Michel De LARA

Professeur,

Université Paris Est,

École des Ponts Paris-Tech

Isabelle MOMAS

Professeur

Université Paris Descartes

Faculté de pharmacie

Régis REAU

Directeur scientifique senior,

Air Liquide

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

INVITÉS PERMANENTS DU CONSEIL

Nadine GABAS

Président de la commission

risques accidentels

Professeur

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 du sol

et du sous-sol

Ministère de l'Écologie, du Développement

durable et de l'Énergie



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

PERSONNALITÉS QUALIFIÉES DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR OU DE LA RECHERCHE

André LAURENT

Professeur
Laboratoire des sciences du génie chimique - CNRS
Ecole nationale supérieure des industries chimiques de Nancy

Brice LAURENT

Chargé de recherche
CSI Mines Paris Tech

COLLÈGE INDUSTRIELS

Jean-Charles BOUTONNET

Chef du département
Toxicologie et Environnement
ARKEMA

Henri MOLLERON

Directeur environnement
COLAS

Frédéric PERIE

Responsable développement
durable et environnement
TOTAL SA

Yves BOUVIER

Responsable recherche et
développement de l'axe
Développement durable
CETIM

COLLÈGE ASSOCIATIONS

Maryse ARDITI

Pilote du réseau risques
et impacts industriels
France Nature Environnement

Francis GLEMET

Porte-parole
Coordination nationale médicale santé
environnement

Ariane VENNIN

Porte-parole
Écologie sans frontière

COLLÈGE SYNDICATS

Gérald HAYOTTE

CFDT

Jean-Paul LIOT

CFE-CGC

Lionel PASTRE

CGT

COLLÈGE ÉLUS

Michel GUILLOUX

Adjoint au maire
Mairie de Feyzin

René DROUIN

Maire
Mairie de Moyeuve-Grande

COLLÈGE ÉTAT

Cédric BOURRILLET

Chef du service de la prévention des nuisances et de la qualité
de l'environnement
Direction générale de la prévention des risques
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Patrick BUESO

Chef du service de la recherche par intérim (représenté 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

Risques chroniques

Rémi MAXIMILIEN

Président
Attaché au directoire de la direction des sciences du vivant
CEA

Vincent-Henri PEUCH

Vice-président
Responsable de la division chimie atmosphérique
Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme

Robert BAROUKI

Directeur Unité INSERM U747
UFR Biomédicale
Paris Descartes-Université Paris V

Jean-Yves BOTTERO

Directeur de recherche CNRS
Directeur du GDRI ICENT
CEREGE UMR 6635
CNRS

Hélène BUDZINSKI

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

Thierry CAQUET

Écologie et santé des écosystèmes
UMR Agrocampus ESE
INRA

Pierre CELLIER

Directeur de recherche
UMR Environnement et grandes cultures
INRA

François GENSDARMES

Chef du laboratoire de physique et de métrologie des aérosols
IRSN

Christian GEORGE

Directeur de recherche
UMR 5256 CNRS/Université Lyon 1
IRCELYON

Philippe GISLETTE

Directeur du CIRSEE
SUEZ Environnement

Christophe MINIER

Directeur adjoint à l'action scientifique et technique
ONEMA

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 LAMBOLEZ-MICHEL

Pôle évaluation et veille sanitaire
Véolia environnement recherche & innovation

Risques du sol et du sous-sol

Jean-Louis DURVILLE

Président
Coanimateur du collège Techniques de construction
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Jacques PIRONON

Vice-président
Directeur de recherche
UMR Géoréources 7 359
CNRS – 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 stratégie matières et déchets
BG Aval
Areva

Damien GOETZ

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

François KALAYDJIAN

Directeur adjoint du Centre de résultat ressources
IFP énergies Nouvelles

Vincent LABIOUSE

Maître d'enseignement et de recherche
Rock Mechanics Laboratory
School of architecture, civil and environmental engineering (ENAC)
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne
EPFL-ENAC-ICARE-LMR – Lausanne (Suisse)

Laurent LEVÉQUE

Ceindre TEGG
EDF

Jacques MUDRY

UMR chrono-environnement sciences et techniques
Université de Franche-Comté

Pierre POTHERAT

Jean-Pierre RAJOT

Chef du groupe conception et calcul des ouvrages
IFSTTAR

Maxence VERMERSCH

Directeur
Mavesa

Sandrine Vidal-Gilbert

R & D - Unconventional Gas Resources Project
Total Exploration-Production

Albin GUYON

Inspection générale des carrières
Mairie de Paris

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 départementale des chemins de fer

Frédérique BATTIN-LECLERC

Directrice de recherche
Laboratoire réactions et génie des procédés
CNRS - ENSIC

Didier LARRAURI

R & D
EDF

Jean-François LECHAUDÉL

Coordinateur risques technologiques groupe
Direction sécurité industrielle
Total S.A.

Xavier MONTAGNE

Adjoint au directeur scientifique du secteur énergie, développement durable, chimie et procédés
MENESR
DGRI-SSRI

André PAUSS

Professeur
Département génie des procédés industriels
Université de technologie de Compiègne

Christophe PIJOLAT

Directeur Centre SPIN
Directeur Laboratoire LPMG (FRE 3312 – CNRS)
École des mines de Saint-Étienne

Christophe RENIER

Directeur d'objectifs
Infrastructures
GDF SUEZ

Alexis TSOUKIAS

LAMSADE – UMR CNRS 7024
Université Paris-Dauphine

Serge WALTER

Laboratoire propre intégré
Groupe sécurité et écologies chimiques

Maureen WOOD

Major Accident Hazards Bureau
European Commission – Joint Research Center

Enrico ZIO

Responsable de la chaire science des systèmes et défi énergétique
Laboratoire génie industriel
École centrale Paris



SUJETS DE THÈSES SÉLECTIONNÉS EN 2014

Risques accidentels

Modélisation d'un jet gazeux sous pression chargé en nanoparticules

Positionnement et influence de la fonction sécurité dans le fonctionnement des entreprises à risques : entre expertise relationnelle, réglementaire et technique

Développement d'une approche intégrée d'analyse de risques permettant de quantifier le degré de confiance (vs incertitudes)

Développement et mise au point de modèles phénoménologiques et de maîtrise des risques d'explosion par la filière émergente hydrogène-énergie

Risques chroniques

Modélisation mathématique et informatique des barrières épithéliales

Étude de l'évolution des tumeurs astrocytaires sous l'effet des champs électromagnétiques radiofréquence

Développement de biomarqueurs du métabolisme énergétique chez l'épinoche à trois épines *Gasterosteus aculeatus* et lien avec la fonction de reproduction

Effets biologiques de ligands environnementaux du récepteur à la progestérone chez le poisson zèbre

Évaluation *in vitro* et *in vivo* des effets PE chez le poisson zèbre : cas de substances aquatiques seules et en mélanges complexes

OOSOA: On-line, Off-line, Secondary Organic Aerosol - Sources, formation et devenir de l'aérosol organique et impact sur la qualité de l'air

Développement méthodologique pour l'analyse d'une large gamme de composés dans les milieux aquatiques

Le changement climatique : quels sont les processus les plus sensibles pour la composition atmosphérique particulière future en Europe ?

Développement d'un outil intégré multiéchelle pour la construction d'indicateurs composites et la cartographie des risques

Caractérisation génotypique et phénotypique de la réponse pro-inflammatoire chez un poisson d'eau douce (*Rutilus rutilus*) : effet de stress chimiques et biologiques et interaction avec la fonction de reproduction

Modélisation de l'évolution multiphasique des composés organiques dans l'atmosphère : développement de schémas réduits pour les modèles de qualité de l'air

LES INDICATEURS DU CONTRAT D'OBJECTIFS 2011/2015

Recherche

	2012	2013	
	Réalisé	Cible	Réalisé
Part de l'activité de l'Institut consacrée à la recherche	20,3 %	> 20 %	19,6 %
Part des financements sur appels à projets de recherche dans les ressources publiques de la recherche (dont part des financements européens)	35,4 %	> 35 %	33,2 %
Nombre de titulaires d'une HDR	13	> 12	17
Nombre de publications dans des revues à comité de lecture référencées ISI	90	> 85	92
Part des contrats passés avec les industriels dans les ressources totales de la recherche	12,1 %	14 %	14,4 %
Nombre de doctorants	42	Sans cible	45
Nombre de démonstrateurs où l'INERIS intervient	4	5	5

PUBLICATIONS

Risques chroniques

2013

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): p. 395-401

ABOU CHAKRA Oussama, SUTRA Jean-Pierre, DEMEY THOMAS Emmanuelle, VINH Joëlle, PONCET Pascal, LACROIX Ghislaine, SENECHAL Hélène

Proteomic analysis of major and minor allergens from isolated pollen cytoplasmic granules
Journal of Proteome Research, 2012, 11 (2): p. 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): p. 641-655

HARATI Rania, BENECH Henri, VILLEGIER Anne-Sophie, MABONDZO Aloïse

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): p. 1566-1580

TEBBY Cléo, MOMBELLI Enrico

Modelling structure activity landscapes with cliffs: a kernel regression-based approach
Molecular Informatics, 2013, 32 (7): p. 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): p. 271-279

KERDVEL Gweneg, 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): p. 99-106

MICHELOT Nicolas, MANDIN Corinne, RAMALHO Olivier, RIBERON Jacques, MARCHAND Caroline, MALHERBE Laure, RAMEL Martine, PERSONNAZ Marie-Blanche, DELMAS Véronique, URBAN Soizic, CARREGA 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): p. 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): p. 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): p. 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): p. 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: p. 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): p. 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: p. 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): p. 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): p. 2100-2108

HENNEBERT Pierre, CHARRASSE Benoit, BENARD Anne, LAMBERT Stéphane

Impact environnemental des pneumatiques déchetés utilisés pour la construction d'ouvrages en remblai
Sciences, eaux et territoires - La revue d'IRSTEA, 2013 (10, Hors série n° 8): p. 2-8

BOIS Frédéric Y.

Bayesian inference
REISFELD, Brad; MAYENO, Arthur N. - *Computational Toxicology, Volume II*. New York: Springer, 2013, p. 597-636 (Methods in molecular biology, 930)

PERY Alexandre, BEAUDOUIN Rémy

Biology-based and population dynamics modeling in ecotoxicology
FERARD, Jean-François; BLAISE, Christian - *Encyclopedia of Aquatic Ecotoxicology*. Dordrecht: Springer, 2013, p. 205-210

GAUDAIRE François, NOE Nicolas, DUFOUR Jean Benoît, DE SEZE René, CAGNON Patrice, SELMAOUI Brahim, THUROCZY Gyorgy, MAZET Paul, MAUGER Samuel

Méthode d'analyse de l'exposition des populations et de la couverture radio des réseaux de téléphonie mobile GSM et UMTS
Revue de l'électricité et de l'électronique, 2012 (5): p. 36-43

TORRALBA Béatrice, GALLOU Guillaume, DUTOUQUET Christophe

La technique LIBS de spectroscopie du plasma induit par laser pour la mesure en continu des métaux à la cheminée - Projet Emilibs
Fonderie Magazine, 2012 (27): p. 23-38

PICHARD Annick

La sécurité des produits chimiques: une harmonisation internationale des réglementations est-elle possible dans l'avenir?
Annales des mines. Responsabilité et environnement, 2013 (71): p. 13-18

HUBERT Philippe, TOULHOAT Pierre

Les méthodes alternatives en matière d'expérimentation animale
Annales des mines. Responsabilité et environnement, 2013 (71): p. 19-23

BRACK Werner, GOVENDER Selvan, SCHULZE Tobias, KRAUSS Martin, HU Meng, MUZ Melis, HOLLENDER Juliane, SCHIRMER Kristin, SCHOLLEE Jennifer, HIDASI Anita, SLOBODNIK Jaroslav, RABOVA Zuzana, AIT-AISSA Selim, SONAVANE Manoj, AL.

EDA-EMERGE: an FP7 initial training network to equip the next generation of young scientists with the skills to address the complexity of environmental contamination with emerging pollutants
Environmental Sciences Europe, 2013, 25: p. art. 18

MICHELOT Nicolas, MARCHAND Caroline, RAMALHO Olivier, DELMAS Véronique, CARREGA Marie

Monitoring indoor air quality in French schools and day-care centers
HVAC & R Research, 2013, 19(8): 1083-1089

BHUGWANT Chatrapatty, BESSAFI Miloud, FAVEZ Olivier, CHIAPPINI Laura, SIEJA Bruno, LEOZ-GARZIANDIA Eva

High contribution of sea salt aerosols on atmospheric particles measured at an urban tropical location in Reunion island
Journal of Environmental Protection, 2013, 4 (8): p. 828-842

ZDANEVITCH Isabelle, BOUR Olivier, LEJAL Sébastien, BRIAND Mark

Measurement of persistent organic pollutants in landfill leachates
COSSU, R. ; HE, P. ; KJELDEN, P. ; MATSUFUJI, Y. ; REINHART, D. ; STEGMANN, R. - *SARDINIA 2013: Proceedings of the 14th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2013*

BOUR Olivier, ZDANEVITCH Isabelle, POKRYSZKA Zbigniew, LALET A., AKERMAN A.

Temporal variation of LFG emission from different types of landfill cover
COSSU, R. ; HE, P. ; KJELDEN, P. ; MATSUFUJI, Y. ; REINHART, D. ; STEGMANN, R. - *SARDINIA 2013: Proceedings of the 14th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2013*

HENNEBERT Pierre, REBISCHUNG Flore, LANGERON P.

Eu waste hazardousness assessment - proposition of methods
COSSU, R. ; HE, P. ; KJELDEN, P. ; MATSUFUJI, Y. ; REINHART, D. ; STEGMANN, R. - *SARDINIA 2013: Proceedings of the 14th International waste management and landfill symposium. Italy: CISA Publisher, 2013*

HENNEBERT Pierre, AVELLAN Astrid, YAN Junfang, AGUERRE-CHARIOL Olivier

Experimental evidence of colloids and nanoparticles presence from 25 waste leachates
Waste Management, 2013, 33 (9): p. 1870-1881

COLETTE Augustin, BESSAGNET Bertrand, VAUTARD Robert, SZOPA Sophie, RAO Shilpa, SCHUCHT Simone, KLIMONT Zbigniew, MENUT Laurent, CLAIN Gaëlle, MELEUX Frédéric, ROUIL Laurence

European atmosphere in 2050, a regional air quality and climate perspective under CMIP5 scenarios
Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13 (15): p. 7451-7471

MANIER Nicolas, BADO-NILLES Anne, DELALAIN Patrice, AGUERRE-CHARIOL Olivier, PANDARD Pascal

Ecotoxicity of non-aged and aged CeO₂ nanomaterials towards freshwater microalgae
Environmental Pollution, 2013, 180: p. 63-70

PETERSEN Karina, FETTER Eva, KAH Olivier, BRION François, SCHOLZ Stefan, TOLLEFSEN Knut Erik

Transgenic (cyp19a1b-GFP) zebrafish embryos as a tool for assessing combined effects of oestrogenic chemicals
Aquatic Toxicology, 2013, 138: p. 88-97

HINFRAY Nathalie, NOBREGA Rafael Henrique, CAULIER Morgane, BAUDIFFIER Damien, MAILLOT-MARECHAL Emmanuelle, CHADILI Edith, PALLUEL Olivier, PORCHER Jean-Marc, SCHULZ Rüdiger, BRION François

Cyp17a1 and Cyp19a1 in the zebrafish testis are differentially affected by oestradiol
Journal of Endocrinology, 2013, 216 (3): p. 375-388

PUBLICATIONS

SASSINE Maria, PICQUET-VARRAULT

Bénédicte, **PERRAUDIN Emilie, CHIAPPINI Laura, DOUSSIN Jean-François, GEORGE Christian**
A new device for formaldehyde and total aldehydes real-time monitoring
Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21 (2): 1258-1269

LOOS Nathalie, THUROCZY Gyorgy, GHOSN Rania, BRENET-DUFOUR Valérie, LIABEUF Sophie, SELMAOUI Brahim, LIBERT Jean-Pierre, BACH Véronique, DIOUF Momar, DE SEZE René
Is the effect of mobile phone radiofrequency waves on human skin perfusion non-thermal?
Microcirculation, 2013, 20 (7): p. 629-636

BERT Valérie

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués
Paris: EDP Sciences, 2013

DE SEZE René, COURTIN Claude, GRUET Pierre, ET AL.

Exposition des travailleurs aux risques dûs aux champs électromagnétiques. Guide d'évaluation des risques
Paris: INRS, 2013

COECKE Sandra, PELKONEN Olavi, LEITE Sofia Batista, BERNAUER Ulrike, BESSEMS Jos, BOIS Frédéric Y., GUNDERT-REMY Ursula, LOIZOU George, TESTAI Emanuela, ZALDIVAR José-Manuel

Toxicokinetics as a key to the integrated toxicity risk assessment based primarily on non-animal approaches
Toxicology in Vitro, 2013, 27 (5, special issue): p. 1570-1577

BERTON Thierry

Cartographie de l'exposition *in utero* du nourrisson picard aux pesticides
Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne, 05/12/2013

DE KERMOYSAN Goulwen

Effets des polluants sur la dynamique de population d'épinoche à trois épines, *Gasterosteus aculeatus*, en mésocosmes: analyse des données à l'aide d'un modèle individu-centré
Thèse de doctorat. 13/09/2013

CHARRASSE Benoit

Comportement à long terme, caractérisation opérationnelle et évaluation environnementale des contaminants organiques des sédiments issus des activités de dragage
Thèse de doctorat. Université Paul Cézanne Aix-Marseille 3, 16/12/2013

GHOSN Rania

Effets des téléphones portables sur la physiologie humaine: vascularisation cérébrale, électroencéphalogramme et échauffement cutané
Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne, 12/11/2013

GOUSSEN Benoît

Prise en compte d'un modèle bioénergétique dans un modèle de dynamique adaptative pour une meilleure évaluation des risques écologiques: le cas d'une population de *Caenorhabditis elegans* soumise à divers stress anthropiques
Thèse de doctorat. 27/11/2013

ACHARD Romain

Dynamique des contaminants inorganiques dans les sédiments de dragage: rôle spécifique de la matière organique naturelle
Thèse de doctorat. Université du Sud Toulon Var, 24/05/2013

DEKALI Samir

Développement de modèles *in vitro* de la barrière alvéolo-capillaire pour l'étude de la toxicité et du passage des nanoparticules
Thèse de doctorat. Université Paris Descartes, 24/05/2013

SANTOS Raphaël

Un biomarqueur de génotoxicité chez l'épinoche (*Gasterosteus aculeatus*): application au biomonitoring et étude de sa valeur prédictive en écotoxicologie
Thèse de doctorat. INSA Lyon, 18/01/2013

HUBERT Philippe

Situation in France: Nanoparticles in the Grenelle Environment Forum
LAHMANI, M. ; MARANO, F. ; HOUDY, P. - *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer, 2011, p. 455-461

MANDIN Corinne, LE BIHAN Olivier, AGUERRE-CHARIOL Olivier

Monitoring Nanoaerosols and Environmental Exposure
LAHMANI, M. ; MARANO, F. ; HOUDY, P. - *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer, 2011, p. 201-210

GARRIC Jeanne, THYBAUD Eric

Toxicological Models Part B: Environmental Models
LAHMANI, M. ; MARANO, F. ; HOUDY, P. - *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer, 2011, p. 379-396

BAEZA-SQUIBAN Armelle, LACROIX Ghislaine, BOIS Frédéric Y.

Experimental models in nanotoxicology
LAHMANI, M. ; MARANO, F. ; HOUDY, P. - *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer, 2011, p. 63-86

BRIGNON Jean-Marc

Situation in Europe and the world: societal risks and benefits of new nanometric products
LAHMANI, M. ; MARANO, F. ; HOUDY, P. - *Nanoethics and Nanotoxicology*. Berlin: Springer, 2011, p. 511-517

WAKED A., FAVEZ Olivier, ALLEMAN L.Y., PIOT C., PETIT Jean-Eudes,

DELAUNAY Thierry, VERLINDEN E., GOLLY B., BESOMBES Jean-Luc, JAFFREZO Jean-Luc, LEOZ-GARZIANDIA Eva
Source apportionment of PM10 in a North-Western Europe regional urban background site (Lens, France) using Positive Matrix Factorization and including primary biogenic emissions
Atmospheric Chemistry and Physics, 2013: Accepted

GAGNAIRE Béatrice, BADO-NILLES Anne, BETOULLE Stéphane, SANCHEZ Wilfried

Effects of depleted uranium on immune parameters of zebrafish, *Danio rerio*, measured by flow cytometry
Journal of Xenobiotics, 2013, 3 (1S special issue)

DE SEZE ET AL.

Other relevant data
Non-ionizing radiation, part 2: Radiofrequency electromagnetic fields, Volume 102. Lyon: IARC, 2013, p. 285-404 (IARC MONOGRAPHS ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS, 59)

GRAMMONT Vincent, DROISSART Aurélie, BOUDET Céline

Évaluation des risques sanitaires pour la gestion des émissions, sites et territoires
Techniques de l'Ingénieur. Paris: Editions Techniques de l'Ingénieur, 2013, p. G4204

COLETTE Augustin, ROUIL Laurence, BESSAGNET Bertrand, SCHUCHT Simone, SZOPA Sophie, VAUTARD Robert, MENUT Laurent

Pollution atmosphérique et climat
Pollution atmosphérique, 2013 (Spécial climat): 78-83



ZALDIVAR COMENGENES José M.,
PERY Alexandre, BROCHOT Céline,
BLAAUBOER Bas J.
Biokinetics Working Group: In vitro to in vivo
extrapolation
GOCHT, Tilman; SCHWARZ, Michael
- The consolidation of the research
strategy: Towards the replacement
of in vivo repeated dose systemic
toxicity testing, volume II. Paris: Coach
Consortium, 2012, p. 290-296 (SEURAT-1)

2014

**COLETTE Augustin, BESSAGNET
Bertrand, MELEUX Frédéric,**
TERRENOIRE Etienne, ROUIL Laurence
Frontiers in air quality modelling
Geoscientific Model Development, 2014,
7 (1): p. 203-210

VAUTARD Robert, GOBIET Andreas,
JACOB Daniela, BELDA Michal,
COLETTE Augustin, DEQUE Michel,
FERNANDEZ Jesus, GARCIA-DIEZ
Markel, GOERGEN Klaus, GUTTNER
Ivan, HALENKA Tomas, KARACOSTAS
Theodore, KATRAGKOU Eleni KEULER
Klaus, KOTLARSKI Sven, MAYER
Stephanie, VAN MEIJGAARD Erik,
NIKULIN Grigory, PATARCIC Mirta,
SCINOCCA John, SOBOLOWSKI Stefan,
SUKLITSCH Martin, TEICHMANN Claas,
WARRACH-SAGI Kirsten, WULFMEYER
Volker, YIOU Pascal
The simulation of European heat waves
from an ensemble of regional climate
models within the EURO-CORDEX project
Climate Dynamics, 2013, 41 (9-10): p. 2555-
2575

JACOB Daniela, PETERSEN Juliane,
EGGERT Bastian, ALIAS Antoinette,
CHRISTENSEN Ole Bossing, BOUWER
Laurens M., BRAUN Alain, **COLETTE
Augustin, DEQUE Michel, GEORGIEVSKI
Goran, GEORGOPOULOU Elena,**
GOBIET Andreas, MENUT Laurent,
NIKULIN Grigory, HAENSLER Andreas,
HEMPELMANN Nils, JONES Colins,
KEULER Klaus, KOVATS Sari, KRONER
Nico, KOTLARSKI Sven, KRIEGSMANN
Arne, MARTIN Eric, VAN MEIJGAARD
Erik, MOSELEY Christopher, PFEIFER
Susanne, PREUSCHMANN Swantje,
RADERMACHER Christine, RADTKE Kai,
RECHID Diana, ROUNSEVELL Mark,
SAMUELSSON Patrick, SOMOT Samuel,
SOUSSANA Jean-François, TEICHMANN
Claas, VALENTINI Riccardo, VAUTARD
Robert, WEBER Bjorn, YIOU Pascal

EURO-CORDEX: new high-resolution
climate change projections for European
impact research
Regional Environmental Change, 2014:
p. Accepted

MENUT Laurent, BESSAGNET Bertrand,
**KHVOROSTYANOV D., BEEKMANN
Matthias, BLOND N., COLETTE
Augustin, COLL Isabelle, CURCI
Gabriele, FORET G., HODZIC Alma,**
**MAILLER S., MELEUX Frédéric, MONGE
Jean-Louis, PISON I., SIOUR Guillaume,**
TURQUETY Solène, VALARI Myrto,
VAUTARD Robert, VIVANCO Marta G.
CHIMERE 2013: a model for regional
atmospheric composition modelling
Geoscientific Model Development, 2014,
6 (4): p. 981-1028

FAYE Cheikh-Benoît, AMODEO Tanguy,
**FREJAFON Emeric, DELEPINE-GILON
Nicole, DUTOUQUET Christophe**
Sampling considerations when analyzing
micrometric-sized particles in a liquid
jet using laser induced breakdown
spectroscopy
*Spectrochimica Acta Part B - Atomic
Spectroscopy, 2014, 91: p. 5-11*

**NGO Viet V., MICHEL Julien, GUJISAITE
Valérie, LATIFI Abderrazak, SIMONNOT
Marie-Odile**
Parameters describing nonequilibrium
transport of polycyclic aromatic
hydrocarbons through contaminated soil
columns: Estimability analysis, correlation,
and optimization
Journal of Contaminant Hydrology, 2014,
158: p. 93-109

PERY Alexandre, BONVALLOT Nathalie,
**EL YAMANI Mounia, BOULANGER
Guillaume, KARG Franck, MOSQUERON
Luc, ISMERT Muriel, GUILLOSSOU
Gaëlle, GLORENNEC Philippe**
Valeurs limites d'exposition
professionnelles (VLEP), valeurs
toxicologiques de référence (VTR):
objectifs et méthodes
Environnement, risques et santé, 2013, 12
(5): p. 442-449

SAIB Mahdi-Salim, CAUDEVILLE Julien,
CARRE Florence, GANRY Olivier,
TRUGEON Alain, CANOLELLA André
Spatial relationship quantification between
environmental, socioeconomic and health
data at different geographic levels
*International Journal of Environmental
Research and Public Health, 2014, 11 (4):*
p. 3765-3786

BONVALLOT Nathalie, PERY Alexandre,
**LAFON Dominique, BOULANGER
Guillaume, KARG Franck, MOSQUERON
Luc, ISMERT Muriel, GUILLOSSOU
Gaëlle, GLORENNEC Philippe**
Évaluation du risque chimique en santé-
travail et en santé-environnement:
objectifs et méthodes
Environnement, risques et santé, 2013, 12
(5): p. 434-441

**SOUISSI Yasmine, BOURCIER Sophie,
AIT-AISSA Selim, MAILLOT-MARECHAL
Emmanuelle, BOUCHONNET Stéphane,
GENTY Christophe, SABLIER Michel**
Using mass spectrometry to
highlight structures of degradation
compounds obtained by photolysis of
chloroacetamides: Case of acetochlor
Journal of Chromatography A, 2013, 1310:
p. 98-112

**SANTOS Raphaël, PALOS-LADEIRO
Mélissa, BESNARD Aurélien, VULLIET
Emmanuelle, PORCHER Jean-Marc,
BONY Sylvie, DEVAUX Alain, SANCHEZ
Wilfried**
Kinetic response of a genotoxicity
biomarker in the three-spined stickleback
and implication for environmental
monitoring
Ecotoxicology and Environmental Safety,
2014, 102: p. 6-11

**LANCE Emilie, PETIT Anais, SANCHEZ
Wilfried, PATY Chrystelle, GERARD
Claudia, BORMANS Myriam**
Evidence of trophic transfer of microcystins
from the gastropod *Lymnaea stagnalis* to
the fish *Gasterosteus aculeatus*
Harmful Algae, 2014, 31: p. 9-17

**DEKALI Samir, DIVETAÏN
Ariane, KORTULEWSKI Thierry,
VANBAELINGHEM Justine, GAMEZ
Christelle, ROGERIEUX Françoise,
LACROIX Ghislaine, RAT Patrice**
Cell cooperation and role of the P2X₁
receptor in pulmonary inflammation
induced by nanoparticles
Nanotoxicology, 2013, 7 (8): p. 1302-1314

**DE KERMOYSAN Goulwen, JOACHIM
Sandrine, BAUDOIN Patrick, LONJARET
Matthieu, TEBBY Cléo, LESAULNIER
François, LESTREMAU François,
CHATELLIER Claudine, AKROUR Zehira,
PHERON Edlyn, PORCHER Jean-Marc,
PERY Alexandre, BEAUDOUIN Rémy**
Effects of bisphenol A on different trophic
levels in a lotic experimental ecosystem
Aquatic Toxicology, 2013, 144: p. 186-198

PUBLICATIONS

DE KERMOYSAN Goulwen, PERY Alexandre, PORCHER Jean-Marc, BEAUDOUIN Rémy

A non-invasive method based on head morphology to sex mature three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.) in rearing conditions
Mathematical Biosciences, 2013, 244 (2): p. 148-153

WINKLER David A., MOMBELLI Enrico, PIETROIUSTI Antonio, TRAN Lang, WORTH Andrew P., FADEEL Bengt, MCCALL Maxine J.

Applying quantitative structure-activity relationship approaches to nanotoxicology: current status and future potential
Toxicology, 2013, 313 (1): p. 15-23

GEENEN Suzanne, YALES James W.T., KENNA J. Gerry, BOIS Frédéric Y., WILSON Ian D., WESTERHOFF Hans V.
Multiscale modelling approach combining a kinetic model of glutathione metabolism with PBPK models of paracetamol and the potential glutathione-depletion biomarkers ophthalmic acid and 5-oxoproline in humans and rats
Integrative Biology, 2013, 5 (6): p. 877-888

MORGENEYER Martin, LE BIHAN Olivier, USTACHE Aurélien, AGUERRE-CHARIOL Olivier

Experimental study of the aerosolization of fine alumina particles from bulk by a vortex shaker
Powder Technology, 2013, 246: p. 583-589

DOR Frédéric, ZMIROU-NAVIER Denis, BOUDET Céline, GAUVIN Stéphanie, GALLAND Jean-Pierre, ANDRIEU-SEMMELE Muriel, CHIRON Mireille, COQUET Sandrine, HENRY Emmanuel, HERY Michel, PASCAL Laurence, LE MOULLEC Yvon, MOUNIER Sébastien, ORMSBY Jean-Nicolas, RINGEARD Caroline, WALLET, France

The Health Risk Assessment Approach, a Tool for Managing Risks on the Scale of a Territory: A French Experience
Human and Ecological Risk Assessment, 2013, 19 (6): p. 1440-1456

PANDARD Pascal, ROEMBKE Jorg

Proposal for a Harmonized strategy for the assessment of the HP 14 property
Integrated Environmental Assessment and Management, 2013, 9 (4): p. 665-672

DEVILLERS James, PANDARD Pascal, RICHARD B.

External validation of structure-biodegradation relationship (SBR) models for predicting the biodegradability of xenobiotics
SAR and QSAR in Environmental Research, 2013, 24 (12): p. 979-993

SALEH Khashayar, MOUFAREJ ABOU JAOUDE Marie-Thérèse, MORGENEYER Martin, LEFRANCOIS Emmanuel, LE BIHAN Olivier, BOUILLARD Jacques

Dust generation from powders: A characterization test based on stirred fluidization
Powder Technology, 2014, 255: p. 141-148

PERNIGOTTI Denise, THUNIS Philippe, CUVELIER C., GEORGIEVA Emilia, GSELLA A., DE MEIJ A., PIROVANO Guido, BALZARINI A., RIVA G.M., CARNEVALE C., PISONI E., VOLTA M., BESSAGNET Bertrand, KERSCHBAUMER A., VIAENE P., DE RIDDER K., NYIRI Agnès, WIND P.

POMI: a model inter-comparison exercise over the Po Valley
Air Quality, Atmosphere & Health, 2013, 6 (4): p. 701-705

ACHARD Romain, BENARD Anne, MERDY Patricia, DURRIEU G., LE POUPON C., CAMPREDON Brice, LUCAS Yves

Environmental Quality Assessment for Valorization of Raw and Desalinated Dredged Marine Sediment Contaminated by Potentially Toxic Elements
Waste and Biomass Valorization, 2013, 4 (4): p. 781-795

RAMIREZ Tzutzy, DANESHIAN Mardas, KAMP Hennie, BOIS Frédéric Y., CLENCH Malcom R., COEN Muireann, DONLEY beth, FISCHER Steven M., EKMAN Drew R., FABIAN Eric, GUILLOU Claude, HEUER Joachim, HOGBERG Helena T., JUNGnickel, Harald, KEUN Hector C., KRENNRICH Gerhard, KRUPP Eckart, LUCH Andreas, NOOR Fozia, PETER Erik, RIEFKE Bjoern, SEYMOUR Mark, SKINNER Nigel, SMIRNOVA Lena, VERHEIJ Elwin, WAGNER Silvia, HARTUNG Thomas, VAN RAVENSWAAY Bennard, LEIST Marcel

Metabolomics in Toxicology and Preclinical Research
ALTEX - Alternatives to Animal Experimentations, 2013, 30 (2): p. 209-225

GOMEZ-BALDERAS Cindy, COCHET Nelly, BERT Valérie, TARNAUD Eric

16S rDNA analysis of bacterial communities associated with the hyper accumulator *Arabidopsis halleri* grown on a Zn and Cd polluted soil
European Journal of Soil Biology, 2014, 60: p. 16-23

BADO-NILLES Anne, JOLLY Sabrina, PORCHER Jean-Marc, PALLUEL Olivier, GEFFARD Alain, GAGNAIRE Béatrice, BETOULLE Stéphane, SANCHEZ Wilfried

Applications in environmental risk assessment of leucocyte apoptosis, necrosis and respiratory burst analysis on the European bullhead, *Cottus sp*
Environmental Pollution, 2014, 184: p. 9-17

GRAMMONT Vincent

L'évaluation de l'état des milieux et des risques sanitaires: démarche intégrée pour la gestion des émissions de substances chimiques par les ICPE
Pollution atmosphérique, 2013 (219)

BONNEVILLE Sarah, LOPEZ Benjamin, BOTTA Fabrizio

Deux campagnes d'analyses au niveau national sur plusieurs centaines de molécules émergentes: premiers résultats
Géologues, 2013, 179: p. 36-38

CHARRASSE Benoit, TIXIER Céline, HENNEBERT Pierre, DOUMENQ Pierre

Polyethylene passive samplers to determine sediment-pore water distribution coefficients of persistent organic pollutants in five heavily contaminated dredged sediments
Science of the Total Environment, 2014, 472: p. 1172-1178

ROMARY Thomas, MALHERBE Laure, DE FOUQUET Chantal

Optimal spatial design for air quality measurement surveys
Environmetrics, 2014, 25 (1): p. 16-28

PETITDANT Nicolas, LECOMTE Anthony, ROBIDEL Franck, VILLEGIER Anne-Sophie

Behavioral and biochemical effects of GSM 900 MHz in neuroinflammation and gestational inflammation models
LEMOS ANTUNES, Carlos - Proceedings of the 5th International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment. NC: APDEE, 2014



SHANDILYA Neeraj, LE BIHAN Olivier, MORGENEYER Martin

A review on the study of the generation of (Nano)particles aerosols during the mechanical sollicitation of materials
Journal of Nanomaterials, 2014: p. Art. 289108

VON DER WEIDEN-REINMULLER

S.L., DREWNICK F., CRIPPA M., PREVOT A.S.H, MELEUX Frédéric, BALTENSPERGER U., BEEKMANN Matthias, BORRMANN S.

Application of mobile aerosol and trace gas measurements for the investigation of megacity air pollution emissions: the Paris metropolitan area
Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 7 (1): p. 279-299

GAUBERT B., COMAN A., FORET G., MELEUX Frédéric, UNG Anthony, ROUIL Laurence, IONESCU A., CANDAU Y., BEEKMANN Matthias

Regional scale ozone data assimilation using an ensemble Kalman filter and the CHIMERE chemical transport model
Geoscientific Model Development, 2014, 7 (1): p. 283-302

PERE Jean-Christophe, BESSAGNET Bertrand, MALLET Marc, WAQUET F., CHIAPELLO I., MINVIELLE F., PONT Véronique, MENUT Laurent

Direct radiative effect of the Russian wildfires and its impact on air temperature and atmospheric dynamics during August 2010
Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14 (4): p. 1999-2013

KIESEWETTER G., BORKEN-KLEEFELD J., SCHOPP W., HEYES C., THUNIS P., BESSAGNET Bertrand, TERRENOIRE Etienne, GSELLA A., AMANN Markus

Modelling NO₂ concentrations at the street level in the GAINS integrated assessment model: projections under current legislation
Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14 (2): p. 813-829

VAUTARD Robert, THAIS Françoise, TOBIN Isabelle, BREON François-Marie, DE LAVERGNE Jean-Guy, COLETTE Augustin, YIOU Pascal, RUTI Paolo Michele

Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms
Nature Communications, 2014, 5: p. Art. 3196

PERY Alexandre, DEVILLERS James, BROCHOT Céline, MOMBELLI Enrico, PALLUEL Olivier, PICCINI Benjamin, BRION François, BEAUDOUIN Rémy

A Physiologically Based Toxicokinetic Model for the Zebrafish *Danio rerio*
Environmental Science & Technology, 2014, 48 (1): p. 781-790

FEILER Ute, RATTE Monika, ARTS Gertie, BAZIN Christine, BRAUER Frank, CASADO Carmen, DOREN Laszlo, EKLUND Britta, GILBERG Daniel, GROTE Matthias, GONSIOR Guido, HAFNER Christoph, KOPF W, LEMNITZER Bernd, LIEDTKE Anja, MATTHIAS Uwe, OKOS Ewa, PANDARD Pascal, SCHEERBAUM Dirk, SCHMITT-JANSEN Mechthild, STEWART Kathleen, TEODOROVIC Ivana, WENSEL Andrea, PLUTA Hans-Juergen

Inter-laboratory trial of a standardized sediment contact test with the aquatic plant *Myriophyllum aquaticum* (ISO 16191)
Environmental Toxicology and Chemistry, 2014, 33 (3): p. 662-670

BESSEMS Jos, LOIZOU George, KRISHNAN Kannan, CLEWELL Harvey J., BERNASCONI Camilla, BOIS Frédéric Y., COECKE Sandra, COLLNOT Eva-Maria, DIEMBECK Walter, FARCAL Lucian Romeo, GERAETS Liesbeth, GUNDETT-REMY Ursula, KRAMER Nynke, KUSTERS Gabriele, LEITE Sofia Batista, PELKONEN Olavi, SCHRODER Klaus, TESTAI Emanuela, WILK-ZASADNA Iwona, ZALDIVAR COMENGES José M.

PBTK modelling platforms and parameter estimation tools to enable animal-free risk assessment Recommendations from a joint EPAA - EURL ECVAM ADME workshop
Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2014, 68 (1): p. 119-139

CREUSOT Nicolas, AIT-AISSA Selim, TAPIE Nathalie, PARDON Patrick, BRION François, SANCHEZ Wilfried, THYBAUD Eric, PORCHER Jean-Marc, BUDZINSKI Hélène

Identification of synthetic steroids in river water downstream from pharmaceutical manufacture discharges based on a bioanalytical approach and passive sampling
Environmental Science & Technology, 2014, 48 (7): p. 3649-3657

SANCHEZ Wilfried, BENDER Coline, PORCHER Jean-Marc

Wild gudgeons (*Gobio gobio*) from French rivers are contaminated by microplastics: Preliminary study and first evidence
Environmental Research, 2014, 128: p. 98-100

LESTREMAU François, WILLEMINE Marie-Emilie, CHATELLIER Claudine, DESMOTS Sophie, BROCHOT Céline

Determination of cis-permethrin, trans-permethrin and associated metabolites in rat blood and organs by gas chromatography-ion trap mass spectrometry
Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2014: p. *Accepté*

ALBINET Alexandre, NALIN Federica, TOMAZ Sophie, BEAUMONT Jérôme, LESTREMAU François

A simple QuEChERS-like extraction approach for molecular chemical characterization of organic aerosols: application to nitrated and oxygenated PAH derivatives (NPAH and OPAH) quantified by GC-NICIMS
Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2014, 406: p. 3131-3148

MIET Killian, ALBINET Alexandre, BUDZINSKI Hélène, VILLENAVE Eric

Atmospheric reactions of 9,10-anthraquinone
Chemosphere, 2014, 107: p. 1-6

TURQUETY Solène, MENUT Laurent, BESSAGNET Bertrand, ANAV A., VIOVY N., MAIGNAN F., WOOSTER M.

APIFLAME v1.0: high-resolution fire emission model and application to the Euro-Mediterranean region
Geoscientific Model Development, 2014, 7: p. 587-612

KARR Guillaume, BOUDET Céline, Anne-Christine, BRIGNON Jean-Marc, ROUIL Laurence, RAMEL, Martine

Aide au choix de substances prioritaires en santé environnementale: un processus associant un avis d'expert et une analyse multicritère participative
Environnement, risques et santé, 2014, 13 (2): p. 135-143

PUBLICATIONS

Risques accidentels

2013

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, MARCHA 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, Christoph

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, p. 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 14th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry. Milano: AIDIC, 2013, p. 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, p. 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, p. 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, p. 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, p. 718-723

LACOME Jean-Marc, TOGNET Frédéric, OLRY 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, p. 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, p. 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: 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): p. 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) : p. 10849-10858



ESHETU Gebrekidan G., GRUGEON Sylvie, LARUELLE Stéphane, BOYANOV Simeon, LECOCQ 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): p. 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, p. 1-18

PALTRINIERI Nicolas, 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): p. 337-354

ZAREA Murès, POGNONEC Gaël, SCHMIDT Christina, SCHNUR Tilo, LANA José, BOEHM Christoph, BUSCHMANN Marco, MAZRI Chabane, RIGAUD, Eric
First steps in developing an automated aerial surveillance approach
Journal of Risk Research, 2013, 16 (3-4): p. 407-420

CHAINEAUX Jacques, JANES Agnès
Réglementation ATEX. Évaluation analytique des risques
Techniques de l'Ingénieur. Paris: Éditions techniques de l'Ingénieur, 2012, p. SE3250

CAMUS Fabrice, LENNE Dominique, PLOT Emmanuel
Designing virtual environments for risk prevention: the MELISSA approach
International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2012, 6 (1): p. 55-63

MAUGER Samuel
36 détecteurs de flamme passé au banc d'essais
Mesures, 2011 (839): p. 50-53

BAROTH Julien, PROD'HOMME Gaëtan, HANUS Jean-Luc, MEBARKI Ahmed, DAUDEVILLE Laurent
Vulnérabilité de structures soumises à des explosions. Une protection qui pourrait être améliorée
Préventique, 2013 (128): p. 9-11

DAUBECH Jérôme, PROUST Christophe, GENTILHOMME Olivier, JAMOIS Didier, MATHIEU Laurent
Hydrogen-air vented explosions: new experimental data
CARCASSI, M.N. - Proceedings of the International conference on hydrogen safety (ICHs 2013). 2013

HENRY François, BOUILLARD Jacques, MARCHAL Philippe, VIGNES Alexis, DUFAUD Olivier, PERRIN Laurent
Exploring a new method to study the agglomeration of powders: Application to nanopowders
Powder Technology, 2013, 250: p. 13-20

LE COZE Jean-Christophe
New models for new times. An anti-dualist move
Safety Science, 2013, 59: p. 200-218

WOOLLEY R.M., FAIRWEATHER Michael, WAREING C.J., FALLE S.A.E.G., PROUST Christophe, HEBRARD Jérôme, JAMOIS Didier
Experimental measurement and Reynolds-averaged Navier-Stokes modelling of the near-field structure of multi-phase CO₂ jet releases
International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 18: p. 139-149

BROWN S., MARTYNOV S., MAHGEREFTEH, H., PROUST Christophe
A homogeneous relaxation flow model for the full bore rupture of dense phase CO₂ pipelines
International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: p. 349-356

FAYET Guillaume, ROTUREAU Patricia, ADAMO Carlo
On the development of QSPR models for regulatory frameworks: The heat of decomposition of nitroaromatics as a test case
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26 (6): p. 1100-1105

JAMOIS Didier, PROUST Christophe, HEBRARD Jérôme, GENTILHOMME Olivier
La sécurité du captage et du stockage du CO₂: un défi pour les industries de l'énergie
Actes du 14^e congrès de la SFGP. Paris: SFGP, 2013 (Récents progrès en génie des procédés, 104)

ESCANDE Jean, LE COZE Jean-Christophe, PROUST Christophe, MARLAIR Guy
Signaux faibles : un concept pertinent ?
Actes du 14^e congrès de la SFGP. Paris: SFGP, 2013 (Récents progrès en génie des procédés, 104)

DAUBECH Jérôme, LECOCQ Guillaume, PROUST Christophe
Enquête sur l'accident de Buncefield : examen d'un nouveau mécanisme d'explosion
Actes du 14^e congrès de la SFGP. Paris: SFGP, 2013 (Récents progrès en génie des procédés, 104)

LEPRETTE Emmanuel, COUSIN Stéphane, SNOEYS, Jef, PROUST Christophe
Improving explosion protection methods for industrial processes: the collaborative project DELFINE
Actes du 14^e congrès de la SFGP. Paris: SFGP, 2013 (Récents progrès en génie des procédés, 104)

PROUST Christophe, GUESSASMA M., SALEH Khashayar, FORTIN J.
Amplification des effets des explosions sous l'effet du rayonnement thermique
Actes du 14^e congrès de la SFGP. Paris: SFGP, 2013 (Récents progrès en génie des procédés, 104)

ESHETU Gebrekidan G.
Li-ion battery: safety tests
Thèse de doctorat. Université de Picardie Jules Verne, 04/12/2013

DIALLO Alpha-Oumar
Contribution à la caractérisation des profils de dangers physico-chimiques des liquides ioniques
Thèse de doctorat. Université de technologie de Compiègne, 12/12/2013

PRANA Vinca
Approches structure-propriété pour la prédiction des propriétés physico-chimiques des substances chimiques
Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie Paris 6, 25/09/2013

PUBLICATIONS

HENRY François

Thermodynamique des systèmes nanodispersés: application au cas de l'agglomération de nanoparticules
Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Lorraine, 16/04/2013

VALLEE Agnès, PECOULT Christophe

Risque industriel, douze ans de réflexion
Face au risque, 2013 (497)

EVANNO Sébastien, ZDANEVITCH Isabelle

Comment l'expertise de l'INERIS accompagne l'évolution des techniques de valorisation de la biomasse et des déchets ?
L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, 2013 (Numéro thématique sur la méthanisation) : p. 31-33

CHAUMETTE Sylvain

Installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) - Établissements Seveso
Techniques de l'Ingénieur. Paris: Editions Techniques de l'Ingénieur, 2012, p. G4250

SALMON D., LEDOUX P., DUVAL, Christophe

Réflexions autour des études de dangers des digues
ROYET, Paul; BONELLI, Stéphane - Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions: 2^e colloque national - Dignes 2013. Paris: Lavoisier, 2013

MARC Florian, SALLE Benoît, BOUDALAA Mohamed, OLLIER, Yannick

Vêtements de travail et équipements de protection individuelle. Propriétés antistatiques et critères d'acceptabilité en zone ATEX
Cahiers de notes documentaires Hygiène et sécurité du travail, 2012 (227) : p. 19-27

ESCANDE Jean, PROUST Christophe, LE COZE Jean-Christophe

Les signaux faibles : pour pouvoir les utiliser, allez au-delà du miroir ?
Préventique, 2012 (125) : p. 30-35

2014

DI TOMMASO Stefania, ROTUREAU Patricia, SIRJEAN B., FOURNET R., BENAÏSSA Wassila, GRUEZ Peggy, ADAMO Carlo

A mechanistic and experimental study on the diethyl ether oxidation
Process Safety Progress, 2014, 33 (1): p. 64-69

FAYET Guillaume, ROTUREAU Patricia, MINISINI Benoît

Decomposition mechanisms of trinitroalkyl compounds: a theoretical study from aliphatic to aromatic nitro compounds
Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16 (14): p. 6614-6622

CHANCELIER Léa, DIALLO Alpha-Oumar, SANTINI Catherine, MARLAIR Guy, GUTEL Thibaut, MAILLEY Sophie, LEN Christophe

Targeting adequate thermal stability and fire safety in selecting ionic liquid-based electrolytes for energy storage
Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16 (5): p. 1967-1976

MEBARKI Ahmed, JEREZ Sandra, MATASIC Igor, PROD'HOMME Gaëtan, REIMERINGER Mathieu, PENSEE Vincent, ANH VU Quang, WILLOT Adrien

Domino Effects and Industrial Risks: Integrated Probabilistic Framework - Case of Tsunamis Effects
KONTAR, Y.A.; SANTIAGO-FANDINO, V.; TAKAHASHI, T. - Tsunami Events and Lessons Learned. Dordrecht: Springer, 2014, p. 271-307 (Advances in Natural and Technological Hazards Research, 35)

DELATOUR Guillaume, LACLEMENCE Patrick, CALCEI Didier, MAZRI Chabane

Safety performance indicators: a questioning diversity
COZZANI, Valerio; DE RADEMAEKER, Eddy - Proceedings of CISAP-6. Milano: AIDIC, 2014, p. 55-60 (Chemical Engineering Transactions, 36)

CHIARA LEVA Maria, BALFE Nora, KONTOGIANNIS Tom, PLOT Emmanuel, DE MICHELA Micaela

Total safety management: What are the main areas of concern in the integration of best available methods and tools
COZZANI, Valerio; DE RADEMAEKER, Eddy - Proceedings of CISAP-6. Milano: AIDIC, 2014, p. 559-564 (Chemical Engineering Transactions, 36)

JAMOIS Didier, PROUST Christophe, HEBRARD Jérôme

Hardware and instrumentation to investigate massive spills of dense phase CO₂
COZZANI, Valerio; DE RADEMAEKER, Eddy - Proceedings of CISAP-6. Milano: AIDIC, 2014, p. 601-606 (Chemical Engineering Transactions, 36)

MAZRI Chabane, LUCERTINI G., OLIVOTTO A., PROD'HOMME Gaëtan, TSOUKIAS Alexis

Protection of transport infrastructures against major accidents in land use planning policies. A decision support approach
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 27: p. 119-129

DI TOMMASO Stefania, ROTUREAU Patricia, BENAÏSSA Wassila, GRUEZ Peggy, ADAMO Carlo

Theoretical and experimental study on the inhibition of diethyl ether oxidation
Energy & Fuels, 2014, 28 (4): p. 2821-2829

BOUILLARD Jacques, VIGNES Alexis

Nano-Evaluris: an inhalation and explosion risk evaluation method for nanoparticle use. Part I: description of the methodology
Journal of Nanoparticle Research, 2014, 16 (2): p. art. 2149

Risques du sol et du sous sol

2013

NADIM Charles-Edouard, ROYET Paul, MERIAUX Patrice, DUVAL Christophe
Étude des méthodes éprouvées et innovantes pour la surveillance des digues 2. Colloque national « Dignes maritimes et fluviales de protection contre les submersions », 12/06/2013 - 14/06/2013, 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, 2014, 71 (2): 923-929

GOMBERT Philippe, CARRE, Jean

Toxicité et écotoxicité des principaux traceurs fluorescents employés en hydrogéologie et de leurs produits de dégradation
Karstologia, 2011 (58) : p. 41-53



LIONS J., POKRYSZKA Zbigniew, AGRINIER P., MULLER F., GRELLIER S., SQUARCIONI P.

Potential impacts of CO₂ geological storage on fresh groundwater quality: the CIPRES project

Stadium conference « Geochemical reactivity in CO₂ geological storage sites: Advances in optimizing injectivity, assessing storage capacity and minimizing environmental impacts », 25/02/2013 - 26/02/2013, Orléans,

PRUNIER Florent, LIGNON Sylvain, LAOUAFA Farid, DARVE Félix FRANCE

Modeling landslides with a material instability criterion

HICHER, P.Y. - Multiscale geomechanics: from soil to engineering projects. London: Wiley ISTE, 2011, p. 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

Tunnel et espace souterrain, 2013 (237): p. 35-41

PIRONON Jacques, DE DONATO

Philippe, POKRYSZKA Zbigniew, BARRES Odile, QUISEL Natalia, SAUSSE Judith, TAQUET Noémie, THOMAS, Stéphane

How to establish CO₂ flow/concentration warning levels based on the geochemical monitoring baseline: specific case of CO₂ storage at Claye-Souilly (Paris basin)

Energy Procedia, 2013, 37: p. 4409-4419

LAFORTUNE Stéphane, POKRYSZKA Zbigniew, BENTIVEGNA Gaëtan, FARRET Régis

From geochemical baseline studies to characterization and remediation of gas leaks: experiences and case studies of the French institute for risk management (INERIS)

Energy Procedia, 2013, 37: p. 4391-4399

LAFONT G., GUNZBURGER Yann, MITRI H.S., AL HEIB Marwan, DIDIER Christophe, PIGUET Jack-Pierre

Influence of mining excavation on energy redistribution and rockburst potential

23. World mining congress, 11/08/2013 - 15/08/2013, Montreal, CANADA

MAISON Tatiana, LAOUAFA Farid, DELALAIN Patrice

Mise au point d'un dispositif expérimental pour l'analyse du retrait-gonflement des sols argileux

DELAGE, Pierre; DESRUES, Jacques ; FRANK, Roger; PUECH, Alain; SCHLOSSER, François - Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering « Challenges and innovations in geotechnics ». 2013, p. 247-250

KRAUSE Eugeniusz, POKRYSZKA Zbigniew

Investigations on methane emission from flooded workings of closed coal mines

Journal of Sustainable Mining, 2013, 12 (2): p. 40-45

COCCIA Stella, LIZEUR Armand, BIGARRE Pascal, CONTRUCCI Isabelle, KLEIN Emmanuelle

Accurate 3D location of mine induced seismicity in complex near-field underground conditions

8. International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSIM 8), 01/09/2013 - 07/09/2013, Saint-Petersburg, RUSSIE, FEDERATION DE

LUO Haishan, LAOUAFA Farid, GUO J., QUINTARD Michel

Numerical modeling of three-phase dissolution of underground cavities using a diffuse interface model

International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013 : Accepté

DOCHEZ Sandra, LAOUAFA Farid, FRANCK Christian, GUEDON Sylvine, MARTINEAU François, D'AMATO Julie, SAINTENOY Albane

Multi-scale analysis of water alteration on the rock slope stability framework

Acta Geophysica, 2013 : Accepté

LUO Haishan, LAOUAFA Farid, DEBENEST Gérald, QUINTARD Michel

A 2D-3D adaptive mesh refinement algorithm with fully implicit scheme for solid-liquid dissolution problems using a diffuse interface mode

Computers & Geosciences, 2013: Accepté

FABRIOL Hubert, FARRET Régis

Stockage géologique du CO₂ : enjeux sur le très long terme

CHARRON, Sylvie; HERIARD-DUBREUIL, Bertrand, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire IRSN001 - Regards croisés sur la gouvernance du très long terme : Biodiversité, changement climatique, déchets radioactifs, débris spatiaux, stockage de CO₂. Paris : La Documentation française, 2013, p. 38-46

RILLARD Jean

Études des perturbations hydrogéochimiques liées au stockage géologique du CO₂ dans les aquifères salins profonds

Thèse de doctorat. Université Lyon 1, 01/03/2013

BIGARRE Pascal, VERDEL Thierry, KLEIN Emmanuelle, GUENIFFEY Yves

Cloud monitoring: an innovative approach for the prevention of landslide risks

MARGOTTINI, Claudio; CANOTI, Paolo ; SASSA, Kyoji - Landslide Science and Practice. Volume 2: Early Warning, Instrumentation and Monitoring. Berlin: Springer, 2013, p. 665-670

2014

AL HEIB Marwan, EMERIAULT Fabrice, CAUDRON Matthieu, NGHIEM Luyen, HOR Boramy

Large-scale soil-structure physical model (1g) - assessment of structure damages

International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2013, 13 (4): p. 138-152

LIONS Julie, DEVAU Nicolas, DE LARY Louis, DUPRAZ Sébastien, PARENTIER Marc, GOMBERT Philippe, DICTOR Marie-Christine

Potential impacts of leakage from CO₂ geological storage on geochemical processes controlling fresh groundwater quality: A review

International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 22: p. 165-175

RILLARD Jean, GOMBERT Philippe, TOULHOAT Pierre, ZUDDAS Pierpaolo

Geochemical assessment of CO₂ perturbation in a shallow aquifer evaluated by a push-pull field experiment

International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 21: p. 23-32

PUBLICATIONS

GAL Frédérick, MICHEL Karine, POKRYSZKA Zbigniew, LAFORTUNE Stéphane, GARCIA Bruno, ROUCHON Virgile, DE DONATO Philippe, PIRONON Jacques, BARRES Odile, TAQUET Noémie, RADILLA Giovanni, PRINET Catherine, HY-BILLIOT Joelle, LESCANNE Marc, CELLIER Pierre, LUCAS Hervé, GIBERT Fabien
Study of the environmental variability of gaseous emanations over a CO₂ injection pilot-Application to the French Pyrenean foreland
International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 21: p. 177-190

AL HEIB Marwan
Distinct Element Method Applied on Old Masonry Structures
MIDLA, Peep - Numerical Modelling. NC: InTech, 2012, p. 303-328

AL HEIB Marwan, NGHIEM Luyen, EMERIAULT Fabrice
Understanding subsidence consequences on masonry structures using large small-scale physical modeling
GAUDIN, Christophe; WHITE, David - Physical Modelling in Geotechnics Proceedings of the 8th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. Leiden: CRC Press, 2014, p. 1195-1202

BASTUG E., MENAFOGLIO A., OKHULKOVA Tatiana
Polynomial Chaos Expansion for an Efficient Uncertainty and Sensitivity Analysis of Complex Numerical Models
STEENBERGEN, R.D.; VAN GELDER, P.H.; MIRAGLIA, S.; VROUWENVELDER, A.C. - Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon. Leiden: CRC Press, 2013, p. 3153-3161

LAOUAFA Farid, FARRET Régis, VIDAL-GILBERT Sandrine, KAZMIERCZAK Jean-Bernard
Overview and modeling of mechanical and thermomechanical impact of underground coal gasification exploitation
Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2014: p. *Accepté*

NASSER H., AL HEIB Marwan, DECK Olivier
Influence of differential settlements on masonry structures
BICANIC, Nenad; MANG, Herbert; MESCHKE, Gunther; DE BORST, René - Computational modelling of concrete structures: EURO-C 2014 Conference Proceedings. Leiden: CRC PRESS, 2014, p. 819-825

GOMBERT Philippe, ORSAT Julie, MATHON David, ALBORESHA Rafid, AL HEIB Marwan, DECK Olivier
Rôle des effondrements karstiques sur les désordres survenus sur les digues de Loire dans le val d'Orléans (France)
Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014: p. *Accepté*

AL HEIB Marwan, CHERKAOUI Auxane
Rôle de l'eau dans la stabilité des carrières souterraines abandonnées et partiellement ou temporairement ennoyées et impact attendu du changement climatique
Tunnel et espace souterrain, 2013 (240): p. 468-

LAGNY Candice
Risque de sortie de gaz: les vides souterrains non ventilés mécaniquement sous surveillance
Environnement & Technique, 2014 (336): p. 64-66

Autres

2013

MERAD Myriam, DECHY Nicolas, MARCEL Frédéric, LINKOV Igor
Multiple-criteria decision-aiding framework to analyze and assess the governance of sustainability
Environnement Systems and Decisions, 2013, 32 (2): p. 305-321

CICOLELLA André
Évaluation des risques et perturbateurs endocriniens: le changement de paradigme
Médecine & Enfance, 2011, 31 (1): p. 402-405

MERAD Myriam
Les compétences collectives au cœur des processus de gestion des risques: Histoire d'un processus de recherche-intervention au sein d'un Institut public d'expertise
BREGEON, Jacques; MAULEON, Fabrice - Développement durable: comprendre et développer les compétences collectives. : Eska, 2013

MERAD Myriam
Organisations hautement durables : Gouvernance, risques et critères d'apprentissage
Paris: Lavoisier, 2013 (*Sciences du risque et du danger*)

MERAD Myriam, LLORY Michel
Aux frontières de l'expertise et de la décision
Préventique, 2013 (127): p. 18-20

AIT ABDESLAM Samira, MERAD Myriam
Du public au marché: le changement par l'apprentissage au sein des structures commerciales d'EDF
Gestion et management public, 2013, 1 (4): p. 36-62

2014

MERAD Myriam, DECHY Nicolas, LLORY Michel, MARCEL Frédéric, TSOUKIAS Alexis
Towards an analytics and an ethics of expertise: learning from decision-aiding experiences in public risk assessment and risk management
EURO Journal on Decision Processes, 2014: p. *Accepté*

PRATS Alain, DOLLADILLE Olivier
Management environnemental et maîtrise opérationnelle des activités
Techniques de l'Ingénieur. Paris: Editions Techniques de l'Ingénieur, 2014, p. G5132

NALBONE Gilles, CICOLELLA André, LAOT-CABON Sylvie
Perturbateurs endocriniens et maladies métaboliques: un défi majeur en santé publique
Santé publique, 2013, 25: p. 45-49

ROLLAND Séverine, TRIBET Magaly, JOLLIVET P, JEGOU Christophe, BROUDIC Véronique, MARQUES C., OOMS H., TOULHOAT Pierre
Influence of gamma irradiation effects on the residual alteration rate of the French SON68 nuclear glass
Journal of Nuclear Materials, 2013, 433 (1-3): p. 382-389

ROLLAND Séverine, TRIBET Magaly, JEGOU Christophe, BROUDIC Véronique, MAGNIN Magali, PEUGET Sylvain, WISS Thierry, JANSSEN Arne, BLONDEL Antoine, TOULHOAT, Pierre
Tc-99- and Pu-239-doped glass leaching experiments: residual alteration rate and radionuclide behavior
International Journal of Applied Glass Science, 2013, 4 (4): p. 295-306

Conception et réalisation : Corporate Fiction

Infographies : Sally Bornot

Crédits photos : Michel Chantrelle/INERIS (pages 4 et 6),
Fotolia (pages 10/11),
Shutterstock (couverture, pages 4/5,
20/21, 34/35),
DR INERIS

Dépôt légal : Novembre 2014 - ISSN 1765-1379

INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

Institut national de l'environnement industriel et des risques
Parc Technologique Alata - BP2 - 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 - Internet : www.ineris.fr

