

Rapport scientifique 09-10



INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |



Vincent LAFLÈCHE
DIRECTEUR GÉNÉRAL

Cette année, l'INERIS fête ses 20 ans. Cette période est caractérisée par l'explosion des préoccupations environnement/santé et par l'émergence des attentes et des exigences sociétales qui ont contribué à façonner l'évolution de l'Institut.

La maîtrise des risques technologiques est au cœur de la mission de l'Institut depuis 20 ans. Elle est aujourd'hui principalement mise au service de l'innovation pour relever les grands défis du XXI^e siècle. Il s'agit notamment d'assurer la sécurisation et l'efficacité des nouvelles filières de la croissance verte dont celles mettant en œuvre les nanoparticules, ou celles de la révolution électrique dans les transports, en sécurisant les batteries. Ces thématiques illustrent les objectifs de recherche prioritaires du futur contrat d'objectifs 2011-2015.

Acteur de l'espace européen de la recherche, l'INERIS a établi dans le prolongement de ses travaux à l'étranger des partenariats importants. Par ailleurs, l'Institut est un trait d'union entre le monde de l'entreprise et la sphère académique. En partenariat avec l'UTC, une chaire d'enseignement et de recherche a été mise en place sur le thème de la modélisation mathématique et de la biologie systémique appliquées à la toxicologie prédictive. Elle va permettre à travers la recherche partenariale d'accompagner les

industriels dans la mise en œuvre de la réglementation REACH et à terme de proposer des alternatives à l'expérimentation animale.

Les hommes et les femmes de l'Institut sont au cœur de son identité. Leur savoir-faire sur la nanotoxicologie, sur l'écotoxicologie, sur la phénoménologie accidentelle, etc., repose sur des bases acquises depuis le CERCHAR et l'IRCHA qui ont ensuite donné naissance à l'INERIS. Si les compétences se construisent dans la durée, elles doivent être identifiées avec une large anticipation pour être en mesure de développer les compétences aptes à répondre aux grands enjeux de demain. C'est l'enjeu du déploiement de la gestion prévisionnelle des emplois et des carrières, qui va permettre de valoriser les compétences scientifiques et techniques. L'attractivité des carrières sera renforcée.

Enfin, l'évolution de la société et de ses différentes cultures amènent à appréhender autrement l'innovation. L'Institut ouvre sa gouvernance scientifique à la société civile, avec la création de la nouvelle Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise (CORE). Elle est composée de six collèges : ONG, industriels, syndicats, élus, académiques et représentants de l'État. C'est un lieu de partage des enjeux et des questionnements en matière de recherche et d'expertise.

Edito

This year, INERIS is celebrating its 20th anniversary. This period has been characterised by the explosion of environmental and health concerns and by the emergence of societal expectations and requirements that have helped to shape the development of the Institute.

Technological Risk Management has been at the core of the Institute's mission for the past 20 years. At the present time, it is primarily engaged in promoting and advancing innovation to meet the major challenges of the 21st century. This involves in particular, ensuring the security and effectiveness of new green growth industries including those relating to the development of nanoparticles, and to the electric revolution in the transportation sector by further ensuring the development of electric vehicle batteries. These themes illustrate the priority research goals of the future "contrat d'objectifs" 2011-2015.

A key European actor in the area of research, INERIS has developed substantial partnerships as an extension of its work abroad. In addition, the Institute is an effective bridge linking the world of business with that of academia. In partnership with UTC, a professorship and research chair has been established in the field of mathematical modelling and systems biology applied to predictive toxicology. It will make it possible by means of research partnerships to support industry in the implementation of the REACH regulation and ultimately to develop and offer alternatives to animal testing.

The dedicated men and women who work at the Institute are at the heart of its identity. Their vast know-how with regard to Nanotoxicology, Ecotoxicology, Accident Phenomenology is supported and based on the foundations originating in the former Research and Development Centre of Charbonnages de France (CERCHAR) and the Applied Chemistry Research Institute (IRCHA) which subsequently led to the formation of INERIS. Whereas the expertise and knowledge base have been built up over time, they must also be identified with a large measure of anticipation needed in order to be well positioned to develop appropriate competences and skills essential to meet the major challenges of the future. That speaks to the challenge of being able to effectively deploy the provisional management of jobs and careers, which will help develop the scientific and technical expertise. The attractiveness of careers will be enhanced.

Finally, the evolution of society leads to different understanding of innovation. The Institute has opened its scientific governance to civil society, with the creation of the new Commission d'orientation de la recherche et de l'expertise (CORE), the research and expert evaluation steering committee. It consists of six colleges: NGOs, industry, trade unions, elected officials / leaders, academics and representatives of the State. It is a forum for discussion and for sharing of information regarding issues and concerns in the area of research and expert evaluation.

04 Stratégie de recherche

- 06 Faits marquants 2009-2010
- 08 Programmes 190 (soutenus par le ministère chargé de l'écologie)
- 09 Programmes de recherche soutenus par l'ANR
- 10 L'INERIS, partenaire de 25 programmes européens
- 11 Sujets de thèses publiés en 2010
- 12 Gouvernance scientifique
- 17 Indicateurs du contrat d'objectifs

101 Publications



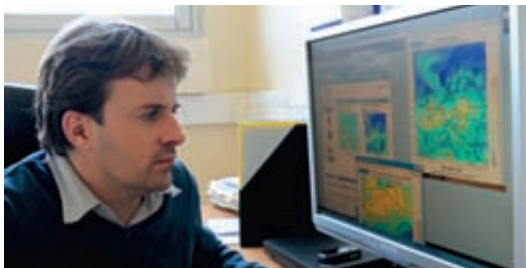
18 Qualité des eaux

- 20 Variabilité de l'échantillonnage d'un milieu aquatique
- 24 Réduction des émissions de polluants dans les eaux



36 Gestions des sols pollués

- 38 Transport des HAP dans les sols
- 41 COMRISK
- 44 Inégalités environnementales



26 Qualité de l'air

- 28 Particules générées par la combustion d'encens
- 31 La technique LIBS
- 32 Modélisation des aérosols organiques secondaires
- 35 Impact de la combustion du bois



46 Toxicologie environnementale

- 48 Toxicocinétique prédictive
- 51 Biodistribution et élimination des nanotubes de carbone
- 54 Effets endocriniens de polluants aquatiques
- 57 Essais d'écotoxicité
- 60 Biosurveillance
- 61 Recherche et REACH

Sommaire



62 Gestion intégrée des risques industriels

- 64 Évaluation probabiliste des risques industriels
- 66 Barrières de sécurité et tests de révision
- 69 Analyse organisationnelle



82 Phénomènes dangereux

- 84 Vulnérabilité des installations
- 87 EGSISTES



72 Substances & procédés

- 74 Modèles QSPR
- 77 Plateforme STEEVE
- 78 Nano-INNOV
- 79 Combustion d'un mélange pyrotechnique fuel/comburant



90 Prévention des risques du sol et du sous-sol

- 92 L'incertitude des analyses de risques de mouvements du terrain
- 95 Hydromécanique des géomatériaux
- 98 Comportement à long terme de la craie

Stratégie de recherche

En cette année d'élaboration de son prochain contrat d'objectifs (2011-2015), l'INERIS réaffirme ses quatre axes stratégiques en matière de recherche.

Il s'agit tout d'abord de renforcer son efficacité et de développer les capacités de ses chercheurs, afin que sa production scientifique et notamment les publications dans les revues à comité de lecture se renforcent, tant quantitativement que qualitativement. Dans le contexte d'un important chantier consacré à la Gestion Prévisionnelle des Emplois et des Compétences (GPEC), les carrières scientifiques seront mieux individualisées, en continuant à favoriser l'obtention de l'habilitation à diriger des recherches (HDR) ; mais aussi en structurant et rationalisant les liens avec les établissements d'enseignement supérieur et les écoles doctorales, en Picardie (UTC, UPJV, LaSalle Beauvais, ESCOM) et plus largement sur le territoire national (ParisTech, Lorraine Université, EHESP Rennes...). Ainsi, plusieurs chercheurs de l'INERIS sont déjà impliqués comme professeurs associés ou titulaires de chaires.

L'INERIS entend jouer un rôle majeur pour accompagner le développement de nouvelles filières technologiques ou énergétiques, en apportant les éléments permettant de garantir leur sécurité dès leur conception. On peut ainsi évoquer les recherches sur la sécurité des batteries électriques (plateforme STEEVE),

sur la nanosécurité (contribution au plan Nano-INNOV). Ces recherches permettent de définir les futurs référentiels de certification.

Plus généralement, l'INERIS développe de nouvelles approches pour la prédiction des dangers des substances et produits chimiques, notamment les composés dits « émergents », pour lesquels les connaissances sont encore très lacunaires. En toxicologie, les efforts se portent sur les méthodes QSAR et les stratégies dites de « tests intelligents » pour le volet *in silico* ; et sur les méthodes *in vitro*, notamment les organes bioartificiels, en partenariat avec l'UTC. L'installation de la nouvelle plateforme « méthodes alternatives », opérationnelle au printemps 2011, va permettre la validation de ces nouvelles approches qui sont au cœur des priorités de recherche du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie Sud Picardie. Le volet physicochimique n'est pas en reste : l'INERIS est à la pointe du développement des méthodes QSPR, permettant d'obtenir des estimations de plus en plus précises de grandeurs thermodynamiques relatives à l'explosibilité ou l'inflammabilité de substances énergétiques.

L'INERIS continue à renforcer sa capacité à comprendre, modéliser et prévoir les situations à risques susceptibles de se développer sur des sites dangereux (installations industrielles, sites naturels). Des investissements conséquents vont

permettre de renforcer les capacités du site expérimental de Montlaville, permettant l'acquisition de données précieuses pour la qualification des codes de calculs, désormais implémentés sur une plateforme numérique unique dans le cadre du programme de recherche EPHEDRA. Dans le domaine de la prévision de la qualité de l'air, l'Institut joue désormais un rôle renforcé de coordination nationale. Cette responsabilité accrue découle de la qualité des outils opérationnels qu'il a su développer et mettre en œuvre, en s'appuyant sur une recherche de qualité, en partenariat avec les meilleures équipes. Les recherches sur les risques liés aux cavités et ouvrages souterrains (mines, stockages) se développent, avec le souci de mettre en évidence de manière précoce les signes précurseurs des événements dommageables, et de développer les outils de gestion et d'aide à la décision les plus appropriés.

Ces programmes de recherche sont menés dans un cadre collaboratif intense. Ainsi au niveau national, l'INERIS est présent dans de nombreux projets ANR et participe à l'élaboration des feuilles de route en recherche au sein des Alliances Allenvi, Aviesan et Ancre, dont l'INERIS est membre associé. Au niveau européen, le groupement européen d'intérêt économique EuVRI, basé à Stuttgart, dont l'INERIS est membre fondateur, joue un rôle clé dans le montage et la mise en œuvre de nombreux projets européens.



Pierre TOULHOAT
Directeur scientifique

ABSTRACT

The strategic issues of research at INERIS can be summarized in four main items. The first one aims at an improved efficiency in research, by increasing the number and impact of papers published in peer-reviewed journals, and by fostering the professional evolution of our researchers, with a strong incentive to apply for a habilitation to direct research. The second strategic issue stands in the development of emerging technologies and low-carbon energy systems. This development is socially and politically accepted if risk control issues are taken into account at a very early stage in the process of innovation – for instance : emerging technologies based on engineered nanomaterials, high capacity Li-Ion batteries for transportation. At stake is the development of norms, or certification references, which will play a key role in competitiveness. Other issues concern the development of predictive methods to evaluate the hazards of products and substances, namely QSAR and *in vitro* toxicological tests, biomarkers, and QSPR methods for the *ab initio* prediction of physical and chemical properties of energetic molecules. Finally, we continuously develop modelling platforms for accidental risk assessment, environmental health or impact assessment, air quality prediction, or natural hazard assessment. Most modelling platforms need the implementation of large scale experimental facilities dedicated to data production and model validation.

Interview de Martha Heitzmann

Chargée de mission auprès de la direction générale du groupe Air Liquide, membre du Conseil Scientifique de l'INERIS

La valorisation des carrières techniques et scientifiques



Pourriez-vous nous parler de votre expérience de la gestion des carrières scientifiques chez Air Liquide ?

Dans le groupe Air Liquide nous suivons de manière spécifique les carrières de nos techniciens, ingénieurs et chercheurs depuis plus de 10 ans. Air Liquide est leader des gaz pour l'industrie, la santé et l'environnement grâce à sa stratégie et à ses experts techniques qui sont au cœur du processus d'innovation. Les collaborateurs doivent pouvoir s'épanouir dans des postes techniques sans qu'ils soient obligés d'évoluer dans la filière managériale avec pour seul but la progression de carrière. Nous avons donc imaginé une échelle de progression des carrières techniques et scientifiques – *technical career ladder* – qui est parallèle à l'échelle de responsabilité managériale. Cette échelle établit différents stades de reconnaissance pour les experts. Il y a 6 niveaux d'expertise : deux gérés au niveau des entités locales, et 4 gérés au niveau du groupe pour les experts reconnus au niveau international – Air Liquide étant présent dans 80 pays. Plus le niveau de reconnaissance est haut, plus les attentes sont fortes en termes de force de proposition auprès du management, et de capacité d'assurer le transfert de compétences dans le groupe (innovations et brevets) en formant les jeunes experts.

En quoi cela est-il intéressant pour l'INERIS, qui est en train de mettre en œuvre la Gestion Prévisionnelle des Emplois et Compétences (GPEC) ?

Le parallèle que je vois est que l'INERIS dépend lui aussi de compétences techniques et scientifiques, qu'il a besoin de motiver les gens, et doit aussi assurer le transfert des compétences sur la durée. L'INERIS, dans le cadre de la gestion prévisionnelle des emplois et des compétences, pourra, par exemple, valoriser les carrières techniques et scientifiques en proposant à ses techniciens ingénieurs ou chercheurs des échelles de reconnaissance hors responsabilité de management. Cette idée force peut être adaptée aux problématiques et spécificités de différentes entreprises. Lors du séminaire scientifique de l'INERIS, quelques idées intéressantes ont émergé, comme par exemple valoriser les ingénieurs et chercheurs qui communiquent en direction du grand public ; ou valoriser les chercheurs et ingénieurs capables de développer des compétences transversales.

Faits marquants

Panorama 2009-2010

LANCEMENT DU PNSE II

Le deuxième Plan National Santé Environnement (PNSE II) a été lancé le 24 juin 2009, suite aux engagements pris lors du Grenelle de l'Environnement. L'État a décidé de mobiliser 400 M€ sur 5 ans (2009-2013) pour la mise en œuvre de ce plan.

Deux axes prioritaires : réduire les expositions responsables de pathologies à fort impact sur la santé et réduire les inégalités environnementales. Le plan comprend 58 mesures dont 12 phares. Parmi elles, la réduction de 30 % des émissions dans l'air et dans l'eau de 6 substances toxiques d'ici 2013, plus largement la réduction de l'exposition aux substances préoccupantes, l'identification et la gestion des points noirs environnementaux. L'INERIS, qui appartient au comité de pilotage du PNSE II, participe à plus d'un tiers des 58 actions structurées en 16 fiches. Au-delà de ces deux axes majeurs, le PNSE II accorde une importance toute particulière aux risques émergents : radiofréquences, nanomatériaux, résidus de médicaments.

L'AVENANT AU CONTRAT D'OBJECTIFS SIGNÉ

L'INERIS a doté son contrat d'objectifs 2006-2010 d'un avenant signé le 23 juin 2009, pour mettre en cohérence ses actions avec les engagements du Grenelle de l'Environnement, avec cinq objectifs principaux.

1) Expertiser les innovations écoresponsables : par la démarche de certification volontaire des nouveaux produits et procédés, l'Institut accompagne les industriels dans

le développement de produits innovants et sûrs.

2) Développer la recherche en santé-environnement : l'Institut anime le Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie, en mutualisant les connaissances pour produire des outils de prédiction des dangers des substances chimiques.

3) Agir sur les substances et réduire les inégalités d'exposition géographiques : par la mise en œuvre du deuxième Plan National Santé Environnement, l'Institut s'attache notamment au respect des normes de qualité de l'air extérieur et intérieur, à l'évaluation de points noirs environnementaux.

4) Participer à l'élaboration d'un cadre national de l'expertise pluraliste : pour répondre à cet engagement, l'INERIS ouvre sa gouvernance scientifique à la société civile.

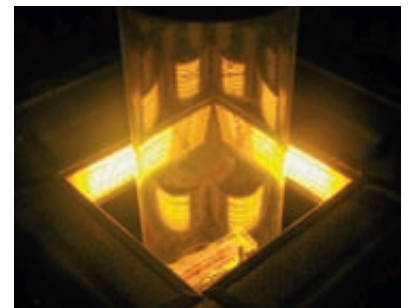
5) Poursuivre une démarche écoresponsable : la politique développement durable de l'Institut est fondée sur le référentiel SD21000.

SIGNATURE D'UNE CONVENTION ENTRE L'INERIS ET LE CSTB

Le 6 juillet 2009, l'INERIS et le CSTB ont signé une convention de collaboration de trois ans pour la création d'une Cellule d'Appui à la gestion des Situations d'Urgence (CASU) concernant l'air intérieur. Elle accompagne les autorités nationales, territoriales et municipales en charge des établissements publics recevant du public (établissements d'enseignement, établissements de soins, etc.). Outre son expertise, l'Institut apporte la capacité logistique de la CASU et son retour d'expérience technique et organisationnelle dans le domaine.

LANCEMENT DE LA PLATEFORME STEEVE

Le 22 septembre 2009, le ministre chargé de l'Industrie, Christian Estrosi, s'est rendu au CEA à Grenoble pour inaugurer la plateforme STEEVE (Stockage d'Énergie Electrochimique pour Véhicules Électriques), qui a pour but de permettre la réalisation de batteries électriques de nouvelle génération pour le transport. Cette plateforme unique en Europe réunit l'INERIS, le CEA, EDF, et l'Université de Picardie Jules-Verne. Elle s'est vue dotée par les pouvoirs publics d'une enveloppe financière de 7,5 M€. Le ministre de l'Industrie a affecté 1,8 M€ au projet porté par l'INERIS destiné à la sécurité des batteries (sécurité du cycle de vie, évaluation et certification) en lien avec l'Université de Picardie Jules-Verne (matériaux innovants). La plateforme vise ainsi à développer une synergie de compétences et de moyens qui portent sur : le prototypage de batteries Li-Ion, l'évaluation des performances électriques et du niveau de sécurité des batteries, l'optimisation de la durée de vie des batteries, la sécurité du cycle de vie et la certification des différentes technologies de batteries envisagées.



INAUGURATION DE LA NOUVELLE PLATEFORME « MÉTHODES ALTERNATIVES »

La première pierre de la nouvelle plateforme expérimentale pour la validation et le développement de méthodes alternatives en expérimentation animale a été posée sur le site de l'INERIS à Verneuil-en-Halatte le 5 février 2010 par Nicolas Desforges, préfet de l'Oise, Michel Delpuech, préfet de la région Picardie et Claude Gewerc, président du conseil régional de Picardie, en présence de Jacques Vernier, président du Conseil d'administration, et Vincent Lafèche, directeur général de l'INERIS. Il s'agit d'un équipement structurant du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie lancé en 2009 pour répondre aux exigences du Grenelle de l'Environnement et contribuer à la mise en œuvre du règlement européen



REACH sur les substances chimiques. Le but est de limiter le recours à l'expérimentation animale pour étudier les effets des substances chimiques et évaluer leurs risques biologiques. La plateforme expérimentale permettra la calibration des modèles mathématiques (approche *in silico*) et des modèles biologiques isolés (tests *in vitro*) ou organes artificiels. Dotée de 1 500 m² de laboratoires, elle disposera d'équipements dédiés à l'exposition par inhalation de nanoparticules et donnera la possibilité d'étudier les substances à l'échelle nanométrique.

VISITE DE CHANTAL JOUANNO

Madame Chantal Jouanno, secrétaire d'État chargée de l'Écologie, s'est rendue à l'INERIS le jeudi 22 avril, pendant l'épisode du nuage de cendres volcaniques en provenance d'Islande. Elle y était accueillie par Vincent Lafèche, directeur général, en présence de Nicolas Desforges, préfet de l'Oise.



Les équipes de l'Institut se sont mobilisées dès le vendredi 16 avril pour travailler à la surveillance de pics de pollution particulaire, et sur la modélisation du nuage de cendres. D'après les études effectuées par l'INERIS*, les dépassements du seuil réglementaire d'information (80 µg/m³ en moyenne journalière) pour les concentrations de PM 10 (particules dont le diamètre est inférieur à 10 µm) survenus entre le 18 et le 20 avril sont bien dus en majorité aux activités humaines ; épisode dont le constat est assez classique en cette saison. Un effet cumulé et limité du panache islandais a été relevé.

La confrontation des différents éléments permet, à ce jour, de conforter l'hypothèse issue des simulations numériques : les cendres volcaniques provenant d'Islande ont contribué à hauteur de 10 à 30 % à l'épisode de pollution particulaire observé sur la moitié nord de la France (zone géographique allant du bassin normand à la Forêt noire) avec un maximum localisé dans la région de Mulhouse. Dans tous les cas, les épisodes de pollution sont restés limités, dépassant parfois le seuil d'information (80 µg/m³), mais n'atteignant jamais le seuil d'alerte.

* À partir des mesures effectuées par les associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA).

LE SÉMINAIRE DES ORIENTATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES DE L'INERIS

Le Séminaire des Orientations Scientifiques et Techniques de l'INERIS s'est tenu à Paris le 4 juin 2010. Il réunissait les membres des différentes instances de gouvernance de l'INERIS : le Conseil Scientifique, la nouvelle Commission d'Orientations de la Recherche et de l'Expertise (CORE) – qui a pour but d'ouvrir la gouvernance de l'INERIS à la société civile –, les commissions scientifiques des risques chroniques, risques accidentels et risques du sol et sous-sol, le Conseil d'administration et les représentants du ministère de tutelle. Lors des ateliers de cette journée, 24 fiches d'orientation stratégique ont été débattues et enrichies, abordant l'ensemble des activités de l'INERIS, les activités de recherche transversale (nanos...) et les orientations stratégiques globales de l'INERIS sur les thèmes : développement durable, gouvernance, concertation, déontologie. Le séminaire a réuni 80 participants.



Prix attribué à l'INERIS

Des chercheurs de l'INERIS ont été récompensés par le prix du meilleur article présenté au 8^e symposium international sur « le risque, la prévention et la diminution des explosions industrielles » qui s'est tenu du 5 au 10 septembre 2010 à Yokohama au Japon. Il s'agit d'un congrès international sur les explosions qui a lieu tous les deux ans.

Les auteurs de l'article – Didier Jamois, Christophe Proust et Emmanuel Leprette – mènent depuis plusieurs années une recherche en collaboration avec la société américaine FIKE qui conçoit, fabrique et commercialise du matériel de protection contre les explosions. Son directeur technique, Jef Snoeys, premier auteur de l'article, poursuit une thèse co-encadrée par Christophe Proust. <http://www.dobashi.t.u-tokyo.ac.jp/ishpmie8/>

Programmes 190

(soutenus par le ministère chargé de l'écologie)
Recherche sur l'évaluation des risques
technologiques et des pollutions

Liste au 31 décembre 2009 des programmes de recherche en cours

- Évaluation intégrée (*in vitro, in vivo*) de l'écotoxicité des perturbateurs endocriniens
- Évaluation et évolution des effets suite à une exposition subchronique aux radiofréquences sur le système nerveux central du rat
- PHYSIOTOX - Modélisation physiologique d'organes bioartificiels pour prédire la toxicité des substances chimiques
- ALTERPE - Mise en place des tests toxicologiques alternatifs aux tests sur animaux dans le domaine des perturbateurs endocriniens
- CADABAP - Caractérisation des dérivés du B(a)P en atmosphère réelle et en laboratoire
- Qualité de l'air et changement climatique : impact environnemental et économique de politiques combinées
- Étude de la biodisponibilité et de la biodistribution des métaux : importance de la spéciation
- APSYRIS - Contribution des approches systémiques à la gestion des risques « NaTech »
- INCERTITUDES - Quantification et propagation des incertitudes dans l'estimation des risques
- REPLACE - Recherche sur les propriétés et l'activité de composés explosifs
- ProMiGaz - Mécanismes de production et de migration de gaz en souterrain et maîtrise des risques afférents
- Phénoménologie des instabilités géologiques en grand et signes précurseurs
- Écotoxicologie des perturbateurs endocriniens
- DYSHORMO : déséquilibre de la balance androgènes/oestrogènes dans le mécanisme de perturbation endocrinienne et de la cancérogenèse hormono-dépendante
- Approche de biologie systémique pour l'étude de la cancérogenèse et de la perturbation endocrinienne
- Amélioration de la prise en compte des sources d'émissions agricoles et maritimes à l'échelle régionale dans un modèle de qualité de l'air
- Étude de la composition chimique de la composante organique des particules secondaires en site réel et en atmosphère simulée
- Contributions au développement et application d'outils de simulation couplés chimie-transport pour l'évaluation des risques liés au transfert des polluants organiques et inorganiques dans les matrices complexes
- Effets des nanotubes de carbone sur l'appareil respiratoire. Rôle de leurs caractéristiques physico-chimiques
- RIPER : étude des Risques liés à la PEROxydation des produits chimiques (caractérisation expérimentale, modélisation cinétique et moléculaire)
- SURBAT : Sécurité des Structures Urbaines contre le risque technologique et les agressions terroristes
- QUASSI : QUALification de la Sécurité de fonctionnement des Systèmes Industriels
- SécuStock : risques inhérents à l'utilisation des batteries et des supercondensateurs de fortes puissances et de fortes capacités
- Incidence de la dissolution et du transport dans les formations géologiques solubles sur l'aménagement du territoire - Analyse et modélisation de l'évolution spatio-temporelle des cavités de dissolution
- Prise en compte de l'interaction sol-structure dans l'étude de l'impact des mouvements de terrains : approche expérimentale et numérique
- SECU_CO₂ : risques, critères de sécurité et impact sur l'environnement de la filière Captage – Transport – Stockage de CO₂
- Écotoxicologie des perturbateurs endocriniens
- INFLATOX : évaluation précoce de la toxicité : approches *in silico* et apport des études sur l'inflammation
- TransSed : compréhension et prédiction des Transferts de polluants contenus dans les Sédiments de dragage valorisés à terre
- CHIMERE URBAN : vers une meilleure connaissance des sources et des expositions pour une gestion de la qualité de l'air en ville
- Programme pluridisciplinaire Nano : caractérisation et mesure, toxicologie, modélisation du transport
- CADESEC : CARactérisation et DEvenir de Systèmes Emergents Complexes en situations accidentelles associées ou non à des effets thermiques
- EPHEDRA (3^e tranche) : modélisation des effets des phénomènes dangereux pour l'évaluation des risques accidentels dans l'industrie
- HYDROGENE : étude des risques liés à la filière hydrogène, caractérisation expérimentale, barrières de sécurité, normalisation
- EVARISTE : EVALuation des RISques à long TERme liés au stockage souterrain du CO₂

Programmes de recherche

soutenus par l'Agence nationale de la recherche - ANR
(en cours au 1^{er} septembre 2010)

2006	
V3F	Virtual reality for safe SEVESO subcontractors
ECLAIR	Évaluation environnementale du comportement d'un laitier LD utilisé en Infrastructure routière
REMPARE	Re-ingénierie des merlons de protection par composants anthropiques recyclés
2007	
μ HepaReTox	Développement d'un modèle d'interaction tissulaire hépato-rénal dans une puce à cellule microfluidique : application au criblage pharmaceutique <i>in vitro</i>
SENTINELLE	Monitoring de surface de sites de stockage de CO ₂
COREGI	Exploitation des corpus pour l'analyse organisationnelle
BIOMAP	Analyse environnementale, socio-technico-économique et évaluation des risques des filières bioénergies : applications pratiques à différentes problématiques
PROSPED	Développement de procédés physiques pour la valorisation des sédiments de curage
SEDiGEST	Gestion durable des sédiments de dragages des ports : élaboration d'une méthodologie de validation de la filière « restauration de cavités terrestres de la bande littorale »
HPPP-CO ₂	High pulse poroelasticity protocol for geophysical monitoring of CO ₂ injection in reservoirs
VULCAIN	Étude de la vulnérabilité des structures industrielles soumises à des sollicitations dynamiques : explosions ou impacts d'origine accidentelle ou malveillante
AIDHY	Aide à la décision pour l'identification et l'accompagnement aux transformations sociétales induites par les nouvelles technologies de l'hydrogène
HYPE	Réservoir hydrogène haute pression
CANTO	Intégration de méthodes d'analyse décisionnelle et de chimie prédictive pour l'évaluation de la toxicité
SYSBIOX	Approche systémique basée sur des méthodologies <i>in vitro</i> et <i>in silico</i> innovantes pour prédire la toxicité de substances
SKOOB	Structuring Knowledge with Object Oriented Bayesian nets
AQUANANO	Transfert de nanoparticules manufacturées dans les aquifères : développement d'une méthodologie et identification des processus
NANOFEU	Impact des nanocharges sur le comportement au feu
2008	
CLEANWAST	Évaluation des technologies propres et durables de gestion des déchets
MEGAPOLI - PARIS	Pollution des aérosols : impact sur la qualité de l'air et scénarios
FLUXOBAT	Développement d'outils optimisés pour l'évaluation des transferts de COV depuis une source dans le sol ou la nappe vers l'air atmosphérique et l'air intérieur des bâtiments
DIMITHRY	Données et Instrumentation de la MITigation du Risque HYdrogène pour des applications grand public des systèmes pile à combustible
CYRANO-1	Canalisations hYdrogène pour Réserve tAmpon d'éNergie renOUvelable
ATESTOC	Stockage d'énergie thermique en aquifère pour la réalisation d'écoquartier : étude du site de Château-Thierry
NEED	Effets neuroendocrines de perturbateurs endocriniens, xénoestrogènes et dioxines, sur les circuits centraux de contrôle de la reproduction, notamment les systèmes à GnRH
AgingNano&Troph	Impact environnemental des résidus de dégradation des nanomatériaux (RDNs) commercialisés : devenir, biotransformation et toxicité vis-à-vis d'organismes cibles d'un milieu aquatique
RISKER	Recherche intégrée des impacts sanitaires et environnementaux de la contamination par les polluants organiques persistants aux îles Kerguelen
NANOSEP	Procédés d'agrégation et de séparation des nanoparticules
NANOCARA	Caractérisation globale (taille, concentration, composition) en ligne, des nanoparticules produites par des procédés en phase gazeuse
QUAD_BBC	Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les bâtiments à basse consommation d'énergie
2009	
AMORE	Analyses multicritères pour le développement d'outils d'aide à la décision en vue de la prévention des risques environnementaux
SLAMS	Études multidisciplinaires du mouvement de Séchilienne : aléas, risques associés et conséquences socio-économiques
NANOFRESES	Nanoparticules de fer pour la remédiation des eaux souterraines
2010	
ECHIBIOTEB	Outils innovants d'échantillonnage, d'analyses chimiques et biologiques pour le suivi de traitements avancés des eaux usées et des boues
INCERDD	Prise en compte des incertitudes pour les décisions durables
PREDIMOL	Prédiction des propriétés physicochimiques des produits par modélisation moléculaire
TRISTAN	Structures intrinsèquement sûres aux tirs d'armes et aux engins improvisés
BARPPRO	Dimensionnement des barrières physiques de protection contre la propagation d'ondes de souffle consécutives à une explosion

Pour 2010, la liste comprend les programmes retenus à la date du 1^{er} septembre 2010, plusieurs programmes étant encore en cours d'évaluation.

Programmes coordonnés par l'INERIS



L'INERIS, partenaire de 25 programmes européens

(au 1^{er} septembre 2010)

INTARESE	Integrated assessment of health risks from environmental stressors in Europe
SAPHIR	Controlled production of high tech multifunctional products and their recycling HyCHAIN
MINI-TRANS	Deployment of innovative low power fuel cell vehicle fleets to initiate an early market for hydrogen as an alternative fuel in Europe
2-FUN	Full-chain and uncertainty approaches for assessing health risks in future environmental scenarios
GEOMON	Global earth observation and monitoring
CITYZEN	megaCITY - Zoom for the ENvironment
PREDICT - IV	Profiling the toxicity on new drugs : non animal approach integrating toxicodynamics and biokinetics
NANODEVICE	Portable easy to use device for measurement of airborne engineered on nanoparticles in workplace air
MACC	Monitoring Atmospheric Composition and Climate
iNTeg-Risk	Early Recognition, Monitoring and Integrated Management of Emerging, New Technology Related, Risks
ALFA-BIRD	Alternative Fuels and Biofuels for Aircraft Development
FLOMINET	Flooding management of underground coal
EC4MACS	European Consortium for Modelling of Air Pollution and Climate Strategies
AQUAREHAB	Development of REHABilitation technologies and approaches for multipressured degraded waters and the integration of their impact on river basin management
NANOFOL	Folate-based nanobiodevices for integrated diagnosis / therapy targeting chronic inflammatory diseases
GedSet	Gestion durable des sédiments transfrontaliers
Citeair II	Common Information to European Air
Diese	Determination of pertinent Indicators for Environmental monitoring : a strategy for Europe
Citychlor	Contamination with chlorinated solvents in urban areas
HELIOS	High Energy Lithium-Ion Storage Solutions
CO2HAZPIPE	Quantitative Failure Consequence Hazard Assessment for Next Generation CO2 Pipelines : The Missing Link
NANOCARA	Caractérisation des procédés de fabrication des nanoparticules
CARBOLAB	Improving the knowledge of carbon storage and coal bed methane production by "in situ" underground tests
FONTIS	Validation de méthodes et d'outils de reconnaissance et surveillance de zones à risque de fontis
MISSTER	MIne Shafts : improving Security and new Tools for the Evaluation of Risks

Programmes coordonnés par l'INERIS ■

Sujets de thèses sélectionnés en 2010

Risques accidentels

Modélisation des jets diphasiques des gaz liquéfiés sous pression

Contribution à la caractérisation des profils de dangers physicochimiques des liquides ioniques

Approches structure-propriété pour la prédiction des propriétés physicochimiques des substances chimiques

Risques chroniques

Modélisation de la dynamique de population témoin en mésocosmes

Impact des perturbateurs endocriniens sur la différenciation sexuelle chez le poisson zèbre

Intérêt des organismes de la microfaune et de la mésofaune du sol dans la détermination de l'écotoxicité des matrices complexes : application de deux bioessais, *Hypoaspis aculeifer* et *Caenorhabditis elegans* pour l'étude de l'écotoxicité des matières fertilisantes organiques et déchets valorisés en agriculture

Effets des téléphones portables sur la physiologie humaine : vascularisation cérébrale, électroencéphalogramme et échauffement cutané

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

Détection de polluants métalliques d'origine nanoparticulaire dans les eaux par spectroscopie de plasma induit par laser

Comportement à long terme, caractérisation opérationnelle et évaluation environnementale des contaminants organiques des sédiments issus des activités de dragage

Dosage des pesticides des nouveau-nés picards dans le méconium et cartographie de l'exposition

Risques du sol et du sous-sol

Transport réactif au travers des roches argileuses et impact sur les propriétés des roches couvertures

Évaluation des risques et définition de seuils critiques pour la filière captage-transport-stockage du CO₂

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

Gouvernance scientifique

L'organisation

Les instances d'orientation et d'évaluation des activités scientifiques de l'INERIS comportent : un Conseil scientifique, trois Commissions scientifiques spécialisées, et une nouvelle Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise, la CORE.

Le Conseil scientifique

Son rôle est stratégique. Il se prononce sur l'intérêt pour l'INERIS de s'orienter vers tel ou tel domaine de recherche. Le Conseil donne également un avis global sur la production scientifique de l'Institut en se référant à des indicateurs académiques standards (nombre total de publications, dont nombre d'articles dans des revues à comité de lecture).

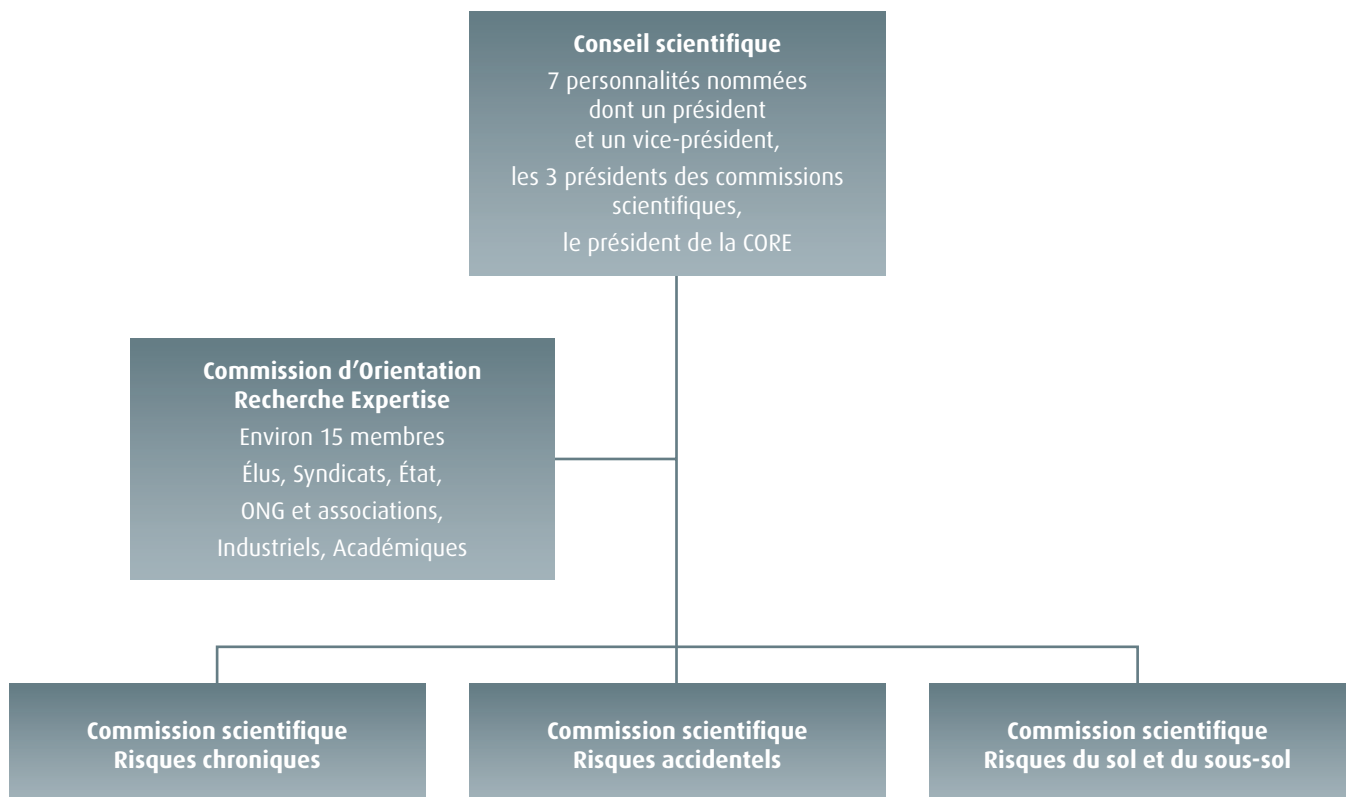
Les commissions spécialisées

Elles ont une activité d'évaluation plus opérationnelle et sont mises à contribution pour :

- conduire une évaluation des programmes de recherche que l'INERIS envisage de lancer dans le cadre de sa dotation budgétaire annuelle. En pratique, elles donnent ainsi chaque année leur avis sur la pertinence et la qualité de conception de 12 à 15 nouveaux programmes.
- conduire une évaluation des programmes de recherche achevés et donner leur avis sur certains programmes en cours de réalisation.
- assurer également l'évaluation, à tour de rôle, des différentes équipes opérationnelles de l'INERIS.

Une nouvelle commission : la CORE

La création d'une nouvelle instance de gouvernance scientifique et technique pour l'INERIS a été approuvée par les membres du Conseil d'administration fin 2009. La Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise est devenue opérationnelle en mars 2010. Cette nouvelle commission doit ouvrir la gouvernance scientifique de l'Institut à la société civile. Pour cela, elle réunit six collèges : ONG, syndicats, élus, monde académique, industriels, représentants de l'Etat (voir p. 14).



Le Conseil scientifique (au 26 novembre 2009)

Neil MITCHISON

Président du conseil

Représentant de la Commission européenne en Écosse

Christian BLAISE

Écotoxicologue à l'Institut Saint-Laurent
Responsable de l'Unité de Toxicologie
Aquatique
Montréal, Québec, Canada

Martha HEITZMANN

Chargée de mission
auprès de la direction générale
du Groupe Air Liquide

Francelvne MARANO

Vice-présidente

Professeur des universités
Laboratoire de Cytophysiologie
et Toxicologie cellulaire (LCTC)
Université Paris 7 - Denis Diderot

Alain DESROCHES

Professeur
Codirecteur du Pôle Santé et Biotechnologies
École centrale Paris

Patrick LANDAIS

Directeur scientifique
ANDRA

Véronique BACH

Professeur des universités en Physiologie
Humaine
Université Picardie Jules-Verne

Invités permanents au Conseil scientifique

Patrick FLAMMARION

Président de la commission

« Risques chroniques »

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

Christian DELVOSALLE

Président de la commission

« Risques accidentels »

Professeur chef de service de Génie des
Procédés chimiques
Faculté polytechnique de Mons
Belgique

Jean-Louis DURVILLE

Président de la commission

« Risques sol et sous-sol »

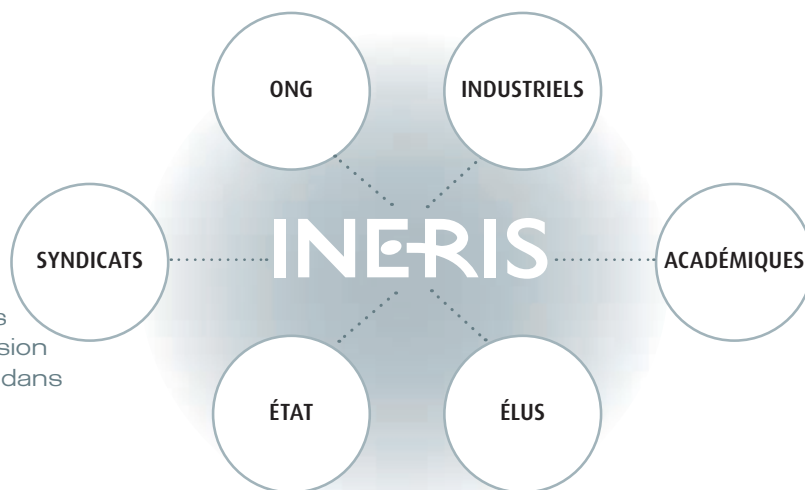
Ministère de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement Durable
et de la Mer MEEDDM
Conseil Général des Ponts et Chaussées

La Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise

Approuvée en 2009 et opérationnelle depuis mars 2010, la CORE ouvre la gouvernance scientifique de l'INERIS à la société civile.

Elle réunit six collèges : ONG, syndicats, élus, monde académique, industriels et représentants de l'État.

Les missions de la CORE sont : le partage des enjeux et des questionnements ; l'appui à la diffusion des résultats ; la contribution à la programmation des travaux scientifiques et techniques. 2010 est une année pilote. Le statut, les missions et les membres définitifs de cette commission seront entérinés par un arrêté ministériel dans les prochains mois.



Les 6 collèges de la CORE

Interview de Neil Mitchison

Président du Conseil scientifique de l'INERIS,
et Représentant en Écosse de la Commission européenne



Nous assistons à la formalisation de l'ouverture vers d'autres acteurs

Comment voyez-vous l'évolution de la gouvernance scientifique de l'INERIS ?

Depuis plus de dix ans, je participe aux instances externes de Conseil et d'Orientation Scientifique de l'INERIS. Nous avons vu se développer l'effort dédié à la recherche, les liens entre les activités de recherche et celles de l'appui et de l'expertise, les partenariats (français et internationaux) et surtout l'orientation européenne et internationale de l'Institut. Celui-ci semble déterminé à renforcer son autorité intellectuelle en France dans le domaine de l'évaluation du risque et de ses conséquences, et à participer de plus en plus sur la scène européenne en tant qu'acteur de premier niveau. À mon avis, l'Institut a connu un franc succès dans son domaine ; il est bien connu et reconnu par les experts du risque mais aussi par les clients qui utilisent ses évaluations.

Qu'attendez-vous de la nouvelle Commission d'Orientation de la Recherche et de l'Expertise (CORE) ?

Avec la création de la CORE, nous assistons à la formalisation de l'ouverture vers d'autres acteurs externes. Il n'y a pas que l'autorité intellectuelle qui est en jeu, mais aussi une autorité politique et morale. Il faut que l'INERIS reçoive et intègre dans sa stratégie les points de vue, les espoirs et les craintes d'une gamme d'acteurs beaucoup plus large que ceux représentés dans le Conseil et les Commissions Scientifiques. Ces considérations doivent représenter un point de départ pour les grandes décisions stratégiques de l'Institut. C'est dans cette optique que je souhaite voir une étroite coopération entre la CORE, le Conseil et les Commissions Scientifiques, et l'Institut proprement dit. Bien sûr, cette ouverture de l'INERIS vers d'autres acteurs n'est pas un phénomène isolé : elle entre en résonance avec l'évolution du monde qui nous entoure. La réponse aux questions scientifiques est du ressort des experts. Cependant nous souhaitons tous participer à la formulation des questions. Voilà le principe fondateur de la CORE.

Les Commissions scientifiques

Risques chroniques

Patrick FLAMMARION

Président

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

Scott ALTMANN

Vice-président

Chef du service « Transfert des Radionucléides »
Direction Scientifique ANDRA

Robert BAROUKI

Directeur Unité INSERM U747
UFR biomédicale
Université de Paris 5 - René Descartes

Jean-Yves BOTTERO

Directeur de Recherche CNRS
Directeur de l'IFR112 PMSE
CEREGE UMR 6635 CNRS
Université Paul Cézanne
Aix-en-Provence

Marie-Thérèse BRONDEAU

INRS
Chef du Département « Polluants et Santé »
Vandoeuvre-lès-Nancy

Hélène BUDZINSKI

Institut des Sciences Moléculaires (ISM)
UMR 5255 CNRS
Laboratoire de Physico et Toxico-Chimie de l'environnement (LPTC)
Université Bordeaux 1

Pierre-André CABANES

EDF-Gaz de France
Adjoint au directeur du Service des Études Médicales

Claude CASELLAS

UMR 5569 « Hydrosociences »
Département Sciences de l'Environnement et Santé Publique - IPU - Faculté de Pharmacie Montpellier

Christian COCHET

Chef de la Division Santé
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

Louis DE GIMEL

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

Éric PARENT

Enseignant-chercheur
École Nationale du Génie Rural Eaux Forêts (ENGREF)

Laurent PEROTIN

EDF R&D - Chef de département
Laboratoire national d'Hydraulique et Environnement

Laurent ROSSO

Directeur École Nationale du Génie Rural Eaux et Forêts (ENGREF)

Dimosthenis A. SARIGIANNIS

Physical and Chemical Exposure
Institute for Health and Consumer Protection
European Commission - Joint Research Centre
Ispra, Italie

Christian SEIGNEUR

CEREA
École Nationale des Ponts et Chaussées

Paule VASSEUR

Professeur de toxicologie
Université de Metz EBSE
UFR Sciences fondamentales appliquées

Risques accidentels

Christian DELVOSALLE

Président

Faculté polytechnique de Mons - Belgique
Chef du service Génie des Procédés chimiques

Philippe KLEIN

Vice-président

Chef du Département Management des Risques Industriels
EDF - Recherche et Développement

Alain CHETRIT

Chargé de mission Risques Technologiques
TOTAL

Jean-Marie FLAUS

Laboratoire d'Automatique de Grenoble
École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Électriciens de Grenoble (ENSIEG)

Franck GUARNIERI

Directeur - École des Mines de Paris
Pôle Cindyniques Sophia Antipolis

Éric ISSARTEL

Responsable sécurité incendie
Direction Générale des Opérations L'ORÉAL

Pierre-Étienne LABEAU

Professeur Service de Métrologie Nucléaire
Faculté des Sciences Appliquées
Université Libre de Bruxelles
Belgique

Jean-Paul LACOURSIERE

Université de Sherbrooke
Département de génie chimique
Québec, Canada

Yves MORTUREUX

Union internationale des chemins de fer

François MURGADELLA

Responsable du programme « Sécurité globale » à l'Agence Nationale de la Recherche

Abdelhamid NAZIH

EADS ASTRIUM - Service Sûreté Nucléaire

Laurent PERRIN

École Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC)
Nancy

Christophe RENIER

GAZ DE FRANCE
Directeur d'objectifs infrastructures

Isabelle SOCHET

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges (ENSIB)

Richard TURCOTTE

Natural Resources Canada
Canadian Explosives Research Laboratory
CANMET
Ottawa, Ontario, CANADA

Les Commissions scientifiques - suite

Risques du sol et du sous-sol

Jean-Louis DURVILLE

Président

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable, et de la Mer
Conseil Général des Ponts et Chaussées

Francois-Henri CORNET

Vice-président

Institut de Physique du Globe de Strasbourg

Dominique BRUEL

École des Mines de Paris
Centre de Géosciences
Fontainebleau

Didier de BRUYN

Centre d'Étude de l'énergie nucléaire
(SCK-CEN)
Chef de la Section MYRRHA-Design
Département Physique des Réacteurs

Denis FABRE

Professeur au CNAM
Chaire de Géotechnique

Pierre-Lionel FORBES

Directeur du Laboratoire de recherche
de Meuse/Haute-Marne
ANDRA

Alain GUILLOUX

Président-directeur-général
TERRASOL

Vincent LABIOUSE

Maître d'Enseignement et de Recherche
Rock Mechanics Laboratory LMR
School of Architecture, Civil and
Environmental Engineering ENAC
Swiss Federal Institute of Technology
Lausanne - EPFL - ENAC - ICARE - LMR
Suisse

Laurent LEVEQUE

Responsable Équipe Géologie
TEGG - SGG
Aix-en-Provence

Xavier PICCINO

Inspection Générale des Carrières
Mairie de Paris

Pierre POTHERAT

Chef du groupe Mécanique des Roches
CETE de Lyon
Laboratoire des Ponts et Chaussées de Lyon

Jean-Francois THIMUS

Professeur
Université catholique de Louvain
Louvain-la-neuve
Belgique

Maxence VERMERSCH

Directeur
MAVESA

Invités permanents

Hafid BAROUDI

Directeur
GEODERIS
Metz

Francois HEDOU

Chargé de Mission de la Prévention des
Risques Mouvements de Terrain (MEEDDM)

Yves GUISE

Directeur
SOGIMINES

Serge MIRAUCOURT

Adjoint au chef du bureau, chargé de
l'après-mine et des stockages souterrains
(MEEDDM)

Indicateurs du contrat d'objectifs 2006-2010

	2006	2007	2008	2009
Nombre total de publications	295	318	314	319
Nombre de publications dans des revues à comité de lecture <i>dont ISI</i>	68 48	68 54	68 57	92 74
Nombre de communications dans des congrès	237	285	305	296
Productivité de la recherche sur fonds publics (nombre de publications/100K€)	3,2	3	2,7	2,4
Financement de la recherche de l'INERIS par d'autres sources publiques que le Programme 190 (K€)	2 399	3 310	3 182	4112
Chiffre d'affaires en recherche partenariale (K€)	5 562	3 310	3 192	2390
Nombre de brevets	4	4	4	4
Contribution ⁽¹⁾ de l'INERIS à la production scientifique des opérateurs du Programme 190				
- Part française de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire ‰	0,55	0,45	ND	ND
- Part européenne de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire ‰	0,07	0,06	ND	ND
- Part mondiale de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire ‰	0,02	0,02	ND	ND
Contribution de l'INERIS à la reconnaissance scientifique des opérateurs du Programme 190				
- Part mondiale de citation reçues par les publications de l'INERIS et indice d'impact relatif sur 2 ans, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire ‰				
• Part mondiale de citations	0,02	ND*	ND	ND
• Indice d'impact relatif ⁽²⁾	0,66	ND	ND	ND

* ND non disponible

Nombre et taux de participation de l'INERIS aux projets financés par les Programmes-cadres de l'Union européenne (PCRD) ⁽³⁾	5 ^e PCRD		6 ^e PCRD		7 ^e PCRD	
	Nombre	Taux ‰	Nombre	Taux ‰	Nombre	Taux ‰
• Participations	21	0,29	21	0,37	4	0,19
• Coordinations (* <i>via</i> Eu-VRI)	4	0,33	3	0,63	2*	ND

(1) Calcul par l'OST (Observatoire des Sciences et Techniques).

(2) Un indice d'impact de 1 indique que la visibilité des publications de l'INERIS est égale à la moyenne des publications.

(3) Données arrêtées par l'OST au 1^{er} avril 2009 pour le 6^e et 7^e PCRD.

Les indicateurs de moyens associés à l'activité de recherche

Évaluation des équipes et des travaux de recherche	2006	2007	2008	2009
Nombre d'équipes évaluées	4	5	6	6
Attractivité des parcours professionnels				
Nombre de HDR (habilitations à diriger des recherches)*	8	11	10	10
Nombre de doctorants et de postdoctorants*	45 1	47 2	52 2	52 1
Nombre de personnes en mission de longue durée à l'étranger*	2	3	2	2
Nombre de personnes ayant un diplôme ou une carrière internationale*	64	64	75	77

* Au 31 décembre 2009.

Qualité des eaux.



S'inscrivant dans le vaste chantier engendré par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) et dans le plan national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par les micropolluants, l'activité scientifique de l'INERIS comporte trois axes majeurs de recherche et développement pour répondre aux enjeux de la qualité des eaux.

Détection et analyse des substances chimiques dans les milieux

L'objectif est de développer la capacité d'expertise en appui aux politiques de surveillance de la qualité des eaux vis-à-vis des micropolluants.

Plusieurs champs d'action sont nécessaires pour appuyer la stratégie scientifique et technique d'AQUAREF, le laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques :

- le développement des méthodes de prélèvements et d'analyses chimiques dans différentes matrices, les eaux naturelles et eaux résiduaires en particulier (voir article p.20) ;
- l'adaptation et la validation de nouveaux outils (échantillonneurs passifs et outils d'analyse chimique de *screening*) ;
- l'amélioration de l'interprétation des données, par des développements métrologiques, mais aussi par la prise en compte de la biodisponibilité ;
- la proposition d'indicateurs pertinents pour l'évaluation de la qualité des eaux.

Ces travaux concernent les substances d'ores et déjà réglementées, et aussi les polluants émergents. Ainsi, l'INERIS participe aux actions scientifiques du réseau européen NORMAN de laboratoires de référence et de recherche pour la surveillance des substances émergentes dans l'environnement. L'une des actions en cours est la priorisation de ces substances pour organiser leur surveillance dans les milieux aquatiques en particulier.

Effets sur les écosystèmes et évaluation de la contamination des milieux

L'évaluation de la contamination des milieux aquatiques consiste notamment à comparer des concentrations en micropolluants dans le milieu aux normes de qualité environnementale (NQE). L'INERIS définit ces valeurs seuils pour les substances pertinentes au niveau national et réalise des développements méthodologiques relatifs à l'élaboration des NQE.

Par ailleurs, l'INERIS mène des travaux de recherche orientés sur les mécanismes d'action des substances, conduisant à des outils d'évaluation des dangers des substances pour les écosystèmes aquatiques, et de caractérisation de la qualité du milieu (approches biomarqueurs et bioanalytique). Ces indicateurs biologiques complémentaires aux analyses chimiques et biocénétiques conventionnelles offrent des perspectives pour la surveillance des milieux (voir « Toxicologie environnementale p. 46 »).

Identification des sources et voies de réduction des contaminations

La maîtrise des flux de polluants nécessite, à terme, d'étudier toutes les sources de contamination des milieux aquatiques par les substances polluantes et d'identifier les leviers d'action pour la gestion intégrée et la réduction des rejets de ces substances.

Dans ce cadre, l'INERIS contribue à la modélisation des apports de contaminants aux milieux aquatiques ; à la détermination de facteurs d'émission ; au développement de stratégies de réduction des émissions de polluants à l'échelle de bassins versants (voir article p. 24) ; à la proposition d'outils permettant de répartir les flux maximum admissibles sur un bassin versant et de fixer des valeurs limites d'émission (VLE) de certaines substances dangereuses rejetées par les industriels.

ET DEMAIN

Poursuivre la mise en œuvre de la DCE et du plan national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par les micropolluants, en renforçant ou développant :

- la métrologie dans les eaux ;
- les outils de *screening* pour identifier la présence de substances dans le milieu ou les rejets, en particulier de polluants émergents ;
- les techniques alternatives d'analyse en vue d'optimiser le rapport coût/bénéfice de la surveillance ;
- les approches opérationnelles de surveillance intégrée : couplages mesures/modélisation et introduction des approches par les effets dans les programmes de surveillance ;
- la connaissance des sources de pollution, du devenir des contaminants dans l'environnement et la caractérisation de leurs effets ;
- les stratégies pour la réduction ou la suppression des émissions de polluants prioritaires ;
- l'interopérabilité des bases de données sur la qualité des milieux et des rejets, et sur les propriétés des substances chimiques.

Variabilité de l'échantillonnage d'un milieu aquatique



M. P. Strub

Depuis deux décennies, les décideurs du domaine de l'eau et du milieu aquatique font pression sur les laboratoires pour qu'ils améliorent la fiabilité des données fournies afin d'améliorer la conformité des résultats de surveillance des milieux avec la réglementation en vigueur. En premier lieu, la réponse consiste à améliorer la chaîne d'analyse *via* l'application de procédures d'assurance qualité. Ce processus, pris en charge à travers l'accréditation, a connu sa limite au début du nouveau millénaire car l'influence de l'échantillonnage sur le résultat n'était pas prise en compte. L'échantillonnage se définit comme le fait de prélever plusieurs échantillons représentatifs d'un milieu aquatique. Bien que cette influence ait été reconnue depuis 1980, avec la publication du premier guide de la série ISO 5667 traitant des différents aspects de l'échantillonnage, les

efforts ont essentiellement porté sur la description et la validation du processus analytique applicable à partir de l'entrée de l'échantillon au laboratoire. Les mesures propres à assurer des conditions d'échantillonnage adéquates y sont parfois décrites, mais pas systématiquement. Dans le cas contraire, il est souvent fait appel à la norme ISO 5667-3 [1] relative à la préservation et la manipulation de l'échantillon. Les 19 autres parties de ce recueil de lignes directrices sont rarement utilisées, étant considérées comme trop théoriques et insuffisamment descriptives. En outre, les normes de cette série n'ont jamais été validées par des comparaisons interlaboratoires et la variabilité associée à leur utilisation n'a donc jamais été établie.

Ainsi, alors que l'incertitude associée au résultat analytique d'une mesure effectuée pour la surveillance de l'environnement peut être estimée par plusieurs moyens communément admis, la variabilité introduite par la réalisation d'un échantillonnage des milieux aquatiques en conditions réelles reste inconnue.

Bien que partagée par de nombreux organismes de recherche agissant en soutien des autorités réglementaires dans leurs pays respectifs, cette préoccupation n'a débouché que sur quelques rares tentatives pour en quantifier les effets réels. Aucun organisateur d'essais interlaboratoires ne propose de telles campagnes, et

le seul essai publié [2] a été conduit en 2007 par le Centre Commun de Recherche (Joint Research Centre JRC) de la Commission européenne. Au cours de cette campagne, neuf laboratoires institutionnels européens ont prélevé des échantillons réputés identiques sur le Pô, à Pontelacoscuro près de Ferrare, et réalisé les analyses correspondantes dans leurs propres laboratoires. Les résultats n'ont pas permis d'identifier quelle partie de la variabilité interlaboratoire est introduite par l'analyse, et quelle partie peut être attribuée à l'échantillonnage.

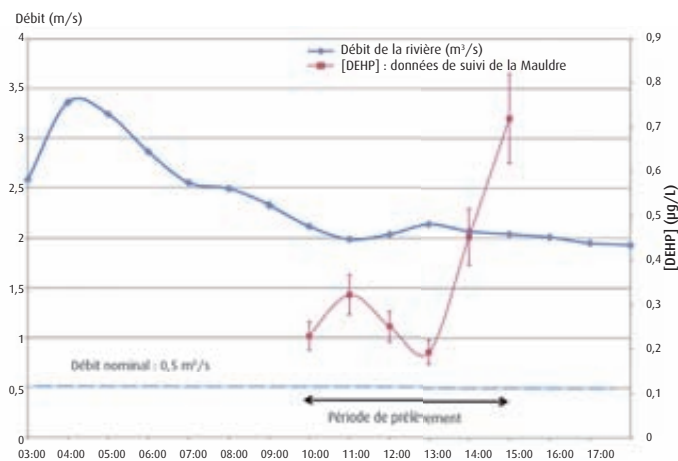
C'est pourquoi, dans une tentative innovante d'approche des différentes procédures de prélèvement utilisées pour la surveillance de l'environnement, de leur champ d'application et de la variabilité qui en résulte, l'INERIS, avec le soutien du ministère français chargé de l'Écologie, a organisé en juin 2007 le premier essai collaboratif de terrain national, réunissant les 14 équipes sous-traitantes des autorités françaises d'échantillonnage dans le cadre du déploiement de la Directive Cadre sur l'eau (DCE).

CONCEPTION DE LA CAMPAGNE

La campagne devait servir plusieurs objectifs :

- la connaissance des procédures réellement utilisées pour l'échantillonnage de l'eau dans le cadre de la surveillance dans le cadre de la DCE ;

FIGURE 1
 Journée du 26 juin 2007 :
 VARIATIONS HORAIRES
 DU DÉBIT ET DE LA
 CONCENTRATION EN
 DI-2-ÉTHYLHEXYLE PHTALATE
 (DEHP)



- l'évaluation de l'adéquation des choix techniques vis-à-vis des exigences de la DCE ;
- l'évaluation de l'impact de l'étape d'échantillonnage sur la variabilité finale.

En aucun cas elle ne visait à évaluer l'aptitude de l'équipe de prélèvement. Ces vues, portées par AQUAREF, étaient partagées par d'autres groupes d'experts en France : experts français de l'échantillonnage regroupés au sein de la commission de normalisation AFNOR T91E, et associations professionnelles de laboratoires d'analyse, en tant que partenaires dans la production des données de surveillance de l'environnement, agences de l'eau ordonnatrices des campagnes de mesures et autorités responsables du compte-rendu de leurs résultats au niveau national et européen. Certains d'entre eux avaient développé des réponses dédiées, allant de la publication de guides techniques à la formation du personnel de prélèvement. Tous ont considéré l'initiative de l'INERIS comme une occasion unique de faire progresser les connaissances sur le prélèvement et d'en accroître l'harmonisation. Aussi ont-ils accepté de participer à la conception de la campagne au sein d'un groupe consultatif. De nombreux facteurs se cachent derrière les mots « variabilité d'un résultat de mesure » : adéquation du protocole d'échantillonnage choisi aux caractéristiques de la station, respect strict du protocole sur le terrain, sélection de flaconnages n'altérant pas

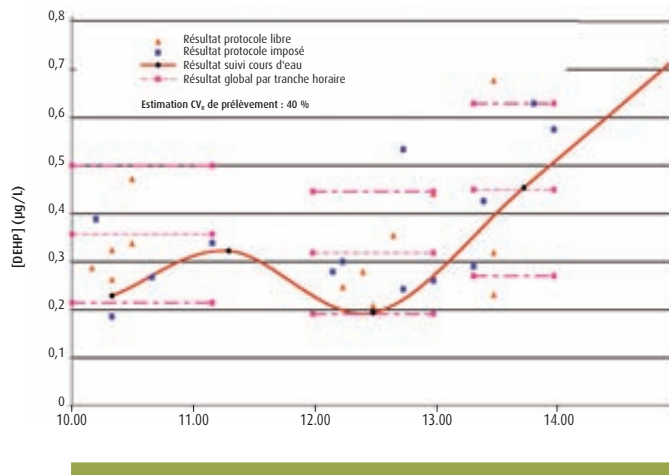


FIGURE 2
 VARIABILITÉ OBSERVÉE
 SUR CHAQUE TRANCHE
 HORAIRE [DEHP] POUR
 LA CONCENTRATION EN
 DI-2-ÉTHYLHEXYLE PHTALATE
 PAR DIFFÉRENTES MÉTHODES
 DE PRÉLÈVEMENT

l'échantillon, conditions de transport vers le laboratoire d'analyse et, enfin, incertitude analytique, qui inclut toutes les étapes de calcul. Afin de limiter la variabilité observée lors de cette campagne aux effets de l'échantillonnage, l'impact de l'incertitude de transport et d'analyse devait être connu et, si possible, minimum. Pour cette raison, nous avons choisi d'avoir recours à un seul laboratoire d'analyse et d'y transporter tous les échantillons dans des conditions contrôlées. Deux des sources de variabilité restantes peuvent être attribuées aux opérateurs du prélèvement : la sélection d'un protocole au regard de la spécificité du lieu d'échantillonnage et sa mise en œuvre, ainsi que l'adéquation du flaconnage aux paramètres considérés. Compte tenu de ces potentialités, l'INERIS et le groupe consultatif ont décidé que chaque prélèvement serait effectué une

première fois selon un protocole imposé conforme aux meilleures pratiques d'échantillonnage et de conservation, puis une seconde fois selon le protocole propre à chaque équipe. La variabilité naturelle de l'échantillon dans la masse d'eau a été minimisée par une sélection rigoureuse de la station de mesure. Finalement, parmi une sélection de quatre stations propices à l'organisation de cette campagne en raison de la présence de polluants d'intérêt en concentration suffisante, la station d'Épône, sur la Mauldre (Yvelines) a été choisie en raison de sa localisation géocentrique et de la possibilité d'y assurer la sécurité d'intervention. Le dernier élément d'un essai collaboratif est bien entendu un nombre suffisant de participants : les agences de l'eau ont sélectionné 14 équipes, dont trois sans activité analytique.



LA VALORISATION DES DONNÉES

À l'issue de 6 mois d'une préparation intense, tous les acteurs ont été réunis à Épône le 26 juin 2007, dans des conditions matérielles qui ont permis la réalisation de la totalité des opérations prévues. Cependant, c'était sans compter les caprices du ciel: depuis le 25 juin jusqu'au matin du 26 juin, de fortes intempéries avaient touché la région, conduisant à une multiplication du débit de la Mauldre par 4 au démarrage de la campagne, avec retour à la normale en fin de journée. Aucune des équipes de prélèvement n'a bénéficié des caractéristiques types de la station de mesure et peu d'équipes ont pu opérer dans des conditions similaires. Dès lors, la comparaison des résultats de mesure issus de l'analyse des prélèvements, dont un exemple est fourni par la figure 1, ne pouvait faire appel à des concepts statistiques appliqués uniformément à toutes les valeurs, quelle que soit la plage horaire de prélèvement.

L'examen des mesures réalisées par l'INERIS pour le suivi du cours d'eau montre que leur répartition temporelle est clairement influencée, pour tous les paramètres, par les variations de débit du cours d'eau. Il est donc prudent de ne comparer entre elles que des valeurs obtenues sur une durée pendant laquelle la rivière présentait des caractéristiques relativement

TABLEAU 1

VARIABILITÉS DE PRÉLÈVEMENT POUR L'ENSEMBLE DES POLLUANTS PAR PARAMÈTRE, PLAGE HORAIRE, ET POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES

Substances	Valeurs typiques	1 ^{re} plage horaire 10:00-11:10	2 ^e plage horaire 12:00-13:00	3 ^e plage horaire 13:20-14:00
Tétrachloroéthylène	Concentration de référence (µg/L)	0,039	0,042	0,054
	Échantillonnage (plage considérée)	52 %	32 %	20 %
	Échantillonnage (ensemble)	43 %		
DEHP	Concentration de référence (µg/L)	0,356	0,318	0,449
	Échantillonnage (plage considérée)	88 %	60 %	74 %
	Échantillonnage (ensemble)	76 %		
Baryum	Concentration de référence (µg/L)	49,9	47,6	47,6
	Échantillonnage (plage considérée)	nc	8 %	8 %
	Échantillonnage (ensemble)	6 %		
Matières en suspension	Concentration de référence (µg/L)	56,36	40,54	40,54
	Échantillonnage (plage considérée)	36 %	18 %	18 %
	Échantillonnage (ensemble)	46 %		
Nitrites	Concentration de référence (µg/L)	0,284	0,274	0,239
	Échantillonnage (plage considérée)	8 %	8 %	4 %
	Échantillonnage (ensemble)	16 %		
Orthophosphates	Concentration de référence (µg/L)	4,97	4,66	4,15
	Échantillonnage (plage considérée)	4 %	8 %	8 %
	Échantillonnage (ensemble)	14 %		

nc : non calculée

constantes. C'est pourquoi les données ont été traitées par sous-populations correspondant à des tranches horaires de caractéristiques identifiées. Un exemple, le di-2-éthylhexyle phtalate est présenté sur la figure 2. Pour chaque groupe temporel, une variabilité peut ainsi être calculée. L'incertitude analytique (U) de l'unique laboratoire d'analyse impliqué étant connue, la résolution de l'équation de propagation des incertitudes $U^2_{totale} = U^2_{\text{échantillonnage}} + U^2_{\text{analyse}}$ permet d'accéder, pour chaque

RÉFÉRENCES

[1] NF EN ISO 5667-3. 2004. Qualité de l'eau - Échantillonnage Partie 3 : lignes directrices pour la conservation et la manipulation des échantillons d'eau.

[2] Chemical Monitoring Activity - On-site Workshop. Comparison of analytical approaches for WFD chemical monitoring a JRC IES RWER Initiative. 2007.



plage horaire à la variabilité induite par les opérations de prélèvement. Cette approche, appliquée à tous les paramètres mesurés, conduit aux évaluations regroupées dans le **tableau 1**. Ces résultats demanderont à être affinés lors de campagnes ultérieures et étendus à d'autres types de milieux.

CONCLUSION

Pendant longtemps, les problèmes métrologiques relatifs à la conception ou l'interprétation d'opérations de terrain ont semblé si complexes qu'un consensus tacite avait prévalu pour retarder leur prise en compte. Au cours de cette étude, la plupart de ces problèmes ont été identifiés. En première approche, les outils métrologiques habituels, par exemple la propagation quadratique, semblent utilisables pour l'interprétation des résultats – lorsqu'on a pris soin de minimiser les influences extérieures, dont notamment la variation spatio-temporelle de la masse d'eau et des performances analytiques associées à l'analyse des prélèvements. L'expérience de la métrologie analytique est d'une aide considérable dans ce travail. La campagne a également montré que la réalisation de prélèvements multiples dans un espace finalement réduit n'a pas d'impact négatif sur leur résultat, pour peu que leur disposition ait été correctement

prévue, et peut être utilisée comme outil pédagogique.

Mais le résultat saillant de cette étude, au-delà de la métrologie, a été la réaction des acteurs de l'échantillonnage, qui ont vu dans cette campagne la reconnaissance de leur

importance au sein de la chaîne de mesure, et une occasion unique de partager expériences et difficultés. Tous se déclarent en faveur de l'harmonisation des pratiques et des supports documentaires avec la mise en place d'actions de formation technique.

ABSTRACT

With the support of the French River Basin Agencies (RBAs), the French Ministry of Ecology and its local offices, INERIS organised a collaborative field trial in June 2007 on a minor tributary of the River Seine near Paris. This trial was the first attempt to improve knowledge of the effect, in natural river water, of sampling activity undertaken as part of regulatory monitoring.

The Epône sampling spot was selected for its central location, because its rural characteristics are representative of the majority of the RBAs' sampling stations, and because it enabled more than 40 people to be brought together in a secure environment.

The selected monitoring parameters were:

- pH, oxygen, temperature and conductivity (field parameters);
- suspended particulate matter (SPM), nitrites, orthophosphates, barium, di-2-éthylhexyle phtalate (DEHP), and one OHV, tetrachloroethylene (parameters to be analysed in a laboratory).

The aim of this study was to evaluate several sampling procedures, including standardized ones, to determine the variability induced by sampling operations compared to subsequent analytical processes. "Sampling activities" include sampling performance and external inputs, e.g. weather. Individual field observations were also performed in order to understand the reasons for reference methods not being rigorously followed and to propose improvements that will make these methods more acceptable to the sampling staff, and thus more reliable.

Solutions were developed to overcome the difficulties in the data interpretation caused by climate conditions during the trial.

Construction d'une stratégie efficace au moindre coût de réduction des émissions de polluants dans les eaux



CONTEXTE ET OBJECTIF

La Directive Cadre sur l'Eau impose la mise en place de « programmes de mesures » efficaces au moindre coût (dites « coût-efficaces ») pour atteindre le bon état écologique des eaux, notamment en réduisant les émissions des substances (dangereuses) prioritaires vers les milieux aquatiques. Les mesures sont, ici, des actions techniques de réduction des émissions comme par exemple, dans le cas du traitement des eaux usées, la microfiltration, la nanofiltration ou encore l'osmose inverse. Les informations sur les moyens de réduire les émissions de ces polluants sont très peu disponibles. Il est donc difficile d'établir un programme avec des modèles hydrologiques et économiques, par simulation des actions de réduction des émissions et des coûts associés. Dans un tel contexte d'informations réduites, nous avons recours à une alternative à la modélisation : l'analyse multicritère (AMC). L'AMC consiste à effectuer un classement des actions de réduction des émissions en fonction de plusieurs critères de coûts et d'efficacité. Il devient alors possible de construire un programme coût-efficace dans un contexte d'information réduite et qualitative en utilisant des dires d'expert, en sélectionnant des actions à partir de ce classement.

MÉTHODE

Nous avons utilisé la méthode d'AMC « ELECTRE III » développée par l'Université de Paris Dauphine (Roy, 1996). Contrairement aux méthodes dites « d'agrégation totale » dans lesquelles une note globale est attribuée à chaque action (exemple de la moyenne pondérée), ELECTRE est une méthode d'« agrégation partielle » qui consiste à comparer deux à deux les actions et qui introduit la possibilité de non-compensation des performances des critères. Plus précisément, cette méthode respecte les principes de concordance (si

l'action A est au moins aussi performante que B sur la plupart des critères, elle sera préférée à B) et non-discordance (s'il n'y a aucun critère sur lequel l'action A est beaucoup moins performante que B, elle sera préférée à B). Enfin, elle permet également de prendre en compte des poids de critères.

L'AMC opère sur une base de données d'actions que nous avons construite en collectant des informations sur les techniques de traitement des rejets et les possibilités de substitution pour les substances, procédés et secteurs d'activités concernés par 10 substances (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), mercure, cadmium, nonylphénols, tributylétain, di-2-éthylhexyle phtalate, polybromodiphényléthers, hexachlorobenzène, atrazine et isoproturon). La base contient 225 actions sous forme de triplets (source, action, substance). Par exemple, une action pourra être schématisée ainsi : production de chlore, filtration des effluents sur membrane, mercure. Des experts ont ensuite attribué des performances à chacune des actions selon six critères, à savoir :

- 1/ ratio entre la quantité de substance émise par la source et la quantité totale de substance émise par l'ensemble des sources ;
- 2/ efficacité de l'action pour réduire les émissions de la substance (en pourcentage de réduction) ;
- 3/ cobénéfices environnementaux produits par l'action : est-ce que l'action permet de réduire une ou plusieurs substances ?
- 4/ coûts financiers de l'action ;
- 5/ effets d'échelle : est-ce que l'action permet de réduire les émissions de plusieurs sources ?
- 6/ disponibilité de l'action : est-ce que l'action est au stade de la recherche en laboratoire, ou au stade des essais pilotes ou au stade de commercialisation ? Dans le dernier cas, l'action est considérée comme disponible. Ce critère est un moyen de mesurer les coûts de mise en œuvre autres que financiers.

Le **tableau 1** présente un extrait de la base de données pour certains des triplets caractérisant les actions de réduction des émissions de di-2-éthylhexyle phtalate (DEHP).

Le poids des critères est affecté de telle sorte que la

RÉFÉRENCES

[1] Ducos G., Brignon J. M., Oesterholt F., Ullrich S. M., Krupanek J., Van Tongeren W., Munthe J. Emission reduction strategy of priority and emerging chemicals in European waters: inventory and assessment of mitigation options. Abstract book of the 19th annual meeting SETAC Europe "Protecting ecosystem health: facing the challenge of a globally changing environment", 31 may-4 June 2009, Goteborg, Sweden, p. 68.

[2] Roy B., 1996. Multi-criteria Methodology for Decision Aiding, Dordrecht, Kluwer Academic, 316 p.

NOTE

(1) Projet SOCOPSE :
Source control of priority
substances in Europe
<http://www.socopse.se/>
L'INERIS est pilote d'un des
groupes de travail
du projet SOCOPSE
(2006-2009)

somme de ceux qui représentent l'efficacité globale de l'action (critères *Ratio* et *Efficacité*) soit égale à la somme de ceux qui sont assimilables aux coûts (critères *Coûts*, *Disponibilité*, *Cobénéfices* et *Effets d'échelle*). Nous inscrivons ainsi l'AMC dans une approche économique de type coût-efficacité.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Plusieurs classements ont été effectués. Le premier porte sur toutes les actions sans restriction, ce qui correspond à un scénario efficace au moindre coût. D'autres ont été effectués sur une partie des actions, celles qui sont, ou suffisamment disponibles, ou efficaces, ou d'un coût plafonné. Dans chaque cas, qui représente un type de préférence du décideur, il est possible de travailler sur une seule ou plusieurs substances simultanément. On observe généralement une forte dépendance des stratégies obtenues aux préférences du décideur et aux substances étudiées. Certaines actions, dont l'intérêt n'était pas apparent, ont été bien classées, par exemple: certaines actions de traitement des émissions atmosphériques de HAP (bien qu'agissant indirectement sur la qualité des eaux), ou l'optimisation du fonctionnement des stations d'épuration pour le phtalate DEHP.

Les actions de substitution sont en général moins bien classées que les actions de traitement d'effluents, ce qui nécessite confirmation, étant donné l'enjeu financier important du choix entre les deux options, notamment pour les acteurs publics qui financent les équipements collectifs de dépollution des eaux. Il sera nécessaire pour cela d'affiner les critères pour mieux représenter les cobénéfices sociaux, et de mieux informer le critère

de disponibilité (clé pour les actions de substitution). L'impact simultané d'une action de traitement des eaux résiduaires sur un grand nombre de substances devra également être représenté.

Toujours en termes méthodologiques, l'AMC sera confrontée à d'autres techniques d'aide à la décision, comme l'optimisation multiobjectif. Un objectif de performance sera alors établi pour chaque critère et les actions seront classées en fonction de leur distance par rapport à l'optimum de Pareto. Les actions « Pareto-optimales » seront telles que l'on ne peut pas améliorer un objectif sur un critère sans en altérer au moins un autre. Les données utilisées pour construire la base d'actions ont été obtenues dans le cadre du projet européen SOCOPSE⁽¹⁾ pour les 10 substances évoquées plus haut.

Le choix des substances fut dépendant des contraintes imposées au projet par les enjeux réglementaires européens du moment. Les informations proviennent essentiellement de la littérature et peu des acteurs (industriels, gestionnaires et acteurs de l'eau). Le travail de l'INERIS se poursuit sur de nouvelles substances et avec des acteurs plus ciblés dans le cadre de travaux avec l'ONEMA et les agences de l'eau.

J-M. Brignon, G. Ducos



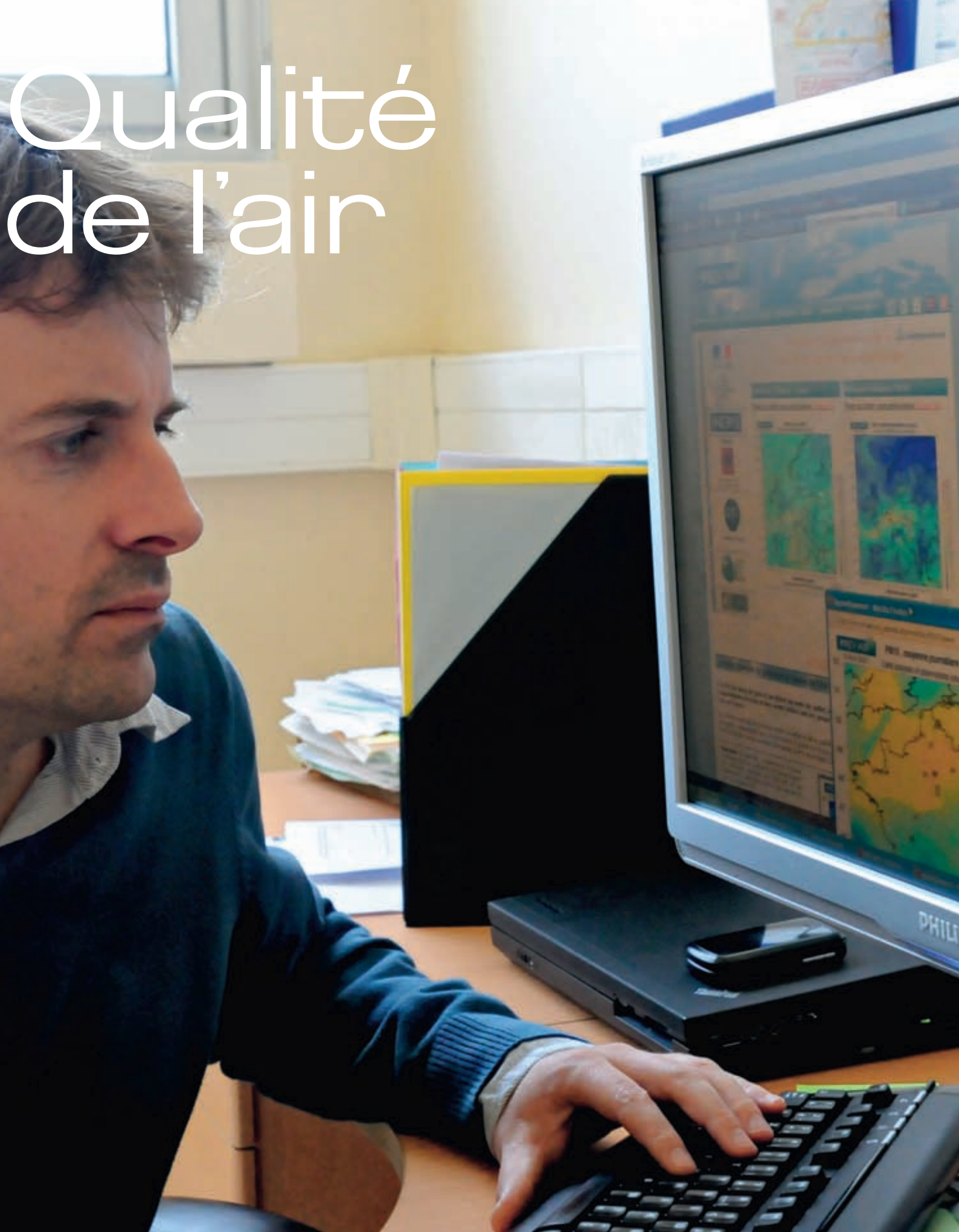
n° Triplet	Sources	Actions	Substances	Ratio (%)	Efficacité (0-10)	Coûts (0-10)	Disponibilité (0-10)	Cobénéf. (0-10)	Échelle (0-10)
58	Boues de station d'épuration	Incinération des boues	DEHP	2	9	4	9	1	1
59	Boues de station d'épuration	Digestion des boues	DEHP	2	5	9	9	1	1
62	Rejet de station d'épuration	Adsorption sur charbon actif	DEHP	3	8	8	9	8	1
63	Rejet de station d'épuration	Nanofiltration	DEHP	3	8	6	9	6	1
64	Rejet de station d'épuration	Osiose inverse	DEHP	3	8	6	9	6	1
65	Rejet de station d'épuration	Ultrafiltration	DEHP	3	8	6	9	4	1
66	Rejet de station d'épuration	Optimisation du procédé	DEHP	3	6	10	7	4	1

TABLEAU 1

EXTRAIT DE LA BASE DE DONNÉES ELECTRE effectuée un classement des actions à partir de cette base de données et attribue un rang à chaque triplet



Qualité de l'air



L'expertise reconnue de l'INERIS dans le domaine de la qualité de l'air, tant au niveau national qu'au niveau européen, repose sur une activité scientifique de fond ciblée sur un certain nombre de questions de recherche, dans divers champs de compétences : caractérisation des polluants et des expositions, développements métrologiques et méthodologiques, identification et évaluation des stratégies de réduction des pollutions, modélisation des transferts, transport et formation des polluants. Parmi les nombreux enjeux de recherche dans le domaine de la pollution atmosphérique, les particules en suspension – dont les aérosols⁽¹⁾ – représentent aujourd'hui une des principales préoccupations en matière de santé publique et d'impact environnemental. La multiplicité de leurs sources d'émission, la complexité des processus de formation et de leurs caractéristiques physico-chimiques nécessitent des besoins accrus de connaissance pour atteindre les objectifs de réduction de la pollution particulaire inscrits dans le Plan National Santé Environnement II (réduction de 30 % pour les PM 2.5 d'ici 2015). Un « plan particules » a été mis en place à cet effet.

Ainsi, l'étude scientifique des différentes situations de pollution particulaire constitue un axe prioritaire de recherche afin de contribuer à définir les politiques publiques de réduction de cette pollution. Trois volets ont été retenus :

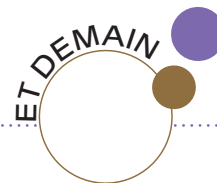
- les développements d'outils et d'instruments innovants constituent un point clé pour progresser dans la connaissance des polluants émergents, notamment des particules ultrafines et des nanoparticules : granulométrie, spéciation chimique *in situ* et en temps réel par métrologie LIBS, bancs de génération et chambres d'exposition en laboratoire pour l'étude de la chimie atmosphérique ;
- l'amélioration des connaissances sur la présence des polluants particulaires, les expositions dans les différents environnements, l'évaluation des risques associés à ces expositions. Un accent particulier est

porté sur la caractérisation des sources et le suivi de leur évolution dans le temps, en recherchant des traceurs pertinents, comme pour la combustion du bois et les polluants d'intérêt sanitaire (HAP). Des travaux de recherche sont également ciblés sur les pollutions intérieures, qui contribuent à l'exposition individuelle de façon très significative. Ces travaux portent, d'une part, sur les particules ultrafines (caractérisation spatio-temporelle et chimique) et, d'autre part, sur la formation des particules secondaires, à partir des COV susceptibles de réagir avec des espèces oxydantes telles que l'ozone ;

- la modélisation des phénomènes de formation et de transport des particules dans l'air en s'appuyant sur des observations de plus en plus sophistiquée, jusqu'aux données satellitaires d'observation de la terre. L'information spatiale intègre notamment des émissions imprévisibles de polluants comme les feux de forêts ou l'observation des océans. Ces travaux contribuent ainsi à l'évolution des systèmes opérationnels de simulation et de prévision des épisodes de pollution particulaire dans lesquels l'INERIS est impliqué, PREV'AIR, et la chaîne de calcul CHIMERE. L'INERIS étudie également les interactions entre pollution atmosphérique et changement climatique, et notamment les influences antagonistes des particules fines, sur le bilan radiatif terrestre en fonction de leur composition. C'est l'ensemble de ces travaux et des connaissances qui en résultent, mis en synergie, qui permettent d'apporter des réponses complètes lors d'événements de pollution atmosphérique exceptionnels comme très récemment lors de l'éruption volcanique islandaise.

NOTE

(1) Aérosols : particules solides ou liquides en suspension dans un milieu gazeux



- Progresser sur les interactions climat/pollution de l'air et promouvoir des approches intégrées dans les futures politiques environnementales de gestion et d'adaptation, tant nationales qu'internationales.
- Développer des systèmes de modélisation intégrée, couplant, d'une part, climat et qualité de l'air et, d'autre part, les analyses économiques des coûts/bénéfices pertinents aux différentes échelles locales et européennes.
- Améliorer la connaissance des particules fines, en particulier de leur composition chimique en fonction de leur granulométrie, afin de mieux appréhender leur impact sanitaire lié à des expositions chroniques à long terme.
- Développer, pour ce faire, des outils *in situ* et en temps réel, afin de progresser sur la compréhension des évolutions spatio-temporelles des polluants et de leur spéciation chimique sur l'ensemble du cycle de vie : de leur formation à leur transformation dans l'atmosphère.
- Organiser l'accès aux outils de simulation notamment pour l'étude de scénarios.

Caractérisation des particules générées par la combustion d'encens



X. Ji

Nos travaux de recherche ont eu pour objectif de caractériser des niveaux de concentration en particules ultrafines (PUF) – de taille de l'ordre du nanomètre – dans l'air intérieur d'une maison modèle en activant différentes sources. Les 13 sources identifiées ont été mises en œuvre dans la maison et les variations temporelles et spatiales des concentrations en PUF émises ont été mesurées dans différentes pièces. Une partie de ces travaux de recherche a été menée en partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), l'INSERM U955, l'École des Hautes Études en Santé Publique (EHESP), le Laboratoire d'étude des Particules Inhalées (LEPI) et l'Institut

de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement (IRCE) dans le cadre du projet NANOP (financement APR Afsset).

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les campagnes de mesure de particules ultrafines ont eu lieu dans la Maison Automatisée pour la Recherche Innovante de l'Air ou Maison « MARIA » (figure 1) qui représente un environnement domestique réel contrôlé. Elle est construite sur le site du CSTB qui est entouré d'une zone de banlieue (77). Il n'y a pas de hauts bâtiments résidentiels, ni de circulation dense dans les environs. De grandeur réelle, MARIA est une maison individuelle de trois niveaux comportant cinq pièces et une cuisine

pour un volume total de 319 m³. Le salon, la cuisine et les toilettes sont au rez-de-chaussée, et quatre chambres, une douche et une salle de bain se situent au premier étage. Le garage (40 m³) se trouve dans le sous-sol (192 m³). Dans le cadre de ce travail, 4 pièces ont été instrumentées : cuisine, salon, toilettes (rez-de-chaussée) et une chambre (à l'étage).

Deux campagnes de mesure ont été réalisées : été 2007 et hiver 2008. Au cours de chacune de ces campagnes, deux phases se distinguaient :

- phase 1 : caractérisation indépendante des sources (concentration de particules en nombre, en masse, en surface spécifique...);
- phase 2 : mise en œuvre successive des sources selon les activités d'une journée type week-end (la définition chronométrée de la journée type a été élaborée par le groupe de travail pour s'approcher au plus près d'une journée réelle).

L'ensemble des appareils utilisés ainsi que leurs caractéristiques techniques et leurs emplacements sont présentés dans le tableau 1.

La combustion de l'encens a été choisie comme première étude de cas afin

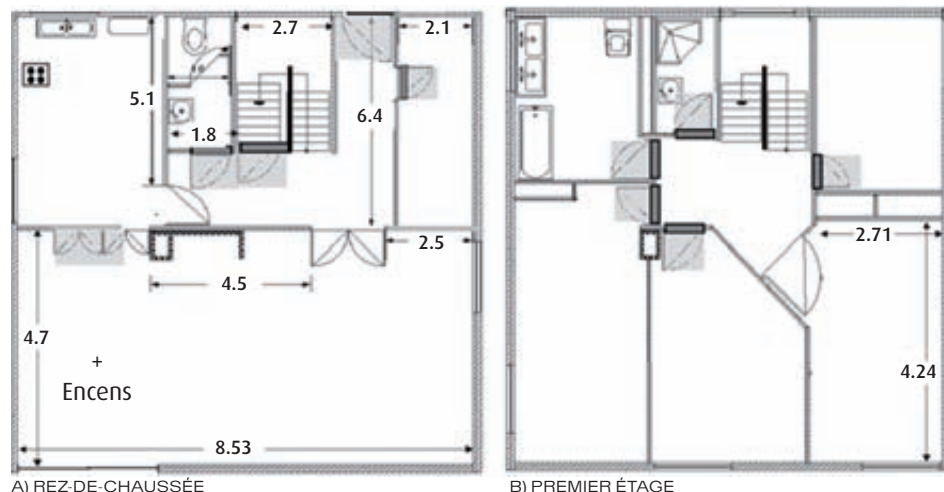


FIGURE 1
PLAN DE LA MAISON MARIA

Paramètre	Matériel	Quantité	Gammes (nm)	Saturation*	Pas de temps (min)	Localisation
Concentration en nombre	P-Trak	1	20-1000	1.10 ⁵ pt/cm ³	1	Cuisine
	CNC 3007	2	10-1000	5.10 ⁵ pt/cm ³	1	Chambre, WC
	CNC-eau	2	5-3000	1.10 ⁷ pt/cm ³	1	Près de la source, extérieur
Distribution en taille	SMPS	1	10-500	1.10 ⁷ pt/cm ³	5	Séjour
	ELPI 4.0	1	7-10000	2.10 ⁷ pt/cm ³	1	Près de la source
	OPC Grimm	6	300-20000	2.10 ³ pt/cm ³	1	Cuisine, chambre, séjour, WC, extérieur
Surface spécifique	Aerotrak® 9000	1	10-1000	1.10 ⁴ µm ² /cm ³	1	Près de la source
Concentration massique	TEOM 50 °C	1	PM _{2,5}	5.10 ⁶ µg/m ³	1	Près de la source
	TEOM-FDMS	1	PM _{2,5}	5.10 ⁶ µg/m ³	15	Extérieur
NO/NO ₂	TEI (AC 32 M)	2	-	-	5	Séjour, extérieur
Analyse chimique	AMS (Spectrométrie de masses)	1	70-1000	580 µg/m ³	1	Couloir de RDC
T°/CO ₂ /humidité	Q-Trak	5	-	-	10	Cuisine, chambre, séjour, WC, extérieur

TABLEAU 1
CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES APPAREILS DE MESURE AINSI QUE LEUR EMPLACEMENT LORS DES ESSAIS

*pt/cm³ : particules par centimètre cube

d'établir un référentiel pour la mise en œuvre et le traitement des données pour l'ensemble des sources étudiées. Ce choix a été motivé par la littérature abondante concernant la combustion de l'encens, nous permettant ainsi de comparer et de valider nos résultats [3], [6], [7], [8].

Pour chaque source, les essais ont été répétés au moins 4 fois. Les mesures d'émission de PUF liées à la combustion de l'encens ont été répétées 3 fois durant l'été 2007 et une fois en hiver 2008 dans le séjour de la maison MARIA.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'ensemble des résultats pour les différentes sources ainsi que les outils d'estimation de l'exposition aux PUF sont présentés dans le rapport de thèse (Ji 2010). Les travaux réalisés sur la combustion de l'encens ont fait l'objet d'une publication (Ji, Le Bihan *et al.* 2010) et les résultats de caractérisation de l'émission des PUF sont présentés ci-après.

La variation spatiale et temporelle de la combustion de l'encens est présentée sur la figure 2. Afin de

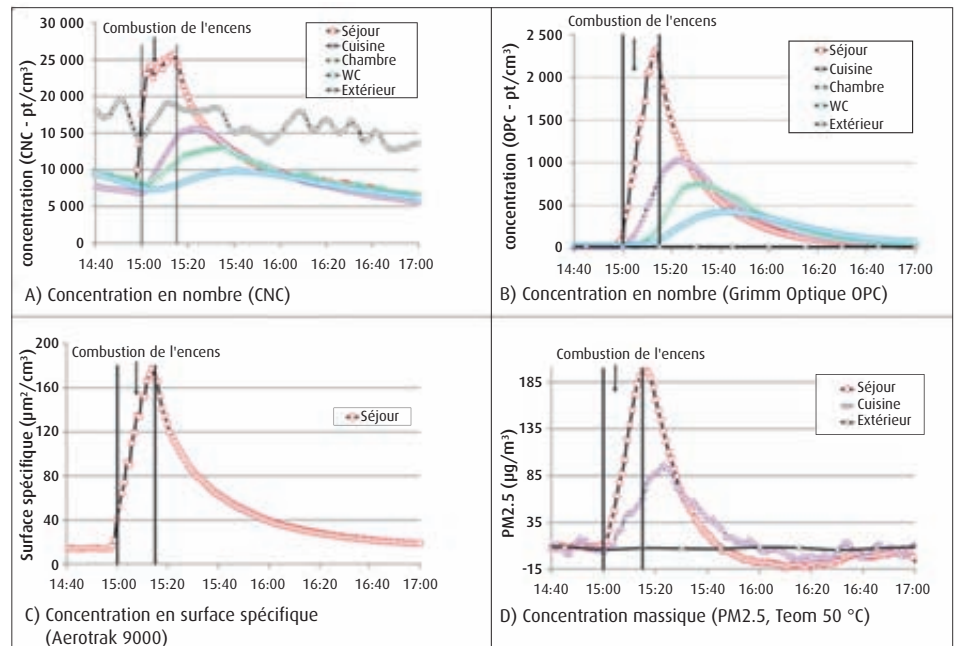
limiter une forte oscillation des valeurs, notamment observée pour les mesures à proximité de la source, les données sont présentées sous la forme d'une moyenne glissante sur cinq minutes.

Les résultats montrent que les particules émises lors de la combustion d'encens se retrouvent rapidement dans l'air intérieur de la maison. Les concentrations en nombre, en surface spécifique et en masse (respectivement les graphiques de la figure 2 A, B, C et D) ont augmenté immédiatement à proximité de l'encens et la concentration

FIGURE 2

VARIATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES (moyenne glissante de 5 minutes. *pt/cm³ : particules par centimètre cube)

- A) Concentration en nombre des particules mesurée par les compteurs de noyau de condensation (CNC. gamme de particules mesurées : diamètre entre 5 et 3 000 nanomètres)
- B) Concentration en nombre des particules mesurée par les compteurs optiques de particules Grimm (OPC Grimm. gamme de particules mesurées : diamètre entre 0,3 et 20 micromètres)
- C) Concentration en surface spécifique des particules mesurée par l'Aerotrak 9000 (gamme de particules mesurée : diamètre entre 10 et 1 000 nanomètres)
- D) Concentration massique des particules PM_{2.5} mesurée par Teom 50 °C.



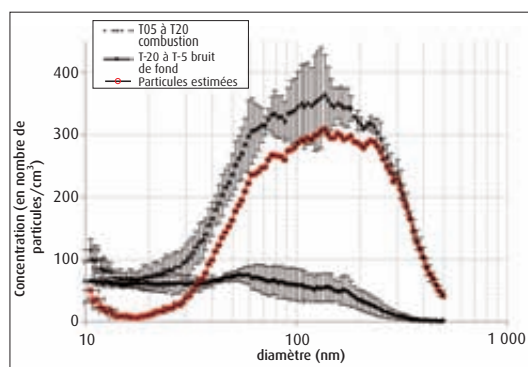


FIGURE 3

DISTRIBUTION EN TAILLE DES PARTICULES ÉMISES PENDANT LA COMBUSTION D'ENCENS

- T05 à T20 : période de 5 minutes à 20 minutes après l'allumage de l'encens, période de croissance des particules
- T-20 à T-5 : période de - 20 minutes à - 5 minutes avant la mise en œuvre de la source (encens), période du bruit de fond

RÉFÉRENCES

- [1] Chang Y. C., Lee H. W., *et al.* (2007). The formation of incense smoke. *Journal of Aerosol Science* 38(1): 39-51.
- [2] Gehin E., Ramalho O., *et al.* (2008). Size distribution and emission rate measurement of fine and ultrafine particle from indoor human activities. *Atmospheric Environment* 42(35): 8341-8352.
- [3] Jetter J. J., Guo Z. S., *et al.* (2002). Characterization of emissions from burning incense. *Science of the Total Environment* 295(1-3): 51-67.
- [4] Ji X. (2010). Évaluation des expositions humaines aux particules ultrafines dans l'environnement domestique. Créteil, Université Paris-Est Créteil : 149.
- [5] Ji X., Le Bihan O. *et al.* (2010). Characterization of particles emitted by incense burning in an experimental house. *Indoor Air* 20(2): 147-158.
- [6] Lee S. C., Wang B. (2004). Characteristics of emissions of air pollutants from burning of incense in a large environmental chamber. *Atmospheric Environment* 38(7): 941-951.
- [7] Lung S. C. C., Guo K. J. *et al.* (2004). Participants' exposure to PM 2.5 and gaseous/particulate polycyclic aromatic hydrocarbons during the Ma-tsu Goddess parade. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 14(7): 536-543.
- [8] See S. W., Balasubramanian R. *et al.* (2007). Physical characteristics of nanoparticles emitted from incense smoke. *Science and Technology of Advanced Materials* 8(1-2): 25-32.

en nombre dépend de la distance du point de prélèvement à la source (figure 2 A, B, et D). Dans le séjour, la concentration en nombre maximale du CNC est de 25 500 pt/cm³ ; ce niveau est environ 3 fois plus élevé que la concentration de fond (figure 2 A). Dans les autres pièces, on observe une tendance similaire à un degré moindre. En termes de concentration massique (PM 2.5), la concentration maximale est de 197 µg/m³ dans le séjour et de 97 µg/m³ dans la cuisine. La concentration massique moyenne à l'extérieur était égale à 7,4 µg/m³ pendant la combustion (figure 2 D). La surface spécifique maximale à proximité de l'encens en combustion atteint 177 µm²/cm³.

Les résultats de l'étude sur la détermination de la distribution en taille des particules issues de la combustion de l'encens sont présentés dans la figure 3. Ils sont basés sur les observations en SMPS réalisées au cours de la campagne d'été 2007.

Le diamètre médian lors de la concentration maximale de particules issues de la fumée de l'encens est de 136 nm. Indépendamment des différentes méthodes d'échantillonnage, ces résultats sont en accord avec ceux des études précédentes ([1], [2], [8]).

La composition chimique des particules de la combustion de l'encens a été étudiée sur site par spectrométrie de masse en temps réel (c-to-f AMS). Les résultats montrent que la fraction organique

est prédominante dans la masse des aérosols détectés. D'autres composants mineurs comme le K⁺, le NO³ et Cl⁻ ont également été identifiés.

CONCLUSION

Les résultats présentés sur les émissions de particules lors de la combustion de l'encens montrent que :

- la combustion d'encens génère des particules fines et ultrafines et que celles-ci impactent la qualité de l'air dans l'ensemble de la maison ;
- la concentration en nombre dépend de l'éloignement du point de mesure par rapport à la source ;
- à 5 mètres de la source, au moment où la concentration en particules est maximale, la distribution en taille des particules culmine à 136 nm.

PERSPECTIVES

Grâce à la base de données constituée lors de ce projet, un travail a été engagé sur l'analyse de l'exposition des personnes aux particules ultrafines. Quatre axes d'évaluation des expositions humaines ont ainsi été développés : hiérarchisation des sources, indicateur d'exposition, scénario d'exposition, estimation de l'exposition. Ces travaux se poursuivent notamment sur la composition chimique des particules émises et sur l'intégration dans des modèles d'exposition pour savoir où et quand les populations sont exposées.

ABSTRACT

The potential health effects of fine and ultrafine particles are of increasing concern. A better understanding of particle characteristics and dispersion behavior is needed. This study aims at characterizing spatial and temporal variations in fine and ultrafine particle dispersion after emission from a model source in an experimental house. Particles emitted by an incense stick burning for 15 minutes were characterized. Number concentration, specific surface area and mass were measured. Partial chemical analysis of particles was also realized. Near the burning incense stick, the maximum concentration was 25500 particles/cm³; the indoor PM 2.5 concentration reached 197 µg/m³, and the specific surface area concentration was 177 µm²/cm³. Time of Flight Aerosol Mass Spectrometer measurements indicated that the organic fraction was predominant in the aerosol mass detected, and other minor components identified were K⁺, NO³, and Cl⁻. The combustion of an incense stick in the living room was associated with significant modifications of the concentrations of particles measured in the different rooms of the house. This demonstration of pollution by particle dispersion by incense may have significant implications in terms of assessment of indoor exposure to such particles.

Les développements réglementaires français et européens visent de plus en plus à réduire les risques que font peser les polluants sur l'homme et l'environnement. Réduire la pollution implique tout d'abord la réalisation de mesures avec des instruments adéquats, en tenant compte de contraintes techniques de plus en plus exigeantes, concernant de plus en plus de polluants. Ceci nécessite le développement d'outils innovants. Parmi les techniques d'analyse élémentaire existantes, la « spectroscopie de plasma induit par laser » ou LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) présente de nombreux atouts pour des applications dédiées aux problématiques environnementales ou industrielles.

Elle consiste à focaliser un faisceau laser impulsionnel sur un échantillon à analyser, qu'il soit sous forme solide, liquide, gaz ou aérosol. Au point de focalisation, la matière est très fortement chauffée générant un gaz ionisé, très chaud et très lumineux, appelé plasma. La lumière émise par ce dernier contient la signature de tous les éléments chimiques présents dans le matériau sondé. Quasiment tous les éléments peuvent être détectés dans des conditions expérimentales variées (température, pression, degré d'humidité). Cette technique ne nécessite pas de préparation de l'échantillon. De plus, elle est non intrusive de par son caractère optique. Elle permet donc de réaliser des analyses *in situ*. Elle est potentiellement rapide, de quelques secondes à quelques minutes selon le nombre de tirs laser nécessaires à l'obtention d'un signal exploitable. Des mesures en temps réel, impliquant par exemple la surveillance d'un procédé industriel, peuvent être envisagées. Enfin, en milieu hostile, le système LIBS peut être déplacé et l'analyse peut être réalisée à distance (grâce au faisceau laser) protégeant ainsi les opérateurs. Un système basé sur cette technique permet donc de déterminer, d'une part, la nature chimique élémentaire des polluants et d'autre part, leurs concentrations en masse *in situ* et en temps réel. La mesure n'est plus différée. Toutes les caractéristiques énoncées lui confèrent un fort potentiel d'applicabilité sur le terrain. L'INERIS a ainsi procédé à des mesures sur des procédés industriels en particulier pour les nanoparticules (CEA, Arkema). Cette qualité d'applicabilité est mise à profit à l'INERIS où la majorité des dispositifs LIBS développés ont vocation à être installés sur site ou embarqués.

DÉTECTION DE NANOPARTICULES PAR TECHNIQUE LIBS : VERS UN TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Les premiers développements concernant la technique LIBS à l'INERIS ont été réalisés dans le cadre du projet européen NANOSAFE II (2005-2009). Ce projet visait à proposer des solutions innovantes afin de renforcer la sécurité des procédés de production et de rendre plus sûr l'usage de matériaux élaborés à partir de nanoparticules manufacturées. Parmi toutes les thématiques abordées, l'une d'entre elles était dédiée au développement des moyens de détection des nanoparticules. En effet, malgré les précautions prises pour sécuriser les procédés de fabrication, les risques de fuite ne doivent pas être négligés. La technique LIBS a été proposée comme moyen de surveillance des ambiances de travail. En pratique, les nanoparticules en suspension dans l'air sont aspirées dans une cellule à l'intérieur de laquelle le faisceau laser est focalisé. L'analyse est réalisée par spectroscopie d'émission conformément au principe présenté précédemment. Les travaux réalisés ont permis de montrer qu'il était possible de détecter des flux de nanoparticules

polydispersés, *in situ* et en temps réel, et de déterminer leurs compositions chimiques élémentaires ainsi que leurs concentrations en masse. De plus, dans la majorité des cas, les limites de détection obtenues (de quelques $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à quelques centaines de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) sont inférieures aux valeurs limites d'exposition professionnelle existantes pour les éléments chimiques mesurés. Ces résultats encourageants ont conduit à engager un transfert de technologie. La compagnie industrielle des lasers (CILAS) en collaboration avec l'INERIS a entrepris de fabriquer un prototype dédié à la détection de nanoparticules manufacturées dans les laboratoires ou dans les unités de production. Une liste de dix types de nanoparticules non carbonées a été établie par la compagnie CILAS suite à une étude de marché. Le dispositif LIBS de laboratoire va être optimisé et son encombrement réduit afin d'être rendu transportable. Ce transfert de technologie pourrait être étendu à d'autres applications sur des sujets en cours d'étude à l'INERIS, tel le suivi en temps réel de particules micrométriques dans les rejets gazeux industriels.

C. Dutouquet



La modélisation des aérosols organiques secondaires



B. Bessagnet

Les aérosols atmosphériques – fines particules solides ou liquides en suspension dans l’atmosphère – peuvent être émis directement par l’homme (rejets industriels, échappements automobiles, combustions diverses, etc.) ou bien naturellement (feux naturels, poussières volcaniques, embruns marins, etc.) : il s’agit alors d’émissions primaires. Les aérosols peuvent également provenir de réactions chimiques en phase gazeuse (oxydation par OH, O₃, etc.) formant des espèces condensables (à faibles tensions de vapeur saturante), qui contribuent ainsi à la formation de particules : on parle alors de sources secondaires. D’un point de vue réglementaire, on distingue les concentrations de particules de diamètre inférieur à 2.5 µm (PM 2.5) et inférieur à 10 µm (PM 10), les particules les plus fines pouvant pénétrer plus profondément dans le

système respiratoire. Les particules sont composées d’une grande variété d’espèces organiques et inorganiques (carbone élémentaire, sulfates, nitrates, ammonium, sels marins, etc.).

LES AÉROSOLS ORGANIQUES

Les composés organiques directement émis par les procédés de combustion incomplète d’hydrocarbures ou issus de la combustion du bois par exemple sont appelés Aérosols Organiques Primaires (AOP). Des études récentes ont montré que ces espèces organiques pouvaient s’évaporer dès l’émission par effet de dilution de l’effluent.

D’autres espèces sont formées dans l’atmosphère par réactions d’oxydation en phase gazeuse et/ou hétérogène de composés organiques volatils (COV) émis par la végétation (isoprène, monoterpènes, etc.) et les activités humaines. Ces composés particulaires, majoritairement dans le mode granulométrique fin (inférieures à 300 nm), sont appelés Aérosols Organiques Secondaires (AOS). Les sources de composés « précurseurs » de ces particules secondaires constituent une question autant scientifique que politique. En effet, ces précurseurs peuvent provenir de l’industrie, de processus de combustion (bois), mais également de sources naturelles telles que la végé-

tation : de nombreuses espèces d’arbres comme le chêne émettent par les stomates de leurs feuilles des terpènes dans l’atmosphère sous forme gazeuse. L’émission est d’autant plus importante que la température et le rayonnement solaire augmentent et les AOS ont la particularité de se trouver en équilibre thermodynamique entre phase gazeuse et phase particulaire. Les feux de forêt constituent également une source importante de particules organiques. Une des grandes problématiques de ces émissions réside dans la détermination de la hauteur à laquelle doivent être injectées ces émissions dans les modèles, car la dynamique du feu génère en effet une colonne d’émission qui peut varier d’une centaine de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de l’intensité de celui-ci. Ces difficultés de modélisation dues aux émissions ont été décrites dans Menut et Bessagnet (2010) [4], article dans lequel sont recensées les principales lacunes des modèles de prévision et simulation de la qualité de l’air.

Enfin, des composés organiques issus de la décomposition des débris d’insectes, de plantes, de cires émises par les plantes peuvent se retrouver aérosolisés mais sont généralement dans la fraction « grossière » des particules (de diamètre supérieur à 2,5 µm).

Or, considérant l’enjeu très sensible de la réglementation des niveaux de concentrations de particules fines dans l’atmosphère pour les années à venir,

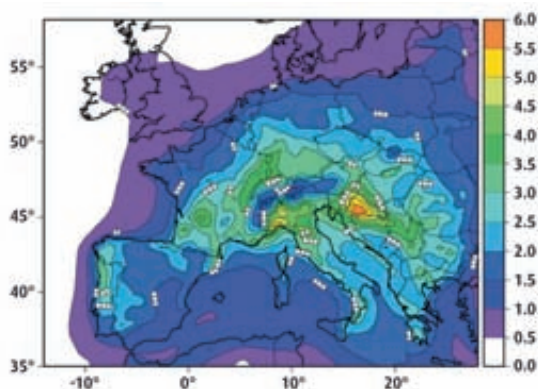


FIGURE 1
CARTOGRAPHIE DES CONCENTRATIONS MOYENNES ANNUELLES (µg/m³) EN AÉROSOLS ORGANIQUES SECONDAIRES EN 2003

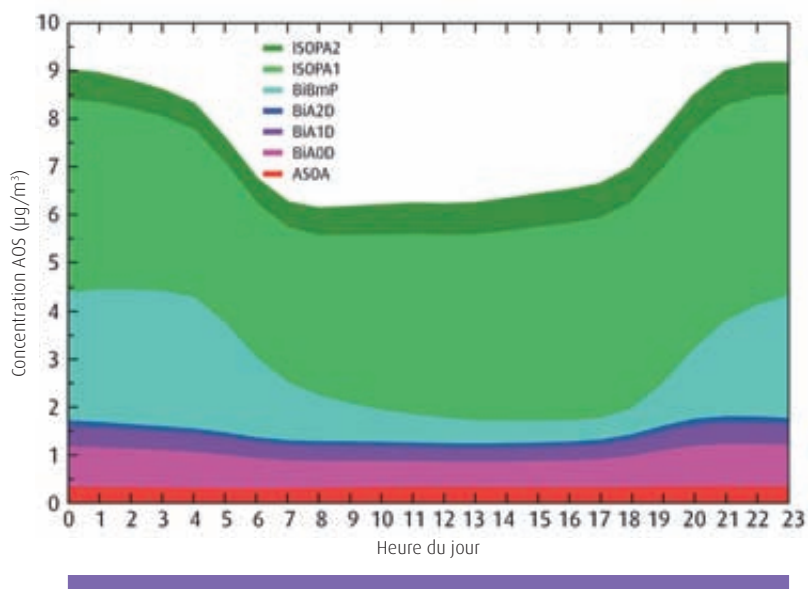


FIGURE 2

ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN AÉROSOLS ORGANIQUES SECONDAIRES DANS LA JOURNÉE PAR TYPOLOGIE D'AÉROSOL.

Les AOS ont une origine naturelle issue de l'oxydation de l'isoprène (ISOPA2, ISOPA1) des monoterpènes (BiBmP, BIA2D, BIA1D, BiAOD) et une origine anthropique (ASOA).

il est évident que la connaissance des contributions relatives des sources de précurseurs est déterminante. Notamment, il convient de distinguer la part anthropique sur laquelle une réglementation pourrait être efficace et la part biotique sur laquelle il est rarement possible d'envisager des moyens d'actions. Cependant, la composante « organique » des aérosols est certainement l'une des plus difficiles à modéliser, à cause des nombreux processus complexes mis en jeu et des besoins en données d'entrée que la simulation génère (émissions de sources naturelles, des feux de forêts, du chauffage résidentiel au bois par exemple, et météorologie qui influence les processus photochimiques). Ainsi, l'INERIS, en charge du codéveloppement du code CHIMERE avec l'IPSL⁽¹⁾ depuis 2001, a lancé un programme de recherche sur l'intégration d'un module spécifique de simulation des aérosols organiques secondaires dans le code. Ces travaux s'organisent avec d'autres travaux menés par l'Institut, de nature météorologique, dédiés à la caractérisation et la mesure des aérosols organiques secondaires, notamment à l'occasion de grandes campagnes nationales telles que la campagne MEGAPOLI sur Paris.

QUELQUES RÉSULTATS RELATIFS À LA MODÉLISATION DES AÉROSOLS ORGANIQUES SECONDAIRES

Des travaux récents réalisés par l'INERIS

mettent en avant le rôle important de l'isoprène dans la formation des aérosols atmosphériques en Europe (Bessagnet *et al.*, 2009) [2]. La question des émissions d'origine naturelle a été traitée en implantant dans CHIMERE un nouveau modèle d'émissions de composés organiques volatils biotiques, MEGAN, développé par une équipe américaine du NCAR⁽²⁾ (Guenther *et al.* 2006) [5]. Une quinzaine de nouvelles réactions chimiques ont été introduites dans le modèle. Elles mettent en jeu l'isoprène, l' α -pinène, le β -pinène mais aussi des composés plus rarement pris en compte tels que le sabinène, le δ 3-carène, le myrcène et l'ocimène. Ces composés sont amenés à réagir dans un cycle de réactions impliquant des composés organiques d'origine anthropique tels que le toluène, le benzène, le triméthylbenzène et autres alcanes et composés aromatiques. Enfin, cette mise à jour des modules d'aérosol de CHIMERE a été évaluée par comparaison avec des données d'observation issues de la campagne de mesure européenne CARBOSOL (programme européen FP6), et de campagnes et de supersites de mesures du programme onusien EMEP⁽³⁾ de la Convention sur le Transport des Polluants Atmosphériques à longue Distance (CLRTAP). Ces comparaisons modèle/mesures ont montré que les modèles sous-estimaient toujours les concentrations en carbone organique en hiver. Cela concerne plus

particulièrement les pays du Sud de l'Europe, où le bois est un moyen de chauffage courant. La quantification correcte de ces émissions reste toujours une question en suspens. En revanche, en été, les contributions « naturelles » calculées par le modèle CHIMERE s'avèrent correctement reproduites. De manière générale, cette étude a mis en évidence des concentrations élevées sur les zones forestières (figure 1) et donc qu'une fraction importante de ces aérosols est d'origine naturelle. Les concentrations simulées varient de 0.5 µg/m³ dans le nord de l'Europe à 4 µg/m³ dans les zones forestières (Forêt-Noire, Portugal, Massif central) en 2003. Cette étude a également mis en lumière l'importance des émissions d'isoprène en Europe comme évoqué dans de nombreuses études aux États-Unis. Ces travaux ont permis de cartographier la contribution secondaire des composés organiques particuliers. Elle varierait de 30 à 80 % en Europe, les fractions les plus élevées étant rencontrées dans les Pyrénées,

RÉFÉRENCES

- [1] Bessagnet B., Seigneur C., Menut L. Impact of dry deposition of semi-volatile organic compounds on secondary organic aerosols, *Atmospheric Environment*, Volume 44, Issue 14, May 2010, Pages 1781-1787, ISSN 1352-2310, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.01.027.
- [2] Bessagnet B., Menut L., Curci G., Hodzic A., Guillaume B., Lioussé C., Moukhtar S., Pun B., Seigneur C., Schulz M., 2009. Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe e focus on secondary organic aerosols. *J. Atmos. Chem.* 61 (3), 175e202. doi:10.1007/s10874-009-9129-2.
- [3] Hodzic A., Jimenez J. L., Madronich S., Aiken A. C., Bessagnet B., Curci G., Fast J., Lamarque J. F., Onasch T. B., Roux G., Schauer J. J., Stone E. A., Ulbrich I. M. Modeling organic aerosols during MILAGRO: importance of biogenic secondary organic aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6949-6981, doi:10.5194/acp-9-6949-2009, 2009.
- [4] Menut L., Bessagnet B. Atmospheric composition forecasting in Europe, *Ann. Geophys.*, 28, 61-74, 2010.
- [5] Guenther A., Karl T., Harley P., Wiedinmyer C., Palmer PI, Geron C., 2006 Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 3181-3210.

MISE EN PLACE DES SERVICES « ATMOSPHÈRE » DANS LE PROGRAMME GMES

En 2009, les programmes dédiés à la mise en place de services préopératoires pour la surveillance de l'environnement dans le cadre du GMES (Global Monitoring for Environment and Security) ont été lancés par la Commission européenne. L'INERIS contribue activement au projet MACC (Monitoring Atmospheric Composition and Climate) coordonné par le Centre européen de prévision météorologique à moyen terme (ECMWF). L'INERIS et Météo France, partenaires du consortium PREV'AIR, tirent largement parti de cette expérience pour coordonner au sein de MACC les actions de recherche et développement relatives à la qualité de l'air au niveau européen (échelle dite « régionale »). Ainsi ils sont responsables de la mise en place de services d'élaboration et de diffusion de prévisions à court terme et de cartographies de la qualité de l'air en Europe, ainsi que de la diffusion de produits issus de résultats de modèles, dans lesquels sont assimilées des observations de toute provenance (*in situ*, satellite). Les résultats obtenus sont des cartes de pollution, considérées comme les meilleures représentations possibles des champs de concentrations des polluants atmosphériques et des indicateurs d'impacts classiquement étudiés (moyennes annuelles, journalières, dépassements de seuil...). L'originalité de ces produits « qualité de l'air » développés dans MACC est qu'ils sont basés sur les résultats provenant de 6 modèles mis en œuvre par différentes équipes européennes. Le résultat final est un « ensemble », une moyenne correctement pondérée, des résultats de ces 6 modèles, de façon à tirer profit des qualités intrinsèques de chacun. L'expérience s'avère prometteuse, avec une amélioration sensible des prévisions produites par le système. Cela n'empêche pas chaque équipe de se concentrer sur la qualité de ses propres modèles. Au-delà de leur résolution spatiale nettement améliorée (25 km sur l'Europe au minimum pour les modèles actuels), ces derniers sont en constante évolution et leurs paramétrisations sont de plus en plus sophistiquées, pour mieux reproduire les phénomènes physicochimiques qui régissent les concentrations de polluants dans l'air. C'est dans cette logique que l'INERIS consacre un investissement important à la prise en compte de nouveaux processus de formation des aérosols dans CHIMERE.
www.gmes-atmosphere.eu

NOTES

- (1) IPSL : Institut Pierre-Simon Laplace (Région parisienne, France)
- (2) NCAR : The National Center for Atmospheric Research (USA)
- (3) Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long range transmission of air pollutants in Europe
- (4) LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique (École Polytechnique, Palaiseau, France)
- (5) CEREAS : Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique (Champs-sur-Marne, France)
- (6) Couche limite : zone de l'atmosphère directement influencée par la surface terrestre, généralement comprise entre 50 et 2000 m

le Massif central et en Espagne, alors que l'on retrouve logiquement les plus faibles dans les pays industrialisés d'Europe de l'Est. Cependant les contributions anthropiques pourraient encore être sous-estimées en raison de certaines approximations faites dans le module chimique. Dans cette étude les émissions de feux de forêts prises en compte pourraient être améliorées, action qui va être réalisée en collaboration avec l'IPSL-(LMD⁽⁴⁾).

Les résultats obtenus sont cohérents avec une étude similaire menée en collaboration avec le NCAR sur Mexico où a été également mis en évidence le rôle important des émissions naturelles par la végétation sur les concentrations en particules au-dessus de cette mégacité [3].

L'utilisation du modèle CHIMERE et le développement d'un module d'aérosol secondaire en collaboration avec le CEREAS⁽⁵⁾ a montré que le cycle diurne des concentrations d'aérosol présentait une diminution marquée en journée des concentrations en AOS (figure 2) par évaporation mais aussi du fait de l'augmentation de la hauteur de couche

limite⁽⁶⁾ (Bessagnet *et al.*, 2010)[1]. Cette étude a montré l'impact important de certains paramètres météorologiques comme l'humidité relative qui accroît le dépôt des espèces secondaires pendant la nuit. En effet, les molécules d'AOS se retrouvent à la fois sous formes gazeuse et particulaire, on les appelle espèces organiques semi-volatiles. Dans les modèles, le dépôt de ces espèces en phase gazeuse est généralement négligé, or nous avons montré que l'omission de ce processus pouvait modifier sensiblement les concentrations modélisées.

La compréhension des processus de formation des composés reste cependant largement incomplète et les travaux de l'INERIS s'inscrivent dans une série d'études scientifiques qui visent à améliorer les modèles permettant de simuler et prévoir la qualité de l'air. Elles contribuent ainsi à l'évolution des systèmes opérationnels de modélisation dans lesquels est impliqué l'Institut, PREV'AIR et la chaîne de calcul CHIMERE pour les études d'appui au ministère en charge de l'écologie.

ABSTRACT

An improved and complete secondary organic aerosols (SOA) chemistry scheme was recently implemented in the CHIMERE model. The implementation of isoprene chemistry for SOA significantly improves agreement between long series of simulated and observed particulate matter concentrations. While simulated organic carbon concentrations are clearly improved at elevated sites by adding the SOA scheme, time correlation are impaired at low level sites in Portugal, Italy and Slovakia. At several sites a clear underestimation by the CHIMERE model is noticed in wintertime possibly due to missing wood burning emissions as shown in previous modeling studies. In Europe, the CHIMERE model gives in 2003 yearly average SOA concentrations ranging from 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the Northern Europe to 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ over forested regions in Spain, France, Germany and Italy. Isoprene chemistry has a strong impact on SOA formation when using current available kinetic schemes.

Dry deposition of semi-volatile organic compounds (SVOC) is not currently treated in most chemical transport models of air quality and this omission has been identified as a possible major source of uncertainty. The effect of dry deposition of SVOC on the concentration of secondary organic aerosols (SOA) is investigated in summertime with the chemical transport model CHIMERE that simulates SOA concentrations by means of molecular SOA surrogate species. Omitting dry deposition could overestimate SOA concentrations by as much as 50%. This overestimation is larger during nighttime due to higher relative humidity.

Impact de la combustion du bois sur la qualité de l'air ambiant de quatre villes de France

L'utilisation du bois en tant que source d'énergie renouvelable contribue à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, la combustion du bois peut constituer une source importante de polluants atmosphériques, tels que les particules fines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et le benzène. Les inventaires nationaux réalisés par le Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique (CITEPA) indiquent que 70 % des émissions de HAP et de benzène sont dus aux secteurs résidentiel et tertiaire en particulier à cause de la combustion du bois. Un des enjeux majeurs de la détermination de la contribution des différentes sources à la qualité de l'air est d'aider les pouvoirs publics à mettre en place des politiques de réduction des émissions ciblées par polluant et par secteur d'activité. Pour ce faire, il est indispensable de disposer de données mesurables spécifiques à chaque source. Parmi les traceurs de combustion de la biomasse, les composés organiques les plus utilisés sont ceux provenant de la combustion de la cellulose et de l'hémicellulose tels que le lévoglucosan, mannosan, galactosan et des composés issus de la thermodégradation de la lignine comme par exemple les méthoxyphénols. Le lévoglucosan est considéré comme le traceur le plus intéressant car il est le plus stable dans l'atmosphère et le plus émis [1]. En Europe, la principale source de combustion de la biomasse en hiver est la combustion du bois utilisée pour le chauffage résidentiel. Dans ce cas, ces composés organiques s'avèrent de bons indicateurs potentiels.

OBJECTIFS ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

À la demande du ministère chargé de l'Écologie, une étude exploratoire a été réalisée par l'INERIS durant l'hiver 2006-2007 dans quatre grandes agglomérations françaises afin d'étudier la validité de ces composés organiques comme traceurs spécifiques de la source « combustion du bois ». Des mesures de ces composés ont été réalisées à Paris (site de Gennevilliers), Lille (site de Marcq-en-Baroeul), Strasbourg (site de Geispolsheim) et Grenoble sur des sites urbains de fond, en collaboration avec les quatre Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) – AIRPARIF, ATMO Nord-Pas-de-Calais, ASPA et ATMO Rhône-Alpes GIE/ASCOPARG – le laboratoire de chimie moléculaire et environnement (LCME) de Chambéry et le laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) de Grenoble [2]. La caractérisation globale des aérosols a été réalisée par les mesures de PM 10, du carbone organique (OC)

et du carbone élémentaire (EC). Les concentrations en lévoglucosan (tableau 1) traceur le plus abondant, en mannosan et galactosan, observées sur les quatre villes sont dans l'ordre de grandeur de celles observées dans de grands sites urbains rapportées dans la littérature. L'évolution temporelle de la concentration en lévoglucosan sur les villes de Paris et Strasbourg montre des variabilités importantes des concentrations, sans qu'aucun lien avec la température ne puisse être observé. Les concentrations les plus importantes en PM 10 (tableau 1) sont mesurées sur les sites de Grenoble et de Lille. Les fortes concentrations en PM 10 mesurées à Grenoble sont associées à une composante organique importante (OC), jusqu'à 60 %. Ces valeurs enregistrées à Grenoble correspondent à des gammes plutôt hautes de la littérature pour des sites similaires. Les valeurs pour les trois autres villes sont très similaires entre elles et dans la moyenne de celles présentées dans la littérature pour des sites de fond urbain. Compte tenu des différences importantes observées à la fois pour le carbone élémentaire EC, le carbone organique OC et le lévoglucosan sur la ville de Grenoble, un impact important de type « combustion de biomasse » semble se profiler pour cette agglomération, et qui peut être attribué spécifiquement à la combustion domestique du bois, compte tenu de l'époque de l'année et de la typologie du site. Cette conclusion est confirmée par la corrélation assez étroite observée entre les concentrations en OC et lévoglucosan. Afin de compléter ces résultats une estimation de la contribution de la source « combustion du bois » a été réalisée à partir des données de lévoglucosan et OC dans les quatre villes. La ville de Grenoble semble ainsi présenter la contribution la plus importante avec des valeurs comprises entre 32 et 53 % de la matière organique particulaire. En conclusion, cette étude a permis de mieux préciser la pertinence de certains composés utilisés comme traceurs de la combustion du bois, comme le lévoglucosan qui pourrait constituer un des outils de décision dans la mise en place de politiques de réduction des émissions.

E. Leoz Garziandia

RÉFÉRENCES

- [1] Leoz-Garziandia E., Besombes J. L., Pissot N., Allemand N., Mandin C., Collet S., Riberon J., Jaffrezo J. L. « Contribution du chauffage au bois à la qualité de l'air extérieur : données existantes et études en cours en France / Impact of woodburning on outdoor air quality: Existing French data and current studies ». Pollution atmosphérique, numéro spécial – mars 2009.
- [2] Pissot N., Besombes J. L., Leoz-Garziandia E., Jaffrezo J. L. « Impact de la combustion du bois sur la qualité de l'air ambiant de quatre villes de France : Évaluation de l'approche par traceurs organiques / Wood burning impact on the ambient air quality of four French cities: Evaluation of the approach by organic tracers ». Pollution atmosphérique, 203 – juillet-septembre 2009.

WEB

www.citepa.org

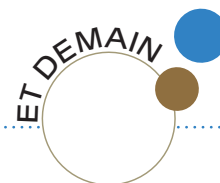
TABLEAU 1

MOYENNES ET NIVEAUX DE CONCENTRATIONS OBTENUS DANS LES DIFFÉRENTES VILLES (OC : carbone organique ; EC : carbone élémentaire) * Mesurées en fond sur l'agglomération de Strasbourg

	Lévoglucosan (ng/m ³)	Mannosan (ng/m ³)	Galactosan (ng/m ³)	OC (µg/m ³)	EC (µg/m ³)	PM 10 (µg/m ³)
Paris	234 (1-1224)	28 (1-152)	16 (0-85)	6 (2-15)	1 (0,2-2)	21 (8-47)
Lille	259 (31-697)	27 (2-89)	12 (1-37)	5 (2-9)	0,4 (0,2-0,6)	40 (8-110)
Strasbourg	439 (4-1300)	73 (6-269)	36 (3-157)	5 (1-14)	0,4 (0,1-1)	26*
Grenoble	1 049 (268-2469)	101 (32-237)	46 (10-129)	14 (5-28)	1 (0,2-4)	35 (18-64)

Gestion des sols pollués





La méthodologie d'évaluation du risque pour la santé des populations, formalisée dans les années 1980 par l'Académie des Sciences des États-Unis, a été intégrée il y a une dizaine d'années aux procédures administratives françaises pour les installations classées (ERS – évaluation des risques sanitaires) ou les sites pollués (EDR – évaluation détaillée des risques). Cependant certaines questions scientifiques perdurent et l'INERIS engage des actions de recherche afin de lever certains de ces verrous pour :

- tester et valider les phénomènes physiques, chimiques ou biologiques liés aux impacts sanitaires. Depuis 2008, l'effort s'est porté sur l'étude et la prédiction des transferts de polluants dans des milieux, notamment le transport des métaux, des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (Michel J., 2009) et des solvants chlorés dans les sols non saturés. De même, la prise en compte de la bioaccessibilité des polluants inorganiques dans l'évaluation des risques liés aux sites et sols pollués a été entreprise afin d'appréhender de manière plus pertinente la concentration à laquelle un organisme est réellement exposé (Caboche J., 2009) ;
- élargir le domaine d'utilisation des évaluations en intégrant les parties prenantes, avec notamment le développement de COMRISK, un guide et une boîte à outils pour l'implication des populations dans l'évaluation et la gestion d'un site ou sol pollué. Cette démarche vise à impliquer les populations concernées comme parties intégrantes de l'évaluation et de la gestion des risques. Cette prise en compte, relativement récente au niveau national, demeure un exercice difficile, mal maîtrisé, mais impérieux afin de renforcer la

crédibilité des évaluations de risque et de contribuer à la construction de politiques éco-responsables durables ;

- développer une démarche intégrée et spatialisée d'évaluation des risques, plus crédible et utile à la décision, notamment en élaborant une plateforme permettant de déterminer, à différentes échelles spatiales et temporelles, les inégalités environnementales d'expositions des populations aux substances chimiques (Caudeville J., 2009), en respectant les particularités des groupes sociaux : cartographier ces inégalités et identifier les populations à risque du fait d'une surexposition potentielle à un panel de polluants (métaux, POP, HAP et pesticides) ;
- développer de nouvelles filières technologiques et les qualifier en termes d'impact environnemental. Deux axes forts structurent l'action du pôle RISK : le reclassement des matériaux en fin de vie pour une réutilisation sous forme de matières premières secondaires ; la gestion aidée des sols pollués par le recours aux végétaux ou phytoremédiation. Cela doit permettre de progresser sur les techniques de dépollution et d'acquérir une expérience pour conforter l'état de l'art en matière de « procédés propres et durables » en fonction de données réelles.

Tous ces travaux s'inscrivent dans une démarche cohérente et vérifiable d'intégration de données, de méthodes et d'outils. La conceptualisation d'une évaluation des risques sanitaires intégrée donne un sens aux comparaisons, couplages ou agrégations de données et sert ainsi à rendre utile leur interopérabilité formelle.

- Associer les évaluations de risque et l'implication des populations pour construire un processus d'évaluation avec une finalité décisionnelle éco-responsable.
- Assurer une meilleure robustesse de l'estimation du risque et des teneurs dans les milieux d'exposition, par un meilleur couplage mesure-modèle.
- Maîtriser la filière des déchets incluant leur valorisation, avec comme but le reclassement des matériaux en fin de vie sous forme de matières premières secondaires.
- Passer d'une vision statique et compartimentée spécifique au site, à une vision territoriale dynamique et interactive, pour les pollutions (locales *versus* ubiquitaires) comme pour les populations (budgets espace-temps activité). L'expologie doit permettre de déterminer la distribution statistique des risques dans les populations en fonction de leurs caractéristiques et vulnérabilité. Cela suppose de pouvoir agréger l'ensemble des contributions des compartiments environnementaux et leurs évolutions temporelles en interaction avec les indicateurs socio-économiques de l'état de santé.

Le transport d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols non saturés



J. Michel/S. Denys

Dans les régions à forte tradition industrielle, comme la Lorraine, l'arrêt des usines métallurgiques et des cokeries a généré de vastes superficies de friches industrielles. Les sols de ces friches peuvent être pollués par des contaminants organiques, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), des métaux tels que le cadmium, le plomb, le zinc ou encore des cyanures. Les HAP sont des composés organiques neutres, hydrophobes et apolaires. Leur limite de solubilité dans l'eau à 20 °C varie entre 32 mg/L, pour les plus solubles comme le naphthalène, et 10⁻⁴ mg/L pour les moins solubles comme l'indéno[1,2,3-cd]pyrène. Certains de ces composés sont cancérigènes et/ou mutagènes (HAP, cadmium). Ces polluants peuvent être

fortement retenus dans les sols et les sédiments, mais peuvent également migrer et atteindre les ressources en eau. Il est donc indispensable d'étudier et de prévoir leur migration dans les sols ainsi que leur éventuel transfert vers la nappe phréatique, pouvant résulter en la contamination de la nappe et en l'exposition des personnes et des écosystèmes.

En général, l'étude des mécanismes régissant le transport des polluants dans les sols est réalisée d'abord en laboratoire, en réacteur fermé, puis par des expériences en colonnes, de petites dimensions (10 cm de diamètre et 20 cm de haut au maximum) et qui sont remplies avec une terre tamisée, ce qui peut amplifier ou masquer certains phénomènes. De plus, la majeure partie des études est réalisée en conditions d'écoulement saturées (tout l'espace poral du sol est rempli d'eau), alors que, dans la plupart des cas, la pollution pénètre dans le sol par la zone non saturée (un mélange d'eau et d'air est présent dans l'espace poral du sol). Pour conduire des études dans des conditions représentatives de la réalité, il est donc nécessaire d'étudier le sol en conditions non saturées afin de mettre en évidence l'influence d'un mélange d'eau et d'air sur la migration et la réactivité des contaminants.

L'objectif de ce travail de thèse (réalisé au GISFI – Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles – en partenariat avec l'INERIS) était d'évaluer

la migration des HAP dans un système qui reflète au mieux les conditions du terrain, et de comparer les résultats avec ceux obtenus en colonne de laboratoire. Il a été choisi de travailler à une échelle intermédiaire entre le laboratoire et le terrain, en utilisant une colonne lysimétrique originale (2 m de hauteur), soumise aux conditions naturelles régissant sur un site, pendant une période de suivi de 15 mois.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Terre contaminée

Dans le cadre de ces travaux, les expériences ont été effectuées sur une terre provenant d'une friche de cokerie lorraine, située à Homécourt (Meurthe-et-Moselle). Sur ce site, les installations ont été démantelées en 1985. Les sols y sont pollués sur une profondeur de 5 m par des goudrons et des HAP, des métaux et, localement, par des cyanures. De grandes quantités de terre ont été prélevées dans les deux premiers mètres, homogénéisées, quartées (c'est-à-dire séparées en sous-échantillons de même masse) puis criblées à 15 et à 4 cm.

Cette terre est majoritairement sableuse et son pH relativement élevé (8,3) en raison du taux de calcaire présent (287 g/kg). Le taux de carbone organique est également élevé (13,9 %) en raison des activités qui ont eu lieu sur le site, comme les dépôts de charbon par exemple. Les teneurs en Cu, Zn, Pb et Cd (respectivement

RÉFÉRENCES

- [1] Baize D. Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français – Résultats généraux du programme ASPITET. Le Courrier de l'environnement 39, 2000.
- [2] Michel J. Transport d'hydrocarbures aromatiques polycycliques et de métaux dans les sols non saturés. Thèse de doctorat, Nancy, INPL: 253, 2009.
- [3] Michel J., Gujisaitte V., Ouvrard S., Denys S., Simonnot M.O., Les expériences de laboratoire permettent-elles de prévoir le transport de HAP et de métaux à l'échelle du lysimètre de terrain ? Actes du congrès Deuxièmes rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués : pollutions locales et diffuses, 2009.
- [4] Ngo V. V., Michel J., Latifi M. A., Lucas L., Simonnot M. O., Analyse de sensibilité et d'estimabilité des paramètres affectant la percée des bromures – Comparaison entre le modèle de porosité uniforme et le modèle de double porosité, Actes du congrès SFGP, 2009.

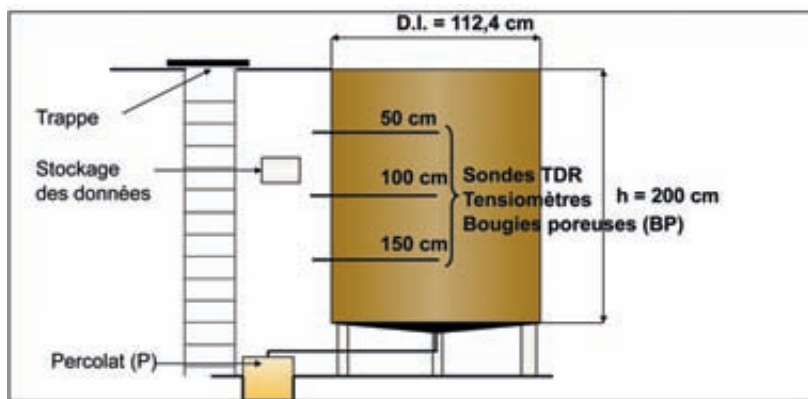


FIGURE 1

VUE EN COUPE DU LYSIMÈTRE

La solution du sol est prélevée à 4 niveaux différents dans le lysimètre : 50, 100, 150 cm (3 bougies poreuses, notées BP) et 200 cm (percolat, noté P, drainage libre, en fond de lysimètre). Aux profondeurs 50, 100 et 150 cm, une sonde TDR et un tensiomètre sont également mis en place.

45,5 ; 391 ; 153 et 7,69 mg/kg) sont supérieures aux valeurs habituellement rencontrées dans les terres agricoles françaises [1], montrant qu'une pollution par les métaux a bien eu lieu sur ce site – bien que n'étant pas énormément plus élevées (2 à 4 fois plus élevées, sauf pour le Cd pour lequel elles sont 17 fois plus élevées). La concentration totale en 16 HAP « US EPA » (16 HAP répertoriés par l'agence de la protection de l'environnement aux États-Unis US EPA en raison de leur grande toxicité) est d'environ 5 g/kg de terre (les bruits de fond rural et urbain sont inférieurs à 5 mg/kg).

SYSTÈME EXPÉRIMENTAL

Le lysimètre est un cylindre enterré, en inox, de 2 m de hauteur et de 1 m² de section (figure 1). Il est placé sur peson, ce qui permet de connaître, à tout instant, sa masse et donc sa teneur en eau. L'eau de drainage est évacuée par un orifice en fond de lysimètre et récupérée dans une bonbonne en verre. Un jeu de trois sondes – une sonde TDR (Time Domain Reflectometry), un tensiomètre et une bougie poreuse, permettant le prélèvement de la solution du sol – est placé à trois profondeurs différentes (50, 100 et 150 cm) ; la température du sol est également mesurée. La solution du sol est ainsi prélevée à quatre niveaux différents : 50, 100, 150 cm (3 bougies poreuses, notées BP) et 200 cm (percolat noté P,

drainage libre, en fond de lysimètre). Les sondes TDR sont utilisées pour mesurer la teneur en eau volumique du sol. Les tensiomètres permettent de mesurer la charge hydraulique du sol. Les données sont recueillies et enregistrées sur des pas de temps horaires. Le lysimètre est soumis aux conditions naturelles de température et de pluviométrie et il est maintenu en « terre nue ». Une station météo permet de mesurer la pluviométrie. En fond de lysimètre, une couche de 15 cm de sable a été placée afin d'éviter l'entraînement et l'accumulation de terre dans les tuyaux. Il a ensuite été rempli avec 3 tonnes de terre, par couches successives de 200 kg. Le lysimètre a été suivi sur une période de 15 mois, au cours desquels 19 campagnes de prélèvement d'eau (eau interstitielle et/ou percolat) ont été réalisées. Les analyses des 16 HAP dans les collectes ont été effectuées sans filtration. Dans le cadre d'autres travaux de

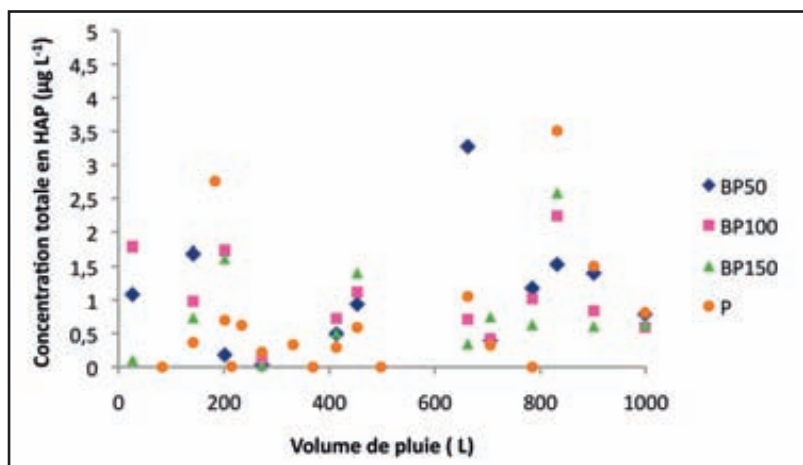
recherche (Michel, 2009), des échantillons de terre provenant du même lot ont été tamisés et placés en colonne (diamètre intérieur = 9,4 cm, hauteur = 21 cm). Ces colonnes de terre ont été soumises à des écoulements en milieu saturé et non saturé au laboratoire. Les conditions opératoires étaient contrôlées et les débits d'alimentation constants. Les 16 HAP ont été dosés dans les collectes.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La figure 2 présente l'évolution des concentrations totales en 16 HAP dans les bougies poreuses et dans le percolat, au cours des 15 mois de suivi. Au niveau du percolat (P), les concentrations totales en HAP sont faibles et en moyenne de 1 µg/L. On note deux points à 2,75 et 3,5 µg/L, ce qui reste cependant dans une gamme de concentrations basses. Dans certains percolats, les 16 HAP n'ont pas été détectés. Le comportement des HAP totaux est le même au niveau des bougies poreuses

FIGURE 2

ÉVOLUTION DES CONCENTRATIONS TOTALES EN HAP DANS LE PERCOLAT (P) ET LES BOUGIES POREUSES (BP). Au niveau du percolat (P) et des bougies poreuses (BP), les concentrations totales en HAP dans l'eau du sol sont du même ordre de grandeur. Elles sont faibles et en moyenne de 1 µg/L.



(BP). Les concentrations sont du même ordre de grandeur que dans le percolat aux trois niveaux de prélèvement. Les répartitions des concentrations en fonction des profondeurs de prélèvement ne semblent pas suivre un ordre logique. De même, l'alternance d'épisodes pluvieux et de périodes de séchage auxquels est soumis le lysimètre n'a pas d'effet sur le relargage des HAP aux quatre profondeurs de prélèvement.

En colonne de laboratoire, les concentrations mesurées dans les collectes étaient largement supérieures à celles obtenues en lysimètre (entre 50 et 350 µg/L et entre 7 et 15 µg/L pour les conditions saturées et non saturées respectivement). Ceci montre que les conditions opératoires, et en particulier le tamisage de la terre et le taux de saturation du milieu, influencent fortement le relargage des HAP. Ainsi, lors du tamisage de la terre, les agrégats peuvent être cassés et peuvent de ce fait exposer à la solution des contaminants qui auraient été « piégés » dans la matrice solide, permettant un relargage plus élevé. Par ailleurs, les concentrations faibles mesurées en lysimètre s'expliquent également par un taux de saturation très faible de ce dernier (proche de celui régnant dans la zone non saturée du sol sur le terrain). Ainsi, l'eau ne va pas être en contact avec tout l'espace poral lors de l'écoulement, et va éviter les zones hydrophobes contenant les HAP, impliquant un passage en solution moins élevé de ceux-ci. Ceci permet également d'expliquer le fait que l'intensité et la durée des épisodes pluvieux et des périodes de séchage n'ont pas d'influence sur le relargage des HAP, puisque quels que soient les événements pluvieux appliqués au lysimètre, la teneur en eau était constante à l'intérieur du système. En effet, le volume poreux du système est de 1 000 L, et sa surface de 1 m². Les plus fortes pluies observées sur la période de suivi étant de 30 mm, le volume d'eau introduit dans le lysimètre était de 30 L au maximum. Ainsi, un tel volume d'eau ne permet pas d'augmenter significativement la teneur en eau dans l'espace poral du sol, expliquant pourquoi elle était globalement constante sur toute la période de suivi. En lysimètre, tous les HAP peuvent avoir été majoritairement transportés sous forme dissoute puisque leur concen-

FIGURE 3

VUE DES 24 LYSIMÈTRES ÉQUIPANT LA STATION EXPÉRIMENTALE D'HOMÉCOURT



tration dans les collectes est inférieure à leur limite de solubilité dans l'eau à 20 °C. Néanmoins, certains HAP lourds sont probablement transportés également sous forme particulaire puisque dans certaines collectes ils s'en rapprochent ou la dépassent légèrement, au niveau du percolat.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les expériences conduites sur le lysimètre et en colonne de laboratoire ont permis de mettre en évidence l'importance du taux de saturation du milieu sur le relargage des HAP dans les sols non saturés en eau. Ainsi, dans les conditions opératoires du lysimètre, à savoir à un taux de saturation faible, proche de celui rencontré sur le terrain, les HAP sont très fortement retenus dans le sol. Les concentrations en HAP dans l'eau du sol sont donc faibles – majoritairement inférieures à 1 µg/L. Néanmoins, la quantité d'eau qui a percolé en fond de lysimètre sur les 15 mois de suivi correspond à la moitié du volume poreux de celui-ci. Or, les expériences conduites au laboratoire sur des systèmes de petites dimensions s'intéressent en général au relargage des contaminants en faisant passer une dizaine de volumes poreux dans la colonne. C'est pourquoi une étude du système lysimétrique sur une plus longue durée, engendrant des volumes plus importants serait pertinente, afin de confirmer à long terme les tendances observées ici. Ceci permettra de mettre en évidence les phénomènes responsables de la mobilité des contaminants organiques dans les sols non saturés. Par ailleurs, des dispositifs plus légers et permettant de fournir des résultats sur une échelle de temps plus courte sont nécessaires. C'est pourquoi une autre partie du travail a consisté à dimensionner un essai représentatif du lysimètre en grande colonne (diamètre 15 cm,

hauteur 30 cm). Elle était remplie de terre non tamisée et soumise à des épisodes pluvieux. Les concentrations en HAP dans les collectes étaient conformes à ce qui a été observé en lysimètre. Ainsi, il pourrait être envisagé de s'intéresser plus particulièrement à l'influence du taux de saturation sur le relargage des HAP, par exemple à l'aide d'expériences de lixiviation des polluants à des teneurs en eau fixées.

ABSTRACT

In industrialized countries, numerous brownfields polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metals are identified. Some of these pollutants are carcinogenic and mutagenic. Their migration through the soil and their likely downward transfer to the water table should be investigated. Field scale studies are essential to determine the possible impacts on groundwater, human beings and ecosystems. The aim of this PhD work carried out in the frame of the GISFI (French Scientific Interest Group working on Industrial Brownfields) was to assess PAH transport in a former coking plant soil using an original lysimetric system. The lysimeter was filled with 3 tons of a polluted soil (PAH: 5 g/kg). It was a stainless steel column (2 m high, 1.124 m diameter) equipped with tensiometers, TDR probes and suction cups at three depths (50, 100 and 150 cm). Therefore water was sampled at four levels: 50, 100, 150 and 200 cm (free drainage water at the bottom of the lysimeter). It was submitted to the natural atmospheric conditions and its surface was bare. The 16 US EPA PAHs were monitored in pore water (3 levels) and in the leaching water, at the outlet of the lysimeter. PAH concentrations in water were very low (below 1.5 µg/L) in the four sampling levels. They were below or in the range of the solubility. This study showed that PAH release was highly dependent on the water content of the soil.

COMRISK : pour l'implication des populations dans la gestion des sites ou sols pollués



B. Hazebrouck

Les populations sont de plus en plus considérées comme parties intégrantes de l'évaluation et de la gestion des risques liés aux sites pollués. Mais leur implication est également reconnue comme un exercice difficile, mal maîtrisé, voire périlleux. L'INERIS et l'IRSN (Institut de radioprotection et sûreté nucléaire), en collaboration avec la Cire Ile-de-France (Cellule interrégionale d'épidémiologie d'Ile-de-France), ont développé pour l'ADEME un guide et une boîte à outils pour aider à concevoir et mettre en place un dialogue entre acteurs sur l'évaluation et la gestion d'un site pollué. Le guide et la boîte à outils s'adressent à tous les acteurs des sites et sols pollués. Ils sont accessibles sur www.comrisk.fr. Le guide et la boîte à outils sont fondés sur une étude approfondie de l'état des

connaissances et des pratiques concernant la perception et la communication des risques, et aussi l'implication opérationnelle des populations dans l'évaluation et la gestion des risques liés à l'environnement : sols pollués mais aussi décharges, installations classées, risques naturels (effondrement...), implantation d'une antenne relais... Le guide est largement applicable à ces autres questions locales de risques liés à l'environnement.

En outre, trois enquêtes ont été menées en France :

- une enquête par sondage sur la perception des sols pollués, auprès de riverains de sites pollués ;
- deux enquêtes de retour d'expérience, par interview et questionnaire, auprès d'un large panel d'acteurs concernés.

Les recommandations, brochures,

supports d'événements issus de l'étude ont été testés auprès de différents publics : DRASS, public concerné ou non, comité de pilotage multiacteurs.

Pourquoi impliquer les populations dans l'évaluation et la gestion d'un site pollué ?

- les principes démocratiques et les obligations réglementaires font de l'information et de l'implication du public un droit et même un devoir ;
- la légitimité des experts est restreinte aux études techniques, les experts ne sont pas légitimes pour faire des choix de gestion, de valeurs ;
- mais les décideurs institutionnels (autorités, industriels...) souffrent d'un déficit de confiance (figure 1, baromètre IRSN...). L'implication de la population locale doit alors logiquement devenir directe ;
- les préoccupations et attentes des populations concernant le site sont complexes et multiformes, bien au-delà de la question des risques sanitaires, et déterminantes pour l'acceptation des solutions de gestion. Leur connaissance, leur compréhension, leur prise en compte passent par l'écoute et le dialogue ;
- l'implication des populations est un facteur de qualité dans l'évaluation et la gestion du site, par l'apport d'infor-

Faites-vous confiance aux acteurs suivants concernant leur rôle contre la pollution du sol ?

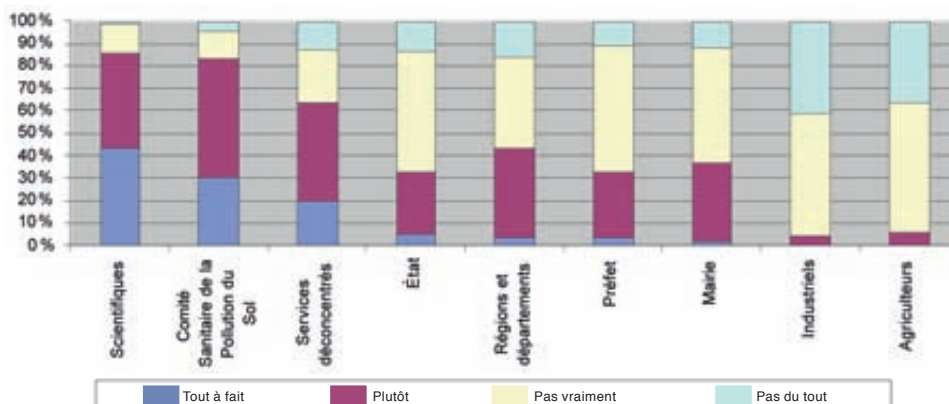


FIGURE 1
SONDAGE EXPLORATOIRE COMRISK :
CONFIANCE ACCORDÉE
AUX INTERVENANTS DANS LE DOMAINE
DE LA POLLUTION DU SOL

● Évaluation du site et des solutions, expertise : informations, idées, questionnements...
● Prise de décision sur les études et les solutions
● Mise en œuvre pratique de mesures de réduction des risques
● Enjeux connexes de la gestion du site
● Échéancier, délais
● Choix de procédures de validation et de prestataires
● Communication avec la population moins impliquée
● Organisation de l'implication des populations

FIGURE 2
CHAMPS
D'IMPLICATION DES
POPULATIONS DANS
L'ÉVALUATION ET LA
GESTION D'UN SITE

mations locales et de questionnements neufs, l'ouverture des lieux, la participation aux actions de limitation individuelle de l'exposition (ventilation/dépoussiérage des locaux, non-consommation de produits du jardin...);

● l'évaluation et la gestion des risques, concepts de tous les jours, sont pleinement accessibles aux néophytes, moyennant de l'engagement personnel, en temps et en ouverture d'esprit, des diverses parties.

Ces intérêts se traduisent en autant de possibles bénéfiques – et objectifs – de l'ouverture aux populations de l'évaluation et de la gestion d'un site pollué. Néanmoins, l'implication des populations ne résout pas tout : elle « ne supprime pas les conflits, elle les explicite » comme le formule Laurent Mermet (Journal de l'Environnement).

DIFFICULTÉS ET OBSTACLES

L'étude a décrit différents obstacles à l'implication des populations dans le contexte des sites pollués en France.

● Des doutes dans le public sur la sincérité de l'ouverture aux populations, qui est alors vue comme une astuce pour gagner du temps ou faire « cautionner l'inacceptable » par les populations. De fait, l'implication des populations est le plus souvent imposée aux gestionnaires par une crise ou par le besoin d'une participation des populations.

● Une culture française de la confrontation plutôt que du dialogue et du compromis, qui se traduit par des attitudes de défiance, d'agressivité, de fermeture, ou par des inhibitions parfois.

● Une absence de cadre et de moyens pour l'implication des populations.

● Un fonctionnement encore cloisonné, hermétique, peu réactif de la gestion des sites, entre les différents intervenants. La compréhension des rôles et des fonctionnements de chacun est essentielle pour un dialogue de qualité, qui évite les incompréhensions, les attentes déçues, les suspicions, la défiance.

Le bilan coût-bénéfice, notamment financier, de l'implication des populations reste à étudier. Elle peut occasionner des surcoûts comme des économies [4].

STRATÉGIES, GUIDE ET OUTILS POUR L'IMPLICATION DES POPULATIONS SUR UN SITE

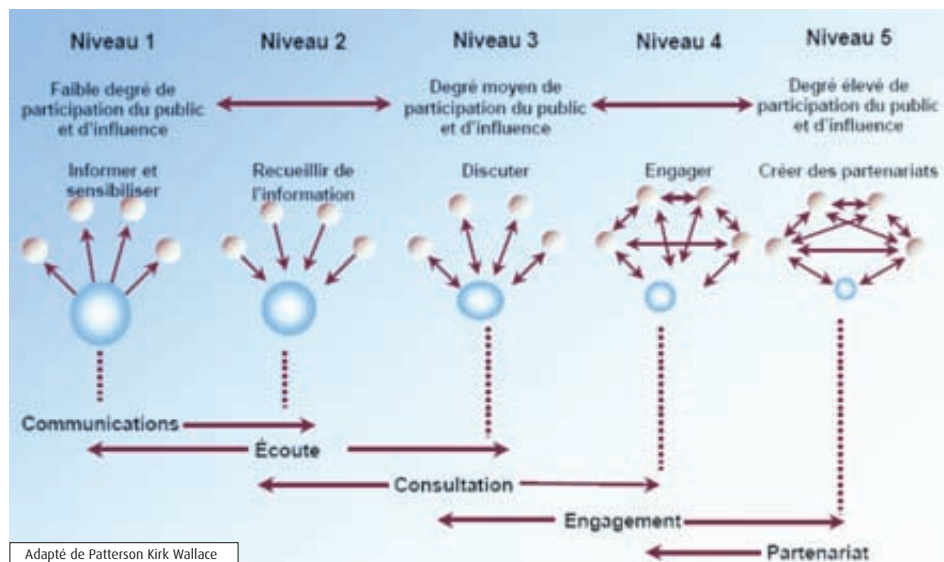
La stratégie d'implication des populations – objectifs, degrés (figure 3), champs de l'implication (figure 2), stratégie de mise en œuvre – doit être adaptée à la situation du site. L'élaboration d'une stratégie et d'un plan d'implication des populations passe donc par

un recensement et une analyse des acteurs, des enjeux et du contexte. Cette étape conduit à reformuler la question posée, de sorte à intégrer l'ensemble des enjeux pertinents.

Une bonne implication des populations requiert d'établir une relation plus symétrique que la simple « communication », une relation où la confiance est aussi importante que les détails techniques, où il devient possible d'expliquer les logiques et modèles d'évaluation de chacun, d'échanger les vues sur les perceptions, les idées, sur les questions relatives au site et sur les enjeux connexes, sur les langages et les modalités d'échange. L'implication des populations devrait débuter dès que possible, avant l'apparition de problèmes ou la montée d'inquiétudes, de sorte à « construire la confiance avant qu'elle ne soit nécessaire » [1].

Un engagement individuel et collectif des différents acteurs sur des valeurs et des attitudes de respect et d'ouverture

FIGURE 3
CONTINUUM DE
LA PARTICIPATION
DU PUBLIC SELON
SANTÉ CANADA
(2000)



Adapté de Patterson Kirk Wallace

est nécessaire : écoute, disponibilité, empathie, adaptation du langage, humilité, cohérence entre administrations. La constitution d'une équipe de site organisée et formée notamment au dialogue est recommandée.

Le guide et la boîte à outils proposent

des recommandations expliquées, organisées en fiches opérationnelles, des documents supports (informations, modèles, FAQ) et un jeu de brochures, transparents, poster, « supports d'événement » sur les sites pollués.

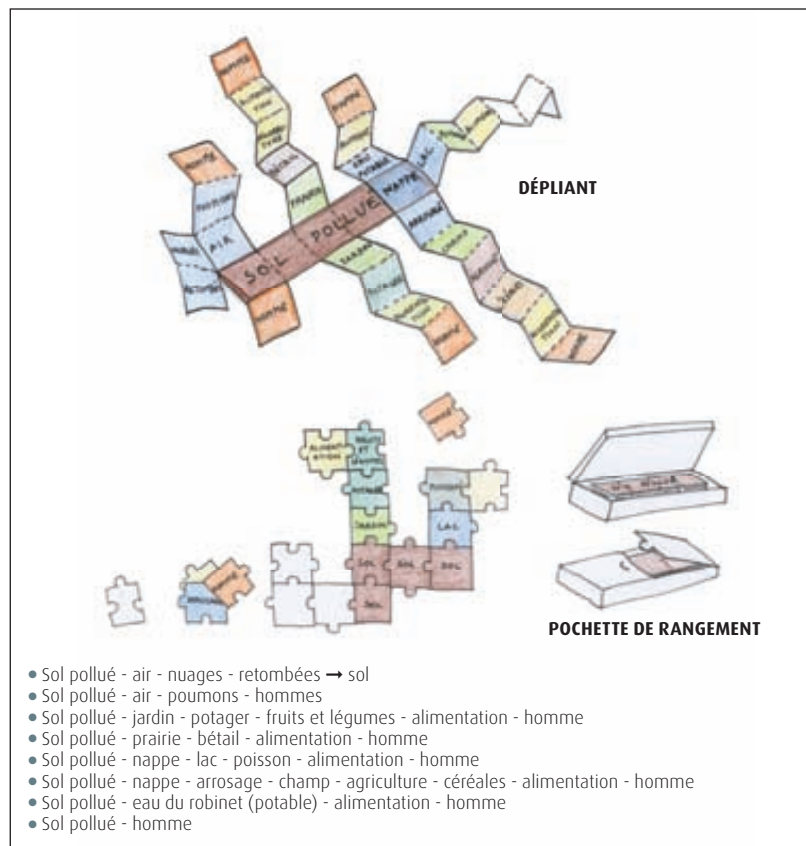


FIGURE 4

SUPPORT PÉDAGOGIQUE PRÉSENTANT LE SCHÉMA CONCEPTUEL D'EXPOSITION UTILISÉ POUR FAIRE COMPRENDRE L'ÉVALUATION ET LA GESTION DES SOLS POLLUÉS (KRAUS ET BAUMONT, 2008)

ABSTRACT

INERIS and IRSN, with the CIRE Ile de France, have developed for ADEME a guide and a toolbox for organising public involvement in the assessment and the management of contaminated sites. The guide and the toolbox propose operative recommendations, background documents, FAQ, and a set of slides, leaflets and "event supports" about contaminated site. They are intended for all stakeholders including the public, and are available on www.comrisk.com. Communication at a contaminated site should take into account all site-related concerns and expectations: health risks, but also property value, employment concerns, local conflicts, relation to the local environment, etc. Respect, honesty, humility are key requirements. Public involvement actually helps find the best solution for the site. The guide helps analyse the context, define the objectives and a strategy for the public involvement, and choose and adapt involvement tools.

FIGURE 5
LE GUIDE COMRISK



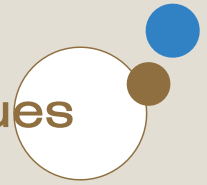
WEB

www.comrisk.fr

RÉFÉRENCES

- [1] Communication on contaminated land, 2004. www.nicole.org.
- [2] Hazebrouck B., Empereur-Bissonnet P., Ledrans M., Goldschmidt F., Ramel M., Cochet C., Lafon D., Momas I., Masse R., Zmirou Navier D., Quenel P. Études d'évaluation des risques à Vincennes 2001-2004 : approche déployée pour estimer les risques sanitaires en rapport avec l'environnement d'un quartier au regard de son passé industriel. Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire, n° 7-8, pp. 62-64, 2007.
- [3] Santé Canada. Politiques et boîte à outils concernant la participation du public à la prise de décisions, 2000.
- [4] US EPA. Supplement to RAGS Part A : Community Involvement in Superfund Risk Assessments. March 1999.
- [5] Ledrans M., Hazebrouck B., Clavel J., Empereur-Bissonnet P., Cochet C., Fourme E., Garnier R., Goldschmidt F., Hartmann O., Jouglé E., Lacour B., Lafon D., Momas I., Masse R., Ramel M., Suzan F., Zmirou-Navier D., Quenel P. Regroupement de cancers pédiatriques à Vincennes, rôle du comité scientifique de 2001 à 2006 : une confrontation entre les attentes sociales et l'expertise scientifique. Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire, n° 7-8, pp. 57-59, 2007.

Les inégalités environnementales au cœur des développements méthodologiques de l'INERIS

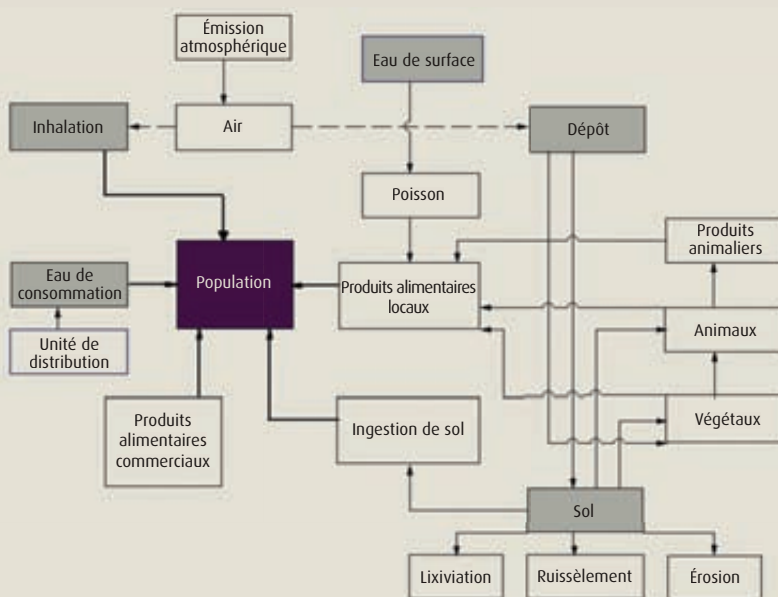


Les dégradations de l'environnement sont très hétérogènes selon les territoires et ne touchent pas les individus de la même façon, engendrant des situations d'« inégalités environnementales ». Dans certaines zones géographiques, les populations apparaissent davantage exposées aux effets des pollutions de l'air, du sol ou de l'eau. Le second Plan National Santé Environnement inscrit parmi ses objectifs l'identification de ces « points noirs environnementaux », la réduction des expositions à ces pollutions et la protection de la santé des populations. Une cartographie des inégalités d'exposition sur un territoire établie seulement par l'utilisation directe de mesures environnementales ne répond pas à ces objectifs à cause de sérieuses limites méthodologiques. Ainsi, une juxtaposition des cartes de contamination des compartiments environnementaux isolés (air, eau ou sol) ne rend pas compte des interactions entre milieux ni, in fine, des contributions respectives des compartiments environnementaux au transfert d'un contaminant vers l'individu. De plus, l'évaluation

des expositions à l'échelle d'un territoire requiert le croisement avec des données relatives à la population. Pour aller plus avant, les outils de l'évaluation de l'exposition et ceux de la modélisation multimédia (air/sol/eau/biosphère), interfacés dans un Système d'Information Géographique (SIG), constituent un ensemble particulièrement adapté. L'INERIS vise à les mettre en œuvre dans une plateforme de modélisation intégrée « sources (émissions) – vecteurs (milieux, aliments) – cibles (populations) », à différentes échelles spatiales (globale, régionale et locale) et temporelles. L'INERIS coordonne le programme de recherche CIRCE (Cancer Inégalités Régionales Cantonales et Environnement) avec ses partenaires (INSERM et Observatoires Régionaux de Santé impliqués). Il apporte en outre une contribution spécifique dans le cadre de la thèse SIGFRIED (Système d'Information Géographique, Facteurs de Risques Environnementaux et Décès par cancer) en partenariat avec l'UTC. L'objectif de cette thèse, soutenue en décembre 2010, est de construire un indicateur spatialisé de l'exposition de la population aux substances chimiques.

Ces travaux ont déjà permis d'établir la faisabilité de la construction de la plateforme de modélisation à une échelle spatiale fine, de l'ordre du km (Caudeville *et al.*, 2009). Différentes techniques ont permis d'améliorer la cartographie de variables d'intérêt :

- une méthode itérative pour aboutir à des échelles fines pour la cartographie des densités de population ;
- un indicateur de proximité pour l'exposition liée à l'ingestion de poissons d'eau douce ;
- une technique d'interpolation spatiale pour traiter de façon homogène des données de contamination de sol en dépit des niveaux d'information géographique différents (ex : points versus surfaces) ;
- le géocodage de l'Inventaire National Spatialisé (INS) des émissions de polluants pour pouvoir utiliser un modèle de chimie-transport (Chimère) sur une échelle fine ;



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

Un nouveau projet « PLAINE » – Plateforme intégrée pour l'analyse des inégalités d'exposition environnementale – va compléter les travaux issus de la thèse SIGFRIED qui s'appliquent essentiellement aux métaux et à l'échelle régionale (voir carte ci-contre). Le projet vise le développement d'une plateforme intégrée et spatialisée permettant de déterminer, sur une grande gamme d'échelles (jusqu'à la France entière), les inégalités liées aux expositions environnementales des populations à des substances chimiques variées (métaux, Polluants Organiques Persistants, pesticides). Le développement de cette plateforme nécessite un modèle présentant 2 caractéristiques :

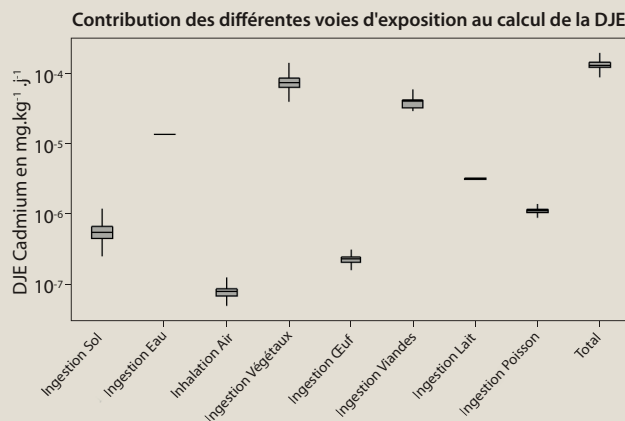
- la capacité de prendre en compte la variété des situations de transport et de transfert des polluants dans les compartiments environnementaux et celle des voies d'exposition à différentes échelles spatiales (globale, régionale et locale) et temporelles (sources passées et actuelles) ;
- la possibilité de décrire sur une échelle de l'ordre kilométrique les principales sources polluantes, média environnementaux (eau, air, sol), voies d'exposition (inhalation, ingestion d'eau et de nourriture) et les populations des zones évaluées.

Cette extension sera facilitée par le développement ad hoc d'outils d'analyse spatiale permettant de coupler modèles et bases de données géo référencées de sources et formats multiples. La plateforme « génération 2 » ainsi construite constituera la base d'une structure automatisée où seront associées les données d'émission à la source, de mesures environnementales, d'indicateurs socio-économiques et de santé.

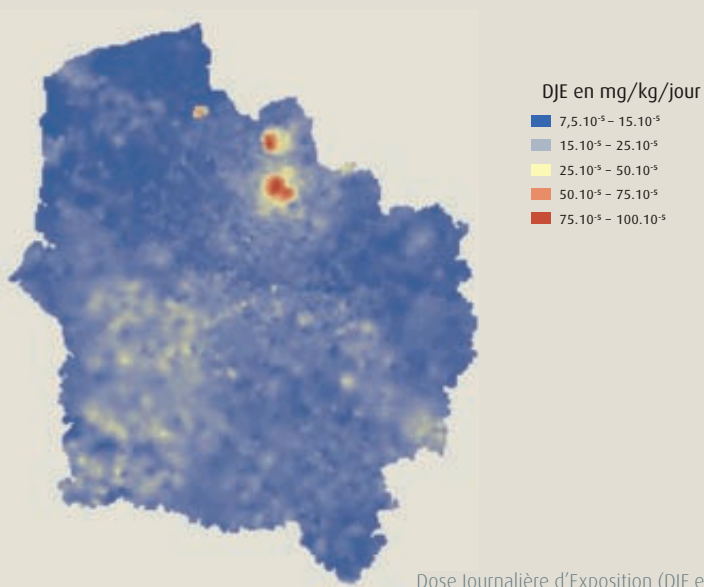
C. Boudet et J. Caudeville

RÉFÉRENCES

[1] Caudeville *et al.* Construction d'un indicateur d'exposition spatialisé de l'environnement : application au Nord-Pas-de-Calais Air Pur 76 (2009), p. 49-55



Contribution des différentes voies d'exposition à la dose journalière d'exposition (cas du cadmium), pour l'ensemble de la population des régions Picardie et Nord-Pas-de-Calais. La DJE s'exprime en mg/kg/jour. Les résultats sont présentés sous forme de « boîtes à moustache », qui traduisent la variabilité des résultats à l'intérieur de la population sur la zone considérée. Les barres verticales représentent l'écart-type des résultats. L'ingestion de végétaux représente la plus forte voie d'exposition.



Dose Journalière d'Exposition (DJE en mg.kg⁻¹.j⁻¹) de cadmium pour l'ensemble de la population en région Nord-Pas-de-Calais et Picardie, calculée sur 70 ans. Carte extraite de la thèse SIGFRIED (Caudeville J, 2010).

Toxicologie environnementale



Le Grenelle de l'Environnement préconisait un renforcement de la toxicologie et de l'écotoxicologie au niveau national. 2009 a été l'année de la concrétisation de cette volonté, avec la création du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie, entité nationale regroupée autour de l'INERIS et de son réseau de partenaires régionaux (UTC, UPJV, La Salle Beauvais...) et nationaux (ANTIOPEs...). Grâce à l'attribution d'une allocation spécifique, l'INERIS lance 9 grands projets regroupant 48 partenaires, appartenant à l'INSERM, le CNRS, l'INRA, le CEA ou l'université. Ces projets ont pour ambition le renforcement des moyens humains et l'amélioration des outils et méthodes de la toxicologie et de l'écotoxicologie prédictives, ainsi que l'amélioration de la maîtrise des risques liés à l'utilisation des substances chimiques.

En appui à la réglementation, et en particulier au règlement REACH, ces projets contribuent au développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale, en particulier de tests *in vitro* (dont la mise en place et la validation de modèles de barrières) et de méthodes *in silico* (grâce à l'outil informatique) : QSAR⁽¹⁾, et modèles de toxicocinétique. Ces domaines font l'objet d'un partenariat fort entre l'UTC et l'INERIS concrétisé par la mise en place de la chaire d'enseignement et de recherche « modélisation mathématique et biologie systémique pour la toxicologie prédictive » dans le cadre de la Fondation pour l'innovation de l'UTC. Il s'agit de faire reconnaître et de mettre à disposition ces méthodes alternatives aussi bien dans la communauté scientifique, que vis-à-vis des industriels et des pouvoirs publics. Le Pôle national applicatif en Toxicologie Écotoxicologie s'attache d'une part à se doter d'outils structurants partagés (Plateforme d'excellence dans les sciences du vivant en partenariat avec LaSalle Beauvais, ou Innocell Valley en partenariat avec l'UTC). Il vise d'autre part à favoriser l'émergence de jeunes entreprises innovantes préférentiellement sur

le site de l'INERIS, grâce au transfert technologique. Les travaux de l'Institut s'articulent autour de trois grands thèmes : le développement de tests *in vitro*, le développement d'outils de type biomarqueurs, et la modélisation mathématique à différentes échelles du vivant en cohérence avec les recommandations du groupement d'intérêt scientifique « Plateforme française pour le développement des méthodes alternatives en expérimentation animale »⁽²⁾. Les perturbateurs endocriniens, les nanoparticules et les champs électromagnétiques, sujets de préoccupations sociétales fortes, sont largement étudiés dans ce contexte.

Le développement des outils d'évaluation des impacts environnementaux passe par l'étude et la reconnaissance de biomarqueurs – marqueurs biologiques manifestant la présence de polluants – et par la mise en place de tests *in vitro* permettant d'améliorer les connaissances sur le mode d'action des substances, ainsi que de faire le lien entre état écologique et état chimique de la Directive cadre sur l'Eau.

Dans le domaine des champs électromagnétiques, l'INERIS a participé à la table ronde « radiofréquences, santé, environnement » organisée par le ministère de la Santé avec le concours du ministère de l'Écologie, et le secrétariat d'état au développement de l'économie numérique. L'Institut a par ailleurs été chargé du pilotage des opérations de mesure sur le terrain pour les niveaux d'exposition, dans le cadre de l'évaluation des conséquences d'un abaissement de l'exposition aux ondes radioélectriques émises par les antennes relais.

NOTES

(1) Quantitative structure activity relationships.

(2) État des lieux des méthodes alternatives dans le domaine de l'expérimentation animale en France, Rapport à Madame la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche – mars 2010.



Les grands chantiers qui attendent l'INERIS pour les années à venir au plan méthodologique :

- les méthodes de criblage à haut débit, visant à étudier et à identifier des molécules aux propriétés nouvelles dans le domaine de la génomique et de la protéomique en utilisant la bioinformatique ;
- les approches alternatives en expérimentation animale (*in vitro*, *in silico*, tests sur embryons)

Les grands chantiers qui attendent l'INERIS pour les années à venir sur le plan des polluants émergents :

- La toxicité des nanoparticules ;
- les perturbateurs endocriniens : leurs effets sur d'autres fonctions que la reproduction, les médicaments à effet perturbateur endocrinien.

La toxicocinétique prédictive



A. Péry

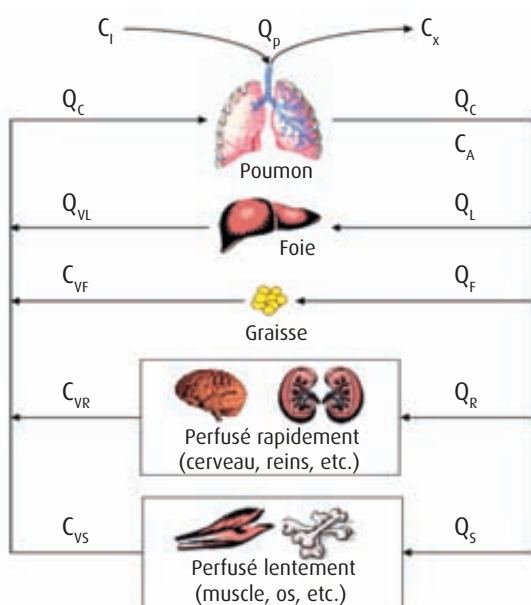


FIGURE 1

EXEMPLE DE DESCRIPTION SCHÉMATIQUE D'UN MODÈLE PBPK

L'organisme est représenté par une série de compartiments, interconnectés par les flux sanguins et aériens, dont l'intensité est représentée par le paramètre Q , et la concentration en substance par le paramètre C .

Les relations « dose-effet » développées en évaluation de risques des substances chimiques sont des modèles mathématiques simples liant la dose extérieure à un effet observé. Des modèles de toxicocinétique relient les doses et les scénarios d'exposition avec les concentrations au niveau des tissus cibles des substances. Ils permettent d'intégrer explicitement le temps et de prédire la réponse pour différentes durées d'expositions ou pour des expositions variables au cours du temps. Mais pour extrapoler entre différentes voies d'exposition, entre différentes espèces ou entre différents âges, il est nécessaire d'intégrer la physiologie de l'organisme étudié.

Les modèles dits PBPK (Physiologically Based Pharmacokinetic) ont été développés dans ce but. Ils s'appuient sur la représentation de l'anatomie et de la physiologie de l'organisme ainsi que sur une description réaliste des mécanismes toxicocinétiques, c'est-à-dire les processus d'absorption, de distribution, de métabolisme et d'excrétion (ADME). Typiquement, l'organisme est représenté par une série de compartiments, propres à un tissu ou un groupe de tissus, interconnectés par les flux sanguins, biliaires ou aériens. Les paramètres de ces modèles sont soit spécifiques à la physiologie de l'organisme (volumes des organes ou flux sanguins) soit spécifiques à la substance (taux de métabolisme

ou constante d'affinité aux tissus). La figure 1 est une représentation schématique d'un modèle PBPK.

Nous présentons ici trois situations pour lesquelles nous avons utilisé des modèles de toxicocinétique dans un cadre d'évaluation du risque. Dans le premier exemple, nous avons contribué à un travail de l'INRS consistant à exploiter un modèle toxicocinétique simple dans le cadre d'évaluation de l'exposition au cobalt de travailleurs. Le second exemple présente nos développements récents d'un modèle PBPK générique capable de rendre compte de la cinétique des substances à l'échelle de la vie et des différences physiologiques entre individus. Le troisième exemple propose l'analyse de données d'imagerie pour évaluer la cinétique de nanoparticules inhalées.

L'étude en collaboration avec l'INRS à laquelle nous avons contribué consistait à développer et à exploiter un modèle toxicocinétique pour relier l'exposition atmosphérique de travailleurs au cobalt et sa concentration dans leurs urines [2]. Un seuil d'exposition atmosphérique au cobalt a été défini par l'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), société non gouvernementale qui, sans être un organisme de normalisation, publie des valeurs limites d'exposition en appui aux hygiénistes du travail. Pour le cobalt, le seuil de concentration urinaire est défini à partir d'une relation linéaire reliant

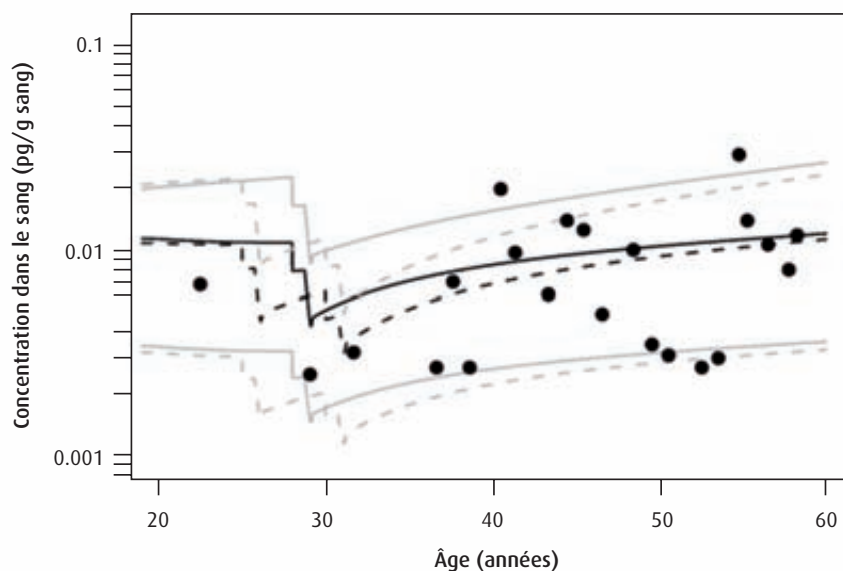


FIGURE 2
CONCENTRATIONS EN DIOXINE DANS LE SANG SIMULÉES (LIGNES) ET MESURÉES (POINTS) POUR DES FEMMES JAPONAISES.

Les lignes pleines sont les simulations pour les femmes ayant eu un seul enfant au cours de leur vie : les lignes en pointillés les simulations pour celles ayant eu deux enfants. La moyenne est représentée en noir et les intervalles de variabilité dans la population en gris. Le modèle propose une bonne prédiction à la fois de l'évolution temporelle de la moyenne et de la variabilité des mesures.

concentration dans l'air ambiant et concentration urinaire avec des mesures effectuées à un temps arbitraire. Dans notre étude, il s'agissait d'améliorer la définition du seuil de concentration urinaire et de mieux définir le moment de prélèvement. L'étude a montré la pertinence d'un modèle de toxicocinétique à deux compartiments, sans réalité physiologique définie, consistant en un compartiment central où l'air est inhalé et l'urine excrétée et un compartiment périphérique qui échange avec le compartiment central. L'estimation des paramètres du modèle a été réalisée dans un contexte bayésien à partir de données obtenues sur 16 travailleurs exposés à de la poussière de cobalt dans le cadre de leur travail. Une fois le modèle calibré, des simulations ont été réalisées afin de déterminer le moment d'échantillonnage optimal et le seuil urinaire à considérer, donnant lieu à un taux acceptable de faux négatifs et de faux positifs, en relation avec le seuil atmosphérique. Un prélèvement durant les trois dernières heures de la semaine de travail, avec un seuil de référence de 5 µg/L (trois fois inférieur au seuil actuellement utilisé), est ainsi préconisé. Le second exemple consiste dans le développement d'un modèle PBPK générique détaillant un grand nombre de tissus susceptibles d'être la cible de substances chimiques et décrivant la toxicocinétique sur la vie entière d'un humain [1]. Ce type de modèle est bien adapté pour simuler les expositions

chroniques à faibles doses et permet ainsi d'estimer l'impact de ces expositions sur l'humain en ciblant des périodes de la vie (enfance, grossesse) ou des caractéristiques physiologiques (différences de métabolismes, par exemple) susceptibles d'augmenter la sensibilité individuelle. Les fonctions décrivant l'évolution temporelle de la masse corporelle et celles décrivant les masses relatives des organes ont été améliorées par rapport aux fonctions proposées dans la littérature. En particulier, la variabilité interindividuelle au cours de la vie de la masse corporelle, des masses relatives des organes et des capacités de métabolisme et d'excrétion, a été intégrée au modèle. Les effets du vieillissement sur la physiologie ont aussi été intégrés au modèle, en modélisant l'atrophie musculaire, l'augmentation de la masse adipeuse, la diminution du flux cardiaque et la modification des flux spécifiques des organes. Par ailleurs, les changements du métabolisme liés à l'âge ont été modélisés en intégrant au modèle l'évolution temporelle de la quantité de protéines microsomales dans les différents tissus et en exprimant la vitesse maximale du métabolisme en fonction de cette quantité. Enfin, un modèle reliant structure physico-chimique et propriétés toxicocinétiques des substances a été intégré pour déterminer les coefficients de partition des substances entre le sang et les organes. Chez la femme, la modélisation du système mère/fœtus

lors de la gestation a été détaillée. Ainsi, les modifications des masses relatives des organes de la mère lors de la gestation et de la lactation ont été prises en compte. De plus, lors de la lactation, le tarissement du flux de lait en fonction de l'âge de l'enfant a été intégré en modélisant un sevrage partiel et complet de l'enfant. Les prédictions du modèle (valeur médiane et variabilité) ont été confrontées avec succès à des données réelles pour deux substances, le butadiène et la dioxine, comme l'illustre la figure 2 pour les concentrations sanguines en dioxine au sein de la population féminine japonaise.

Le dernier exemple que nous présentons correspond au développement d'un modèle PBPK spécifique aux nanoparticules de carbone inhalées par l'homme, dans le cadre du projet européen NANOSAFE [3]. Les données que nous avons analysées étaient des données d'imagerie fournies par nos partenaires de l'Université catholique de Leuven et proviennent d'un article qu'ils ont publié en 2002. Elles suggéraient un passage de particules dans le sang, mais aucune quantification n'avait été possible. Ces données correspondent à des particules de carbone marquées au technetium (^{99m}Tc) en suspension dans l'air inhalé par 5 hommes. Nous avons construit un modèle PBPK et développé une méthodologie capable de convertir des données d'imagerie

en concentrations dans les différents organes. Dans notre modèle, après absorption des nanoparticules, celles-ci sont pour la plupart déposées dans les poumons, une petite partie étant avalée et transférée directement dans l'estomac. Une part du technetium n'est pas liée aux particules. En outre, ces particules sont de tailles différentes avec des cinétiques divergentes. Nous avons donc distingué trois fractions de technetium : une fraction libre, une fraction liée aux petites particules (*i.e.* capables de passer la barrière pulmonaire) et une fraction liée aux grandes particules (*i.e.* qui restent au niveau du poumon sans atteindre la circulation sanguine). Nous avons montré que seule une faible proportion du technetium (6,7 %) était libre, mais, de la même manière, seule une faible proportion des particules (12,7 %) ont été capables de rejoindre la circulation sanguine, ce qui est cohérent avec d'autres études disponibles dans la littérature pour lesquelles le taux de passage avait pu être quantifié expérimentalement (de l'ordre de 5 %). La faiblesse de ce taux de passage ne retire rien à la nécessité d'une étude toxicologique au niveau de la circulation sanguine, notamment du fait de la lenteur de l'élimination des particules. La modélisation toxicocinétique est donc un outil indispensable pour mettre en relation l'exposition et la dynamique

de la concentration dans les fluides ou les tissus afin d'extrapoler à différents scénarios d'exposition. En outre, une modélisation fondée sur une prise en compte explicite des caractéristiques physiologiques des individus permet d'extrapoler entre individus ou de proposer des prédictions crédibles de la cinétique au cours de la vie entière. Enfin, ce type de modèle permet de créer une dynamique positive quant aux méthodes alternatives en expérimentation animale. Ainsi les développements en imagerie ou les progrès en expérimentation *in vitro* amélioreront le pouvoir prédictif des modèles.

RÉFÉRENCES

- [1] Beaudouin R, Micallef S, Brochet C. (2010). A stochastic whole-body physiologically based pharmacokinetic model to assess the impact of inter-individual variability on tissue dosimetry over the human lifespan. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 57:103-116.
- [2] Martin A, Bois FY, Pierre F, Wild P. (2009). Occupational exposure to cobalt: a population toxicokinetic modeling approach validated by field results challenges the biological exposure index for urinary cobalt. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 7:54-62.
- [3] Péry ARR, Brochet C, Nemmar A, Hoet PHM, Bois FY. (2009). Development of a physiologically based kinetic model for ^{99m}Tc -labelled carbon nanoparticles inhaled by humans. *Inhalation Toxicology*, 21:1099-1107.

ABSTRACT

Dose-effect relationships in chemical risk assessment are commonly derived through simple mathematical models linking directly effects with exposure dose. These models, usually calibrated with animal data, are specific to the tested chemical, the endpoint and the experimental protocol. Accounting for toxicokinetics permit to extrapolate results for different chemicals and different scenarios of exposure. Among toxicokinetics models, physiologically based pharmacokinetic (PBPK) models are based on a realistic description of anatomy, physiology and of the mechanisms involved in the disposition of a compound within an organism, *i.e.* absorption, distribution, metabolism, and excretion (ADME processes). We present three examples of use of toxicokinetics models in risk assessment. In the first one, we contributed to an INRS study aiming at evaluating workers cobalt exposure. The second one consists in the recent development of a generic lifetime PBPK model accounting for physiological differences between individuals. The third one exposes the calibration of a PBPK model based on imaging data to assess the kinetics of inhaled particles.

Biodistribution et élimination de nanotubes de carbone instillés dans les poumons de rats



D. Elgrabli

La structure physique des nanoparticules (NP) leur confère des propriétés physico-chimiques et biologiques différentes de celles du même composé de taille micrométrique. Par exemple, les défauts de structure semblent jouer un rôle au niveau de la toxicité et l'élimination des nanotubes de carbone [3]. Ainsi, une utilisation de NP est envisagée dans de nombreuses industries. En effet, les produits suivants sont déjà commercialisés : des textiles insalissables recouverts d'une pellicule de nanoparticules d'argent, des verres autonettoyants sur lesquels ont été déposées des couches minces d'oxyde de titane, des cabines de douche, des éviers ou des carrosseries recouvertes de nanofilms, des dentifrices au nanophosphate de calcium qui comblent les minuscules fissures des dents, des produits solaires au dioxyde de titane, de rouges à lèvres à l'oxyde de zinc pour améliorer la tenue, des vernis à ongles enrichis en oxyde de zirconium. Parmi les NP les plus utilisées, on distingue notamment les nanotubes de carbone (NTC). Malheureusement, à l'heure actuelle, la toxicité potentielle de cette NP reste encore mal connue. De par leur faible taille, les NTC peuvent être remis aisément en suspension dans l'air et la voie pulmonaire est une voie privilégiée d'exposition à ce type de composé. L'étude de la toxicité pulmonaire d'une particule implique l'analyse de sa biopersistence c'est-à-dire du

temps au cours duquel le NTC reste au niveau de chaque organe, de son élimination mais aussi de sa capacité à passer la barrière alvéolo-capillaire entre le poumon et le sang. Les NTC étant constitués d'atomes de carbone, leur dosage est particulièrement difficile dans les milieux biologiques qui sont eux-mêmes très riches en carbone. Dans ces conditions, il est fait appel à des méthodes de dosage indirect reposant sur l'analyse des catalyseurs métalliques qu'ils renferment. En effet, leur synthèse nécessite la présence de ces catalyseurs métalliques qui ne peuvent pas être totalement éliminés lors de la purification de ces NTC.

Afin d'étudier leur biopersistence et leur élimination, des NTC contenant 0,5 % de nickel ont été instillés dans des poumons de rats. Sept jours après traitement, l'analyse en microscopie électronique (MET), couplée à une sonde EDX (Émission de photons X), de coupes de poumon et de ganglions lymphatiques de rats traités a révélé une parfaite colocalisation entre les NTC et le nickel. Ainsi, les résultats obtenus montrent que le nickel reste fixé aux NTC dans l'organisme et peut donc être utilisé comme traceur du NTC lors d'études *in vivo*. La présence éventuelle de NTC dans de nombreux organes (foie, reins, rate, cœur, cerveau, poumon, testicules, ganglions lymphatiques et thymus) à divers temps suivant l'instillation a été

RÉFÉRENCES

[1] Elgrabli D., Abella-Gallart S., Robidel F., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. (2008a). Induction of apoptosis and absence of inflammation in rat lung after intratracheal instillation of multiwalled carbon nanotubes. *Toxicology* 253(1-3): 131-136.

[2] Elgrabli D., Floriani M., Abella-Gallart S., Meunier L., Gamez C., Delalain P., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. (2008b). Biodistribution and clearance of instilled carbon nanotubes in rat lung. *Part Fibre Toxicol.* 5: 20.

[3] Muller J., Huaux F., Fonseca A., Nagy J. B., Moreau N., Delos M., Raymundo-Pinero E., Beguin F., Kirsch-Volders M., Fenoglio I., Fubini B., Lison D. (2008). Structural defects play a major role in the acute lung toxicity of multiwall carbon nanotubes: toxicological aspects. *Chem Res Toxicol.* 21(9): 1698-705. Epub 2008 Jul 18.

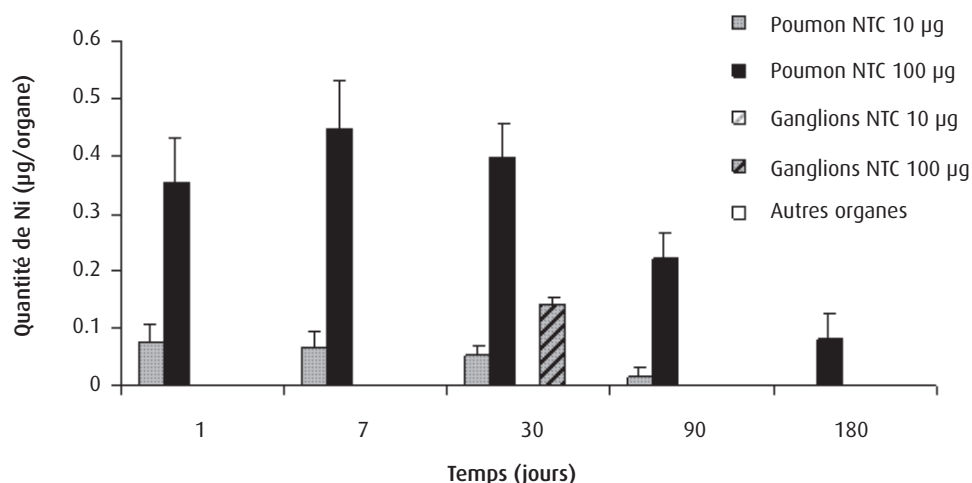


FIGURE 1

PASSAGE DES NANOTUBES DE CARBONE À TRAVERS LA BARRIÈRE PULMONAIRE ET ÉLIMINATION PULMONAIRE.

Les nanotubes de carbone ont été détectés uniquement au niveau des poumons et au niveau des ganglions lymphatiques 30 jours après le traitement montrant ainsi l'absence de passage de ces nanoparticules à travers la barrière pulmonaire. Une diminution de la quantité de ces nanotubes de carbone au niveau pulmonaire, associée à l'absence de passage dans d'autres organes, suggère l'existence d'un mécanisme d'élimination.

recherchée par dosage du nickel dans ces organes par spectroscopie optique (ICP-OES). À l'exception des poumons et des ganglions lymphatiques, la présence de NTC n'a pas été détectée dans d'autres organes après 1, 7, 30, 90 et 180 jours (figure 1), suggérant ainsi l'incapacité des NTC à traverser de façon significative la barrière alvéolo-capillaire (limite de détection évaluée à 10 ng/organe) [2]. De plus, il a été observé que la totalité du NTC instillé reste présente dans le poumon pendant au moins 1 mois après le traitement. Une diminution de 62 % et de 84 % de la quantité de NTC injectée est cependant observée à respectivement 3 mois et 6 mois. Les NTC n'ayant été retrouvés dans aucun autre organe que le poumon et les ganglions, il est fortement suggéré l'existence d'un mécanisme d'élimination pulmonaire pour le NTC étudié (figure 1).

Afin d'identifier le mécanisme d'élimination pulmonaire des NTC des doses de 1, 10 ou 100 µg de NTC ont été instillées dans les poumons de rats et différents paramètres, marqueurs de l'inflammation, du stress oxydant, de l'apoptose ou de la phagocytose, ont été analysés 1, 7, 30, 90 et 180 jours après traitement. Des coupes de poumon ont ainsi été réalisées puis observées en microscopie électronique à transmission. Suite à la quantification par PCR de l'ARNm d'actine β et de EEA-1 (Early endosome antigen 1), il est conclu que les macrophages alvéolaires

sont capables de reconnaître et de phagocyter les NTC [1]. La question suivante est donc de savoir quel est le devenir des NTC une fois phagocytés ? Pour répondre à cette question, des NTC ont été instillés dans des poumons de rats. Après 15 jours, les NTC ont été récupérés par lavage broncho-alvéolaire et lyse des cellules pulmonaires. L'analyse de la structure de NTC instillés dans les poumons des rats a alors été réalisée au MET et en spectroscopie infrarouge. Suite à ces expériences, une diminution de la taille des NTC instillés ainsi que des modifications physiques et chimiques de la structure de ces NTC par fixation de groupements alcools et nitrés ont été notées. Par ailleurs, l'augmentation de l'ARNm d'enzymes impliquées dans la dégradation de molécules étrangères à l'organisme (cytochrome P450 1A1 et 2E1) a été mesurée. Ces enzymes, et plus particulièrement le cytochrome P450 1A1, sont connus pour jouer un rôle dans la fixation de groupements hydroxylés tels que les alcools afin de favoriser la solubilisation et l'élimination d'éléments étrangers. Elles pourraient donc intervenir dans l'élimination des NTC.

Par ailleurs, et bien que la présence de cellules en apoptose [1], c'est-à-dire de cellules entrant en mort cellulaire ait également été notée, une induction de marqueurs de la phagocytose de cellules apoptotiques (Elmo 1, Elmo 2 et Dock 180) ainsi qu'une diminution de l'expression de cytokines responsables

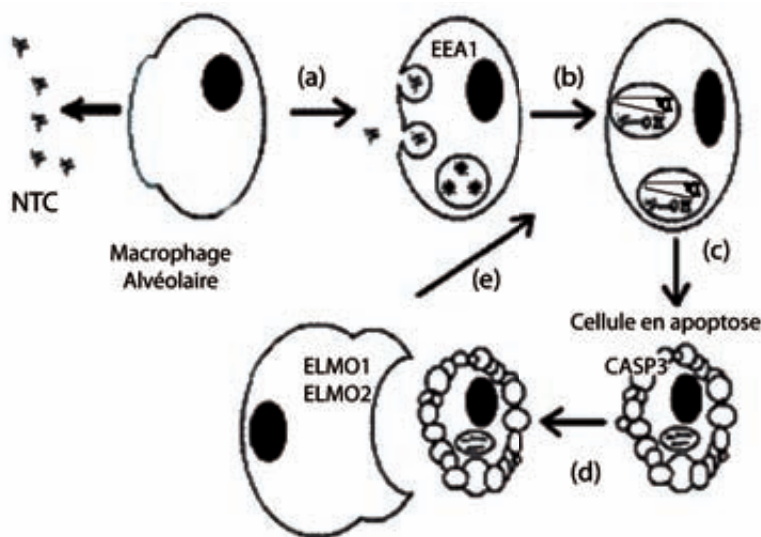


FIGURE 2
 SCHÉMA REPRÉSENTANT LE MÉCANISME D'ÉLIMINATION DES NANOTUBES DE CARBONE AU NIVEAU PULMONAIRE. Les nanotubes de carbone sont reconnus (a), phagocytés (b) et modifiés physiquement et chimiquement (c) par les macrophages alvéolaires. Ces cellules entrent ensuite en apoptose (d) et libèrent des débris cellulaires qui seront pris en charge par un nouveau pool de macrophages alvéolaires afin de poursuivre l'élimination (e).

des phénomènes inflammatoires (IL-10 et GM-CSF), caractéristiques de ce phénomène, ont été notées. L'hypothèse d'un mécanisme d'élimination selon laquelle après phagocytose les nanotubes sont modifiés physiquement et chimiquement, peut donc être posée. Les macrophages alvéolaires ayant joué leur rôle entrent alors en apoptose formant des débris cellulaires. Ces débris sont alors pris en charge par un nouveau pool de cellules afin de poursuivre l'élimination des NTC présents dans le poumon (figure 2).

L'ensemble de ces résultats a permis de mettre en évidence que les catalyseurs métalliques utilisés pour réaliser la synthèse des NTC pouvaient servir de

traceur pour la détection en milieux biologiques. Il a également été mis en évidence que les NTC étaient capables de persister dans l'organisme pendant plus de 6 mois. Les résultats obtenus ont également permis de poser une hypothèse quant au mécanisme d'élimination des NTC mis en jeu au niveau pulmonaire. Ce mécanisme permet, d'une part, d'expliquer la lente élimination ou clairance pulmonaire des NTC et, d'autre part, de tenir compte de l'ensemble des observations effectuées et plus précisément de l'absence de processus inflammatoire. Ces résultats ayant été obtenus suite à une exposition unique, la question de la réaction de l'organisme face à une exposition répétée est posée.

ABSTRACT

Background: Constituted only by carbon atoms, CNT are hydrophobic and hardly detectable in biological tissues. These properties make biokinetics and toxicology studies more complex. Methods: We propose here a method to investigate the biopersistence of CNT in organism, based on detection of nickel, a metal present as trace in the NTC we investigated. Results and conclusion: Our results in rats that received NTC by intratracheal instillation, reveal that NTC can be eliminated and do not significantly cross the pulmonary barrier but are still present in lungs 6 months after a unique instillation. NTC structure was also showed to be chemically modified and cleaved in the lung. Long-time presence of NTC in the lung is associated with lung induction of cytochrome P450 1A1 and 2E1 mRNA suggesting a possible role of these enzymes in NTC clearance. These results provide the first data of CNT biopersistence and clearance at 6 month after respiratory administration.

Outils de criblage *in vitro* et *in vivo* chez le poisson pour l'évaluation des effets endocriniens de polluants aquatiques



S. Ait-Aïssa/F. Brion

Les perturbateurs endocriniens (PE) regroupent des substances d'origines et de structures très diverses qui peuvent agir sur l'ensemble des étapes de la régulation endocrine et induire des effets néfastes sur la santé d'un organisme, ou sa descendance, secondairement à des changements de la fonction endocrine. En raison des risques qu'ils font courir en particulier sur la fonction de reproduction, le développement de stratégies de tests et d'outils de criblage est devenu un enjeu majeur pour identifier les substances actives et quantifier leurs effets. Dans ce contexte, les poissons apparaissent comme des organismes cibles particulièrement sensibles pour lesquels

des études démontrent des liens forts entre l'exposition environnementale à des composés PE et des effets néfastes sur les individus et les populations sauvages.

Pour étudier les effets endocrines des substances chimiques chez le poisson, l'INERIS s'appuie sur une démarche intégrant différents niveaux de complexité biologique : moléculaire (expression de gènes), cellulaire, tissulaire et de l'organisme (impacts physiologiques). La mise en œuvre de cette approche passe par le développement et la validation d'outils de caractérisation du danger des substances chimiques. Face à la diversité des molécules et des mécanismes d'action impliqués, l'utilisation de tests de criblage sensibles et spécifiques (incluant des essais *in vitro* et *in vivo* à court terme) est indispensable pour l'évaluation des substances chimiques vis-à-vis de leurs effets sur la fonction endocrine.

Dans ce contexte, le développement et la validation de tests de criblage adaptés à des espèces non mammifères constitue un enjeu important dans l'évaluation du danger des PE pour les espèces aquatiques. En effet, des différences interspèces peuvent significativement influencer sur la réponse du test. Par exemple pour les récepteurs aux œstrogènes, il existe des différences d'affinité et, dans une moindre mesure, de spécificité vis-à-vis de certaines substances, entre le récepteur humain (hER α) et celui de la truite arc-en-ciel

(rtER α). Il peut également exister des différences de réponse en fonction du contexte cellulaire étudié (type cellulaire, tissu ou espèce d'origine, etc.). Plusieurs études récentes décrivent le développement de modèles cellulaires de poisson et leurs applications en écotoxicologie pour l'évaluation de polluants émergents [4], [5], toutefois la validation de ces modèles pour l'étude des PE et leur comparaison aux modèles mammifères existants reste encore insuffisamment documentée.

DES MODÈLES CELLULAIRES

Un des objectifs de nos travaux est de développer des modèles cellulaires basés sur l'utilisation de cellules de poisson pour étudier les spécificités de réponse de récepteurs hormonaux (*e.g.* récepteur des œstrogènes) ou de xénobiotiques (*e.g.* récepteur de la dioxine, récepteur PXR) à des polluants aquatiques, en comparaison aux modèles cellulaires mammifères plus largement décrits. Nous avons ainsi mis au point une lignée cellulaire exprimant de manière stable le récepteur ER de truite arc-en-ciel (rtER) couplé au gène rapporteur de la luciférase dans les cellules hépatiques PLHC-1, dérivées du vairon (*Poeciliopsis lucida*) (Cosnefroy *et al.*, 2009). Cette nouvelle lignée, nommée PELN-rtER (PLHC-1 ERE-Luciférase-Neomycine), a été caractérisée vis-à-vis d'un panel de xéno-œstrogènes et comparée à d'autres modèles *in vitro* d'œstrogénicité (tableau 1, [2]).

	PELN-rtER (lignée cellulaire de poisson PLHC1)	MELN (lignée cellulaire humaine MCF7)	PRTH (hépatocytes de truite en primoculture)
Substances chimiques	REP	REP	REP
17β-Œstradiol	1 (EC ₅₀ = 5 nM)	1 (EC ₅₀ = 0,018 nM)	1 (EC ₅₀ = 22 nM)
Œstrone	0,04	0,03	-
Œstriol	0,03	0,18	-
Éthynil-œstradiol	1,54	2,56	1,94
Hexestrol	0,50	-	0,11
DES	0,24	0,10	0,18
α-Zéaralanol	0,22	0,13	0,56
α-Zéaralénol	0,12	-	-
β-Zéaralénol	0,011	-	-
Génisteine	0,010	6,7E-04	0,013
Bisphénol A	0,016	1,9E-04	-
4-Octylphénol	2,9E-03	3,3E-04	6,3E-04
4-Nonylphénol	2,4E-04	5,3E-05	-
Benzophénone 1	1,6E-03	1,9E-06	2,3E-04
Benzophénone 2	0,014	5,5E-06	7,6E-04
Benzophénone 3	sans effet	8,8E-07	sans effet
Trihydroxybenzophénone	0,009	4,5E-06	3,8E-04

TABLEAU 1

COMPARAISON DE L'ACTIVITÉ ŒSTROGÉNIQUE DE SUBSTANCES CHIMIQUES DANS DIFFÉRENTS TESTS CELLULAIRES.

Développés à partir de cellules de poisson (PELN-rtER, PRTH) et humaines (MELN).

Le potentiel œstrogénique (REP) d'une substance, déterminé relativement à l'action de l'œstradiol, hormone de référence, varie selon le test cellulaire et s'avère globalement plus fort en cellules de poisson qu'en cellules humaines.

REP = potentiel œstrogénique relatif à l'œstradiol.

- : non testé

En dépit d'une sensibilité moindre aux œstrogènes des modèles cellulaires dérivés du poisson par rapport aux modèles cellulaires d'origine humaine (MELN), l'utilisation de modèles dérivés du poisson s'avère très pertinente pour identifier les molécules environnementales qui présentent un potentiel œstrogénique relatif plus important chez le poisson (affinité relative des molécules à l'œstradiol). C'est le cas notamment de métabolites de la zéaralénone et de dérivés de la benzophénone. Les benzophénones sont des molécules largement utilisées en tant que filtre chimique anti-UV dans différents produits industriels et cosmétiques et sont de plus en plus fréquemment décrites en tant que contaminants des milieux aquatiques. Ainsi, dans nos études, ces molécules se sont-elles montrées plus affines, relativement à l'œstradiol, pour le récepteur des œstrogènes de truite que pour le récepteur humain (Molina-Molina *et al.*, 2008, Cosnefroy *et al.* 2009, Pillon *et al.* 2005). Ces résultats soulignent des différences entre les modèles *in vitro* humains et ichthyens qui seraient liées à des contextes cellulaires différents (*e.g.* hépatique *versus* mammaire) et/ou à des récepteurs de sensibilité différente.

LE PROJET NEMO

Les travaux en cours du projet NEMO, programme de recherche dédié au développement de nouvelles méthodes pour l'étude des effets des PE chez le poisson mené en partenariat avec différents organismes de recherche. INSERM, INRA, CNRS visent en particulier au développement de tests biologiques *in vitro* et *in vivo* de *screening* des substances chimiques chez une espèce modèle, le poisson zèbre.

La conduite d'expérimentations *in vivo* chez cette espèce présente de nombreux avantages : espèce de petite taille à cycle de vie court, développement embryonnaire rapide et transparence du chorion, génome bien caractérisé, maîtrise du cycle de vie permettant d'étudier différents stades de développement, espèce recommandée par l'OCDE pour l'évaluation des substances chimiques. Dans le cadre d'une thèse menée à l'INERIS, des lignées cellulaires de poisson zèbre exprimant les différents isoformes des récepteurs des œstrogènes identifiés chez ce poisson (isoformes α, β1, β2) ont été développées et sont utilisées pour caractériser les effets *in vitro* de diverses substances chimiques chez ce poisson

RÉFÉRENCES

- [1] Brion F., Tyler CR., Palazzi X., Laillet B., Porcher J. M., Garric J. and Flammarion P. Impacts of 17 beta-estradiol, including environmentally relevant concentrations, on reproduction after exposure during embryo-larval, juvenile- and adult-life stages in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquatic Toxicology* 68(3): 193-217, 2004.
- [2] Cosnefroy A., Brion F., Guillet B., Laville N., Porcher J. M., Balaguer P. and Ait-Aïssa S. A stable fish reporter cell line to study estrogen receptor transactivation by environmental (xeno)estrogens. *Toxicology in vitro*, 23:1450-4, 2009.
- [3] Hinfray N., Palluel O., Turies C., Cousin C., Porcher J. M. and Brion F. Brain and gonadal aromatase as potential targets of endocrine disrupting chemicals in a model species, the zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Toxicology* 21(4): 332-7, 2006.
- [4] Laville N., Ait-Aïssa S., Gomez E., Casellas C. and Porcher J. M. Effects of human pharmaceuticals on cytotoxicity, EROD activity and ROS production in fish hepatocytes. *Toxicology* 196(1-2): 41-55, 2004.
- [5] Laville N., Ait-Aïssa S., Casellas C. et Porcher J. M. Application de modèles cellulaires pour l'étude des effets potentiels des médicaments chez les poissons. *Environnement, Risques et Santé* 5(4): 284-289, 2006.
- [6] Molina-Molina J. M., Escande A., Pillon A., Gomez E., Pakdel F., Cavailles V., Olea N., Ait-Aïssa S. and Balaguer P. Profiling of benzophenone derivatives using fish and human estrogen receptor-specific *in vitro* bioassays. *Toxicology and Applied Pharmacology* 22(1): 384-395, 2008.
- [7] Tong SK., Mouriec K., Kuo MW., Pellegrini E., Gueguen MM., Brion F., Kah O., Chung BC. A cyp19a1b-GFP (Aromatase B) Transgenic Zebrafish Line That Expresses GFP in Radial Glial Cells. *Genesis* 47 : 67-73, 2009.

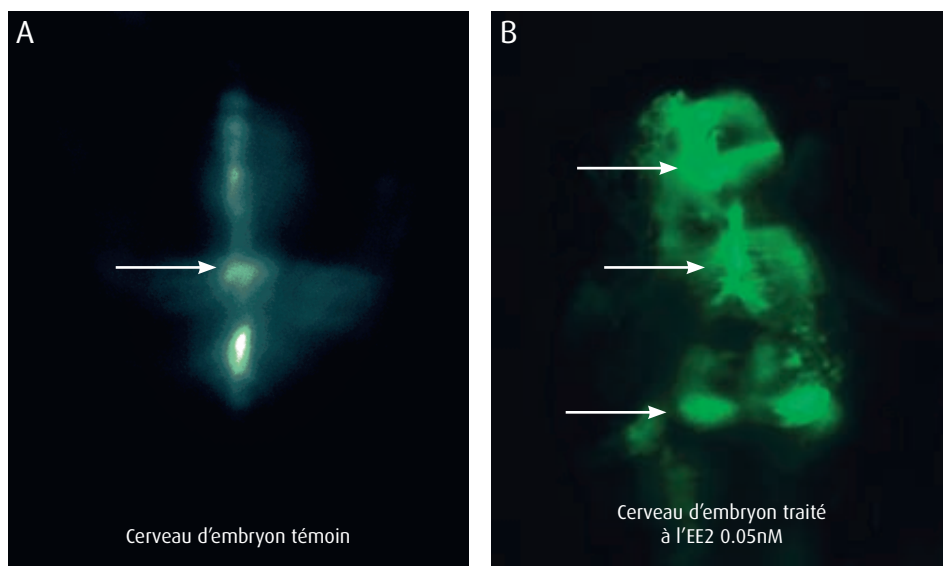


FIGURE 1

EFFET DE L'ÉTHINYL-CÉSTRADIOL (EE2) *IN VIVO* SUR LA LIGNÉE DE POISSON ZÈBRE aroB-GFP.

Expression *in vivo* de la GFP (Green Fluorescent Protein) chez des embryons de poisson zèbre transgénique *cyp19a1b-GFP* âgés de 5 jours post-fécondation. Chez le poisson témoin (A), la GFP est faiblement exprimée alors que chez l'embryon exposé (B) à l'éthinylœstradiol, la GFP est fortement induite. Cette induction de l'expression de la GFP témoigne de la capacité de la molécule à induire un effet œstrogénique *in vivo* dans le cerveau du poisson au cours de son développement embryonnaire. L'effet mesuré s'observe à des concentrations faibles d'éthinylœstradiol ce qui témoigne de la sensibilité du modèle biologique pour détecter les substances chimiques œstrogéno-mimétiques. L'analyse de la GFP se fait à l'aide d'un microscope à fluorescence sur embryon vivant (méthode non invasive et non létale).

(thèse Anne Cosnefroy). Afin d'aller plus loin dans la caractérisation des dangers des substances, il est indispensable de replacer les mécanismes et les effets observés *in vitro* dans le contexte de l'organisme *in vivo*.

Nos recherches menées ces dernières années ont vu la mise en place de nombreux outils moléculaires et biochimiques qui permettent d'étudier l'expression *in vivo* de gènes cibles hormono-régulés dans le cerveau (aromatase cérébrale), le foie (vitellogénine) et les gonades (enzymes de la stéroïdogenèse) de poisson zèbre, contribuant à une meilleure caractérisation du potentiel perturbateur endocrinien des substances chimiques et de leurs modes d'action [1], [3]. Plus récemment, un modèle de poisson zèbre transgénique exprimant la GFP (Green Fluorescent Protein) sous le contrôle du promoteur du gène *cyp19a1b* de poisson zèbre a été développé par l'équipe du Professeur Chung de l'université de Taiwan [7] et implanté en laboratoire à l'INERIS, en vue de sa validation. Le gène *cyp19a1b* code pour l'aromatase cérébrale, une enzyme clé de la stéroïdogenèse responsable de la synthèse des œstrogènes. Conformément au mécanisme d'action de l'œstradiol sur l'expression de l'aromatase B, les xéno-œstrogènes induisent de manière dose-dépendante l'expression de la GFP après une exposition de court terme chez des embryons (figure 2).

De manière très significative, les concentrations requises en éthinylœstradiol pour induire la GFP sont très faibles (de l'ordre du ng/L) et pertinentes du point de vue de la contamination environnementale. Ceci démontre la très grande sensibilité du modèle *cyp19a1b-GFP* vis-à-vis des œstrogènes et en fait un test *in vivo* de *screening* des xéno-œstrogènes très prometteur. Les outils mis en place permettent une évaluation des effets PE

des substances chimiques à différents niveaux d'organisation biologique chez le poisson. Leur application au criblage de diverses familles de substances chimiques est en cours et fournira des informations importantes, d'une part, sur le potentiel PE des substances, et d'autre part, sur la complémentarité des tests et par conséquent sur les stratégies de tests à mettre en œuvre pour évaluer le danger PE de polluants aquatiques.

ABSTRACT

Current concern on the effects of endocrine disrupting chemicals (EDCs) to fish and human health has stimulated the development and implementation of screening and testing procedures, notably within the perspective of the new EU regulatory framework for chemicals (REACH). Given the complexity of modes of action and the effects of EDCs, various biological targets are to be evaluated at molecular, cellular, organism and population levels. Here, we set up a panel of new *in vitro* and *in vivo* mechanism-based tools to study chemical interaction with estrogen-regulated pathways in fish. By using stable reporter cell lines derived from fish and human cell lines, it is shown that estrogenic responses vary between models, likely due to cell context and/or cross-species differences. In addition, such *in vitro* screening of various environmental molecules allowed identifying those that exert higher estrogenic potency in fish cellular context, such as UV screens. To further assess such specific effects *in vivo*, we report the use of hormone-regulated gene expression and a transgenic line expressing green fluorescent protein under the control of brain aromatase promoter (*cyp19a1b*) that were developed in a model fish species, the zebrafish. The developed assays offer rapid, specific and sensitive *in vitro* and *in vivo* screening tools that could serve in EDCs testing strategies for aquatic vertebrates.

Utilisation d'une approche multicritère pour la sélection d'essais d'écotoxicité



P. Pandard

L'utilisation d'essais sur organismes biologiques est désormais reconnue comme l'un des éléments pertinents permettant de caractériser de façon satisfaisante la qualité des milieux. En effet, ces outils prennent en compte, à la fois la biodisponibilité – disponibilité pour les organismes vivants – des différentes substances chimiques présentes, mais également les effets de synergie ou d'antagonisme qui peuvent se produire entre ces dernières. Ces essais biologiques, initialement utilisés pour le contrôle des substances chimi-

ques et des rejets en milieu aquatique, sont aujourd'hui appliqués à d'autres domaines tels que la caractérisation des sites et des sols pollués, la valorisation des boues en agriculture, la gestion des sédiments ainsi que la classification des déchets.

Il est couramment reconnu qu'un seul bioessai ne peut être sensible à l'ensemble des contaminants présents dans un échantillon environnemental. Chaque organisme-test présente, en effet, une spécificité propre de réponse en fonction des classes de contaminants. Il apparaît donc que seule une association de plusieurs essais biologiques (ou batterie d'essais), regroupant différents niveaux trophiques et critères d'effets, permet d'optimiser la caractérisation du danger potentiel de l'échantillon considéré.

Les travaux entrepris en collaboration avec le CTIS, l'IPL, l'Université de Metz et l'ADEME dans ce domaine ont mis en évidence que deux stratégies étaient applicables pour sélectionner les essais biologiques constitutifs d'une batterie :

- une méthode *a priori* qui permet d'établir un choix de tests en se basant sur des critères prédéfinis,
 - une méthode *a posteriori* qui, en fonction des résultats obtenus sur une large série d'échantillons, permet d'identifier certaines espèces incontournables du fait en particulier de leur sensibilité.
- L'analyse bibliographique exhaustive réalisée a montré que, pour la sélection des différentes batteries de tests biologiques de toxicité et/ou de géotoxicité,

l'application de ces stratégies restait à ce jour peu répandue. Les travaux réalisés précédemment se sont focalisés sur l'approche *a posteriori* dans un objectif de sélection de batteries optimales d'essais en appliquant différentes méthodes statistiques : analyse en composante principale, analyse factorielle des correspondances, classification ascendante hiérarchique et cartographie non linéaire ([1] ; [2] ; [4]).

La présente étude décrit un exemple de démarche de sélection de tests *a priori*, utilisant une approche multicritère, la méthode SIRIS (Système d'Intégration du Risque par Interaction de Scores) qui est une méthode d'aide à la décision initialement utilisée pour classer des substances chimiques en fonction de leur risque de contamination des eaux de surface ou souterraines ou de l'atmosphère. Elle est ici appliquée à la sélection de bioessais pour évaluer l'écotoxicité des sols [3].

Pour ce type d'approche, la sélection est fondée sur divers critères descriptifs comme la normalisation de la méthode, la pertinence écologique des organismes d'essai ou encore le coût.

Dans la méthode SIRIS, les critères sont hiérarchisés selon la problématique étudiée et selon l'importance que l'expert leur accorde pour cette problématique. Ces critères qualitatifs ou quantitatifs peuvent prendre plusieurs valeurs, exprimées en trois catégories : favorable (f), moyennement favorable (m) ou défavorable (d). Une échelle minimum/

RÉFÉRENCES

[1] Charissou A. M., Jourdain M. J., Féraud J. F., Masfarau, J. F., Cotelte S., Devillers J., Pandard P., Poulsen V. Développement d'une méthode de sélection des tests biologiques de toxicité et de géotoxicité adaptée à différents scénarii, Rapport final contrat ADEME 03 75C 0003, 2005.

[2] Charissou A. M., Jourdain M. J., Féraud J. F., Pandard P., Devillers J. Développement d'une méthode de sélection des tests biologiques de toxicité et de géotoxicité adaptée à différents scénarii – Phase II, Rapport final convention ADEME 04 75 C0081, 2007.

[3] Devillers J., Pandard P., Charissou A. M., Bispo A. Use of multicriteria analysis for selecting ecotoxicity tests. In, *Ecotoxicology Modeling* (J. Devillers, Ed.), Springer, N.Y., pp. 117-143, 2009.

[4] Pandard P., Devillers J., Charissou A. M., Poulsen V., Jourdain M. J., Féraud J. F., Grand C. et Bispo A. Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes. *Sci. Tot. Environ.*, 363 (1-3), 114-125, 2006.

[5] Vaillant M., Jouany J. M., Devillers J., A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. *Toxicology Modeling*, 1, 57-72, 1995.

Nature des critères	Modalité favorable	Modalité moyennement favorable	Modalité défavorable	Hiérarchisation
Critères technico-économiques				
Obtention des organismes	Temps négligeable	< ½ journée/semaine	> ½ journée/semaine	1
Volume ou quantité nécessaire	< 10 mL ou 10 g	10 – 100 mL ou g	≥ 100 mL ou g	3
Rapidité du test	≤ 4 jours	5 – 20 jours	≥ 21 jours	2
Type de local	commun	spécialisé	très spécialisé	9
Type de matériel	commun	spécialisé	très spécialisé	10
Coût du personnel	< 1 jour	1 – 4 jours	> 4 jours	7
Niveau de compétence	technicien	-	supérieur	8
Domaine d'application	applicable à plusieurs matrices	-	applicable à une seule matrice	6
Temps nécessaire au démarrage de l'essai	immédiat	1 – 3 jours	> 3 jours	4
Perception par un public non spécialisé	aisée (e.g. mortalité, croissance)	délicate (luminescence)	difficile (adduits à l'ADN)	5
Critères scientifiques				
Pertinence écologique	élevée	moyenne	faible (e.g. Microtox)	2
Durée d'exposition	> 70 % du cycle de vie de l'organisme	10 – 70 % du cycle de vie	< 10 % du cycle de vie	1
Degré de normalisation	Norme existante	Projet de norme	absence de norme	3
Transposition au terrain	effets toxicologiques observables sur le terrain	effets toxicologiques aux conséquences observables sur le terrain	Effets toxicologiques non pertinents sur le terrain	4
Mécanisme d'action	sur une fonction (e.g. réaction enzymatique)	sur un organe (e.g. racines)	Sur l'organisme entier (e.g. mortalité)	7
Stabilité génétique	reproduction asexuée	-	reproduction sexuée	5
Contraintes et limitations	faibles	modérées	importantes	6

FIGURE 1

DESCRIPTION DES CRITÈRES TECHNICO-ÉCONOMIQUES ET SCIENTIFIQUES RETENUS ET HIÉRARCHISATIONS ADOPTÉES

NOTES

(1) Produits de la réaction entre un produit chimique et l'ADN

maximum de scores est ensuite établie selon des règles d'incrémentations bien définies [5].

Dans le cadre de cette étude, une analyse bibliographique a permis d'identifier 115 tests d'écotoxicité ayant été utilisés pour caractériser des sédiments, des boues, des sols pollués, des effluents, des eaux usées ou des percolats ou lixiviats de sol. Ces tests d'écotoxicité aquatique ou terrestre incluent différents critères d'effet (mortalité, inhibition de croissance ou de reproduction, génotoxicité, activités fonctionnelles...). Ils correspondent à des approches directes (tests réalisés sur les sols) ou indirectes (tests aquatiques réalisés sur percolat ou lixiviat).

Ces 115 tests ont été décrits en fonction de 10 critères technico-économiques (facilité d'obtention des organismes, volume d'échantillon nécessaire, rapidité du test ou coût, par exemple) et de 7 critères scientifiques (pertinence écologique, durée d'exposition, mécanisme d'action, par exemple) (figure 1). Une approche considérant les deux catégories de critères selon deux échelles différentes de scores SIRIS – une échelle technique et une échelle scientifique – a été suivie (figure 2).

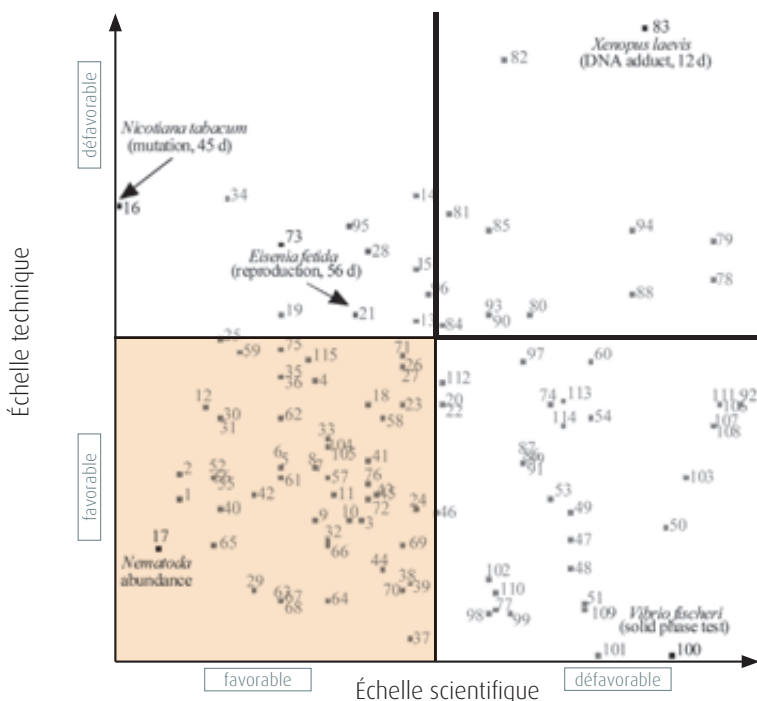
Cette analyse permet de confirmer

que les tests les plus couramment utilisés – inhibition de la croissance des végétaux (figure 2, n° 5) ou inhibition de la mobilité des daphnies (n° 72) ou de croissance des algues unicellulaires (n° 52) par exemple – sont ceux répondant le mieux aux critères technico-économiques et scientifiques et donc conduisant à la meilleure caractérisation de la contamination des sols. Cette analyse met également en évidence la pertinence des tests d'activité fonctionnelle – inhibition de la respiration des sols ou de la nitrification des sols par exemple. À l'inverse, les tests de génotoxicité sur organismes aquatiques qui sont les plus lourds à mettre en œuvre (Essai micro-noyau sur *Xenopus laevis* n° 82), adduits à l'ADN⁽¹⁾ sur *Xenopus laevis* (n° 83) sont classés comme les plus défavorables sur la base des critères technico-économiques et des critères scientifiques.

L'essai d'inhibition de la luminescence de *Vibrio fischeri* identifié comme le test le plus communément utilisé lors des travaux précédents [1] du fait de son pouvoir discriminant mais également de sa sensibilité sur différents types d'échantillons, apparaît logiquement bien classé en se référant aux critères technico-éco-

FIGURE 2

CLASSEMENT SIRIS DES 115 TESTS. Les tests situés en bas et à gauche de la carte SIRIS sont les plus intéressants d'un point de vue scientifique et technique. Ceux localisés en bas et à droite ne sont pertinents que d'un point de vue technique. Les tests en haut à gauche de la carte sont scientifiquement intéressants mais pénalisés par leurs critères techniques. Enfin, les tests situés en haut et à droite sont les moins intéressants. Les numéros des tests ne renvoient pas au rang de classement.

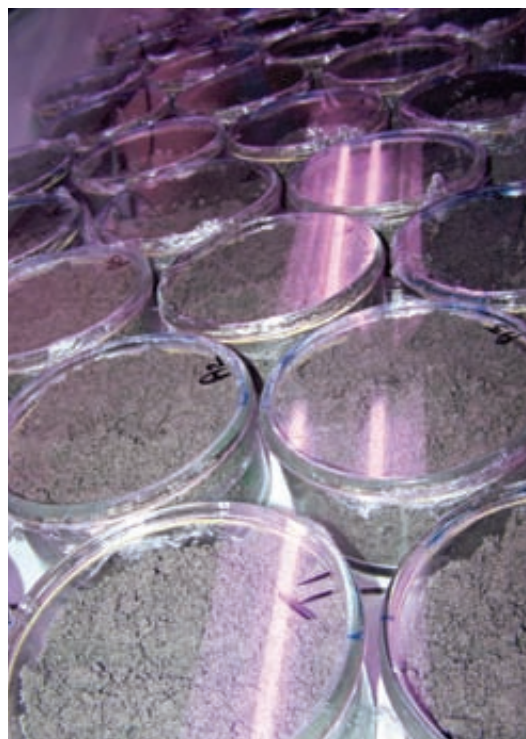


nomiques mais moyennement classé du point de vue des critères scientifiques pour le scénario sélectionné. Par ailleurs, certains essais discriminants comme le test *Ceriodaphnia dubia* (n° 75) ne sont pas mis en avant pour le scénario sélectionné du fait de la notation pénalisante de certains critères technico-économiques. Ceci est en contraste avec la réalité puisque ce test est couramment recommandé dans les évaluations du danger de matrices polluées. La typologie obtenue en considérant la double échelle de scores SIRIS suscite quelques interrogations. Ainsi, le test de « mortalité vers de terre 14 jours » possède les mêmes scores SIRIS que l'essai « d'évitement vers de terre d'une durée de 48 heures » (n° 20 et 22). Ce dernier test, même si le recul sur cette réponse biologique est encore limité, apparaît plus sensible que l'essai de toxicité aiguë. De façon plus générale, l'analyse montre que les tests chroniques les plus couramment utilisés pour une approche directe (tests directs sur la matrice sols) et dans une moindre mesure pour une approche indirecte (tests

aquatiques sur percolats ou lixiviats de sol) sont principalement dépendants du poids donné aux paramètres durée d'exposition/temps nécessaire à la réalisation des essais. De plus, cette étude indique que la méthode de sélection *a priori* ne permet pas de juger, à l'heure actuelle, de la complémentarité des tests au sein d'une batterie en terme de niveaux trophiques, critères d'effets étudiés (aigus, chroniques, génotoxiques...) ou type d'approche (directe ou indirecte). Ces premiers travaux apparaissent prometteurs. La démarche proposée est originale et, même si elle apparaît perfectible, elle montre tout son intérêt. Elle permet d'identifier les tests pertinents au regard du scénario considéré et donc susceptibles d'être incorporés dans des batteries d'essais. Toutefois, dans le cadre de l'élaboration d'une batterie optimale, des paramètres complémentaires vont devoir être pris en compte tels que l'adéquation entre le nombre d'essais à mettre en œuvre et l'épuisement de la réponse obtenue.

ABSTRACT

Sensitivity of animal and plant communities to toxicants may vary significantly from one species to another. If testing is performed on one species, the high diversity in the sensitivity between species might result in a high level of uncertainty. It is therefore admitted that only a combination of several bioassays can give a clear view of the toxic effects of chemicals and/or environmental samples. The best approach is therefore to use a battery of tests with several species belonging to different taxonomic groups and trophic levels. Usually, two methods can be used for selecting bioassays in order to establish a test battery: i) an "*a priori*" method, in which the selection is made according to decision criteria such as standardization of the method, ecological relevance of test organisms, or cost, ii) an "*a posteriori*" method, in which the selection is made after performing multivariate analyses of test results obtained on a large series of bioassays. In the present study on soil quality, a methodological framework, based on the use of the multicriteria method SIRIS (System of Integration of Risk with Interaction of Scores) was applied to perform an "*a priori*" selection of bioassays among 115 relevant ecotoxicity tests, selected from an extensive literature review.



Tests sur vers de terre

Les mésocosmes de l'INERIS sont des bassins recréant les conditions d'écosystèmes aquatiques



Les travaux de recherche menés à l'INERIS dans le domaine de l'écotoxicologie ont conduit au développement et à la validation d'un ensemble de biomarqueurs – marqueurs biologiques manifestant la présence de polluants – chez différentes espèces de poissons autochtones des milieux aquatiques européens.

Ces biomarqueurs – des protéines ou des enzymes – permettent d'évaluer les effets d'une exposition à des polluants sur différentes fonctions physiologiques comme la reproduction, la métabolisation des contaminants organiques ou la transmission de l'influx nerveux, en intégrant des paramètres tels que la toxicité des polluants, leur biodisponibilité – la part qui est retenue dans l'organisme – ou encore la sensibilité des organismes. En collaboration avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques et les Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur, une étude a été mise en œuvre afin d'évaluer le potentiel des biomarqueurs dans le cadre d'une application au sein du réseau de contrôle de surveillance défini par la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/EC). Les premiers résultats de ce travail mettent en avant la faisabilité d'une approche multi-biomarqueurs dans le cadre d'un réseau de surveillance réglementaire, et également l'intérêt d'une telle approche du fait de la complémentarité des informations fournies par rapport aux approches chimiques et écologiques conventionnelles.

Les biomarqueurs développés à l'INERIS (les enzymes EROD et GFT, la protéine vitellogénine) ont également été mis en œuvre dans le cadre d'études visant à identifier les causes d'un contentieux environnemental (déclin piscicole, pathologies ou malformations de poissons). Les résultats de ces travaux mettent alors clairement en évidence l'intérêt d'utiliser des outils écotoxicologiques tels que les biomarqueurs dans ce contexte d'enquête. Les travaux autour de leur utilisation se poursuivent actuellement par le développement de nouveaux indicateurs liés à l'immunité des poissons (collaboration avec l'Université de Reims) et à l'intégrité de l'ADN (collaboration avec l'École Nationale des Travaux Publics de l'État) qui sont des fonctions biologiques centrales chez les organismes, et dont les perturbations pourraient induire des dommages au niveau individuel et populationnel. Les données générées par cette activité de recherche sont également utilisées dans le cadre du réseau NORMAN afin de promouvoir l'utilisation des biomarqueurs dans le contexte réglementaire de la Directive Cadre sur l'Eau.

W. Sanchez



Pêche électrique

Besoins de recherche en écotoxicologie dans le cadre de REACH

Le règlement REACH implique un profond changement de culture vis-à-vis de la mise sur le marché des produits chimiques qui doit être faite par les industriels « de façon responsable et avec la prudence nécessaire pour éviter les effets néfastes sur la santé et l'environnement » [1]. Cette mise en place d'ici 2018 ne pourra se faire sans un accompagnement fort du monde de la recherche. En effet, la nécessité impose de parvenir à évaluer l'impact des substances de manière plus complète et plus rapide, tout en limitant au strict minimum l'expérimentation sur les animaux. Cette évaluation concerne l'homme, mais aussi la biosphère et les écosystèmes, et donc le domaine de l'écotoxicologie.

Les nouvelles approches en biologie et en traitement de l'information permettent de générer des informations susceptibles de relever ce défi. Cependant leur utilisation en support à l'évaluation du risque des substances nécessite d'approfondir les connaissances sur les liens entre les variables précoces mesurées et les conséquences physiologiques en termes d'impacts

sur la survie, le développement et la reproduction des individus, et sur les populations.

Par ailleurs, les tests traditionnellement utilisés en écotoxicologie et basés sur des effets toxiques aigus, doivent évoluer de façon à être prédictifs de nouveaux modes d'action (comme la perturbation endocrinienne) et d'effets chroniques à long terme. Dans ce contexte, l'utilisation de tests sur embryon de poisson semble particulièrement prometteuse en alliant la pertinence d'un modèle *in vivo* (intégration, capacité métabolique, etc.) à l'échelle d'un test *in vitro* (faibles volumes, haut débit, etc.). Parallèlement, l'utilisation de tests *in vitro* sur cellules (en particulier ichthyennes) permet de préciser les modes d'actions des substances. La combinaison des données obtenues *in vitro*, avec les résultats des tests *in vivo* constituent la base scientifique de la mise en place d'éventuels tests alternatifs à l'expérimentation animale.

J-M Porcher

RÉFÉRENCES

[1] Règlement (CE) n°1907/2006 par le Journal Officiel de l'Union européenne - 30/12/2006.



Élevage de poissons utilisés pour les études en écotoxicologie à l'INERIS

Gestion intégrée des risques industriels

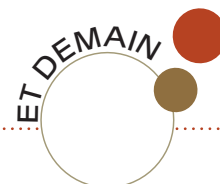


Les accidents industriels sont toujours le résultat de processus complexes. Ils mettent en jeu des causes multiples de nature technique mais aussi humaine et organisationnelle. Leurs conséquences aussi peuvent être variées : dommages humains, matériels, financiers, dégradation de l'image de l'entreprise. La prévention des accidents impose donc de considérer les systèmes industriels sous plusieurs angles en tenant compte de leur complexité. C'est l'enjeu de la gestion intégrée des risques. Celle-ci vise en particulier à fournir aux décideurs les éléments d'information pertinents pour évaluer le risque technologique, détecter les évolutions, anticiper les conséquences et décider. Sur cette base, ils mettent en œuvre des mesures techniques et humaines de maîtrise des risques, dont ils doivent pouvoir démontrer qu'elles sont efficaces et suffisantes, et dont ils doivent assurer le maintien dans le temps en s'appuyant sur une organisation performante. La recherche en cours à l'INERIS porte donc en la matière sur deux axes majeurs : offrir la meilleure information aux décideurs pour un pilotage de systèmes à risque et comprendre et améliorer les performances des organisations en matière de sécurité. Or, la gestion intégrée des risques s'inscrit dans un cadre réglementaire qui conditionne fortement les processus de décisions. Ce cadre a largement évolué au cours des dernières années en France, mais aussi dans plusieurs pays européens. Comprendre ce qui a motivé les évolutions réglementaires et comparer les approches adoptées dans différents pays est essentiel pour adapter au mieux les méthodes et les outils aux besoins. Le premier article de Guillaume Chantelauve et Clément Lenoble aborde l'adoption d'une réglementation probabiliste en France et les conséquences de cette réglementation. Il identifie

aussi les difficultés qui subsistent pour sa mise en œuvre et comment elle se situe par rapport aux approches adoptées dans d'autres pays (Royaume-Uni, Pays-Bas).

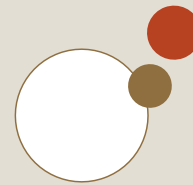
Pour garantir dans le temps l'efficacité des mesures de maîtrise des risques mises en place en réponse aux objectifs fixés par la réglementation, l'industriel doit évaluer les performances de ses actions en particulier les tests de maintenance en les optimisant. C'est l'objet de l'article de Florent Brissaud et Dominique Charpentier relatif aux stratégies de test partiel des systèmes de sécurité. Ils répondent à une question en apparence simple, mais aux enjeux économiques et de sécurité considérables : quand tester les dispositifs de sécurité pour en assurer une disponibilité maximale ? L'organisation qui mettra en œuvre les mesures de maîtrise des risques et leurs stratégies de maintenance est-elle adaptée et robuste, ou bien est-elle elle-même source de défaillance ? La méthode ATHOS présentée dans l'article de Jean-Christophe Le Coze répond à cette question. Il s'agit d'une démarche intégrée qui permet de croiser plusieurs regards sur l'organisation à diverses phases de la vie d'une installation. Elle aboutit à un diagnostic des forces et faiblesses de l'organisation face aux enjeux de la maîtrise des risques.

Ces travaux illustrent ainsi les apports de l'INERIS dans le domaine de la gestion intégrée des risques technologiques. Ils visent à développer une vision coordonnée des différentes dimensions de la sécurité industrielle et à apporter des solutions à l'ensemble des acteurs pour améliorer le pilotage des systèmes à risques technologiques dans un contexte d'évolution toujours plus rapide des technologies et du monde industriel.



- Évaluer la performance des organisations complexes que sont les industries, suivant une approche pluridisciplinaire, en fonctionnement normal (hors situations accidentelles), et rechercher des solutions visant l'amélioration de la fiabilité humaine et organisationnelle.
- Étudier la construction d'indicateurs prédictifs de niveaux de risque, ce qu'ils peuvent apporter et quelles sont leurs limites, pour améliorer les représentations sur lesquelles se basent les décideurs pour prendre des décisions en matière de gestion de risques (notamment dans le projet INTEGRISK).
- Identifier les différents types d'incertitude associés au processus d'évaluation et de gestion des risques : utilisation de différents modèles, choix des hypothèses de départ, incertitudes sur les données d'entrée ou de sortie - pour élaborer des propositions, des recommandations et des orientations sur la manière de les gérer.

Évaluation probabiliste des risques industriels : approche comparative des pratiques françaises et néerlandaises



En France, le volet « technologique » de la loi « Risques » du 30 juillet 2003, adoptée à la suite de l'accident d'AZF, introduit les analyses probabilistes dans le domaine de la prévention des risques industriels (établissements SEVESO). Cette nouveauté intervient après une longue période pendant laquelle la prévention des risques industriels se fondait sur des raisonnements de type déterministe. L'approche déterministe avait pour principe de fonder les actions de prévention sur l'analyse de scénarios d'accidents potentiels les plus graves parmi ceux présentant une régularité statistique suffisamment importante pour être considérés comme réalistes. *A contrario*, l'approche « probabiliste » suit une autre logique : elle opère non pas en référence au pire des accidents statistiquement réalistes, mais sur la base d'un échantillon beaucoup plus large de potentialités accidentelles (*a priori* toutes celles que l'étude de dangers est en mesure d'identifier), en tenant compte à la fois de leur gravité et de leur probabilité d'occurrence. L'apport de cette approche est notamment de permettre une hiérarchisation des priorités en termes d'amélioration de la sécurité sur les sites industriels. L'application de ce principe dans la réglementation française s'est concrétisée par l'adoption de deux outils décisionnels publics. Le premier outil intervenant dans le processus d'autorisation d'exploitation permet d'évaluer la nécessité de mettre en place de nouvelles mesures de sécurité sur le site industriel, sur la base de la probabilité et de la gravité des scénarios. Le second outil intervenant dans le processus de définition de la maîtrise de l'urbanisation est appliqué à la définition pour définir des distances d'isolement autour des sites. Cinq ans après l'adoption des textes réglementaires pris en application de la loi de 2003, un premier retour peut être fait sur les solutions adoptées et les difficultés qu'elles ont soulevées et soulèvent encore. Dans ce contexte, une étude comparative conduite récemment par l'INERIS avec les Pays-Bas, pays de référence en matière d'approche probabiliste, a permis de mieux comprendre les spécificités, les limites mais aussi les avantages des études de risques à la française.

RÉFÉRENCES

[1] Lenoble C., Chantelaube G. Mise en perspective des approches françaises et néerlandaises de prévention de risques industriels. Acte du 2^e colloque « Le risque industriel, une question de sciences humaines et sociales », 24-25 mars 2010, Lyon.

[2] Pasman Hans. History of dutch process equipment failure frequencies and the Purple Book, Montréal, août 2008, Symposium on loss of containment frequencies, WCCCEB.

UN DÉFI TECHNIQUE

La mise en œuvre d'une approche probabiliste dans les études de dangers reste un défi technique. Il

faut identifier les scénarios d'accidents potentiels et évaluer la probabilité des dommages associés. La référence en matière d'approche probabiliste au début des années 2000, après la catastrophe d'AZF, était la méthodologie appliquée aux Pays-Bas. L'adoption d'une méthode identique en France aurait pu être envisagée. Cependant l'approche néerlandaise basée sur l'application de scénarios prédéfinis et de fréquences génériques moyennes pour toutes les installations ne permettait pas de répondre à certains objectifs de la nouvelle loi. En particulier, elle ne permettait pas de prendre en compte les mesures de sécurité spécifiques présentes en prévention sur les sites industriels. Par ailleurs, Hans Pasman [2] a récemment relevé les nombreuses limites des données d'entrée utilisées dans les approches probabilistes aux Pays-Bas. Il note, à ce sujet, qu'il « *est fortement désirable d'améliorer la qualité et la fiabilité du contenu des analyses des risques* ». Face à ces limites, et pour prendre en compte ces incertitudes, l'INERIS applique et adapte des méthodologies basées sur une bonne connaissance qualitative des scénarios d'accident et de la fiabilité des mesures de sécurité, en s'appuyant notamment sur le diagramme dit en « nœud papillon » pour représenter l'analyse de risques et faire apparaître plus explicitement le rôle des mesures de maîtrise de risques. En effet, ce type de représentation décrit les scénarios d'accident, et les mesures de sécurité qui empêchent leur réalisation, en partant des causes d'une fuite (ou plus généralement d'une perte de confinement ou d'intégrité physique d'une substance dangereuse qui sont les principaux événements redoutés sur un site industriel) jusqu'à leurs conséquences. La quantification probabiliste intervient après cette étape descriptive en utilisant des classes de probabilité. L'approche utilisée ici, consiste donc à établir une représentation de la réalité d'un site, à partir des causes d'un accident, de leurs fréquences et des probabilités de défaillance des barrières de sécurité, en prévention comme en protection. Cette approche n'est pas exempte de difficultés. Par exemple, ici aussi, le manque de données fiables sur les fréquences de causes reste un obstacle conséquent. C'est dans ce cadre que l'INERIS réalise également des études sur la qualité des données d'entrée et les incertitudes qui y sont liées, en confrontant les données proposées dans la littérature entre elles, et avec les informations disponibles sur les accidents industriels connus.

Cette approche est différente de l'approche par « arbre des événements » utilisée aux Pays-Bas qui se focalise sur la description des différentes conséquences d'une fuite et les mesures de sécurité présentes uniquement en protection. L'évaluation des probabilités se base sur des fréquences génériques/moyennes de fuites, qui, de par leur nature, ne prennent pas en compte les particularités du système de sécurité d'un site industriel (par exemple les mesures de sécurité existantes pour prévenir une fuite).

ANALYSE DES APPROCHES FRANÇAISE ET NÉERLANDAISE

L'INERIS a conduit en 2009, en partenariat avec le RIVM (Institut national néerlandais pour la santé publique et l'environnement) une étude comparative sur les évaluations des risques et leur utilisation réglementaire dans les deux pays pour dégager leurs similarités, leurs différences et en tirer des enseignements sur la pertinence des pratiques d'évaluation des risques. Cette analyse comparative a été conduite à titre d'exemple, sur un dépôt de liquide inflammable, installation industrielle relativement simple. L'exercice a permis de mettre en évidence de nombreuses différences non seulement en matière de traitement des probabilités mais aussi de définition des scénarios à prendre en compte et d'estimation des distances d'effet. De telles études comparatives avaient déjà été menées auparavant lorsque l'approche française était encore déterministe. Elles faisaient naturellement apparaître des différences conséquentes. C'est ici la première fois qu'une étude compare en détail la nouvelle approche française avec son équivalent néerlandais, de la définition des scénarios à l'application des réglementations nationales, en passant par l'évaluation de la probabilité, de l'intensité et de la gravité des accidents potentiels. Une des différences relevées est que l'approche française vise plutôt l'exhaustivité des scénarios alors que l'approche néerlandaise s'intéresse à la représentativité des scénarios retenus. À travers l'exemple du dépôt de liquide inflammable, cette différence s'est traduite par la prise en compte dans l'étude française de phénomènes dangereux supplémentaires : explosions/éclatements de réservoirs, boil-overs, feux de bacs, explosions à l'unité de retraitement des vapeurs (URV). Si l'approche française considère qu'il est important de les identifier et de les analyser pour la sécurité du site (ces phénomènes peuvent générer des effets dominos, des sur-accidents et dans certains cas, des effets à l'extérieur du site), *a contrario*, l'approche néerlandaise les considère comme non-représentatifs du risque pour les populations extérieures dans la mesure où leur

cinétique peut être lente (exemple : le boil-over) ou leur intensité peut rester négligeable par rapport à d'autres phénomènes dangereux (exemple : feu de bac et explosion à l'URV). Malgré ces différences, les résultats obtenus par les deux méthodes, française et néerlandaise, apparaissent très cohérents, et les zones dans lesquelles une maîtrise de l'urbanisation est nécessaire (zone à l'intérieur du contour de probabilité 10^{-6} et zone d'aléa F+) sont très proches dans les deux études (figure 1).

CONCLUSIONS

L'approche française apparaît plus détaillée que celle adoptée aux Pays-Bas, qui est moins consommatrice en ressources. Elles ne visent en fait pas les mêmes objectifs. En effet, si l'approche néerlandaise a pour objectif de dresser un constat des risques à des fins de prise de décision (autorisation d'exploiter, maîtrise de l'urbanisation), l'approche française permet d'identifier de manière plus précise les meilleurs moyens pour réduire le risque. Ces évaluations des risques constituent surtout une base de travail riche pour un dialogue entre les autorités et les industriels sur l'amélioration de la sécurité du site. Ces deux derniers objectifs sont une conséquence directe du processus qui a conduit à l'adoption du nouveau cadre réglementaire français suite à l'accident d'AZF.

C. Lenoble, G. Chantelauve, B. Debray

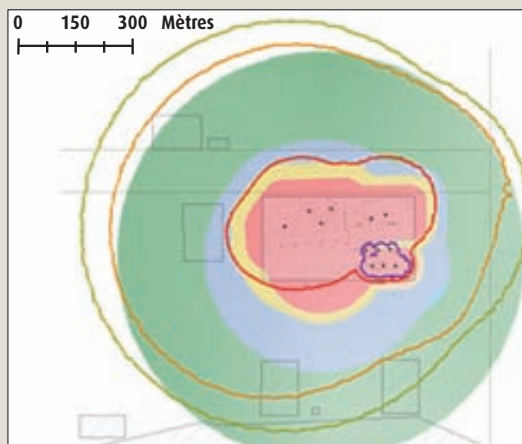


FIGURE 1
RÉSULTATS D'UNE ÉTUDE COMPARATIVE DES APPROCHES NÉERLANDAISES ET FRANÇAISES
Le cas de la maîtrise de l'urbanisation autour d'un dépôt de liquide inflammable : les zones de restriction stricte de l'urbanisation (zone jaune pour l'approche française et courbe rouge pour l'approche néerlandaise) sont similaires

Niveaux d'aléa	
Fai	1×10^{-5} /an
M+	1×10^{-6} /an
F+	1×10^{-7} /an
TF	1×10^{-8} /an
TF+	

Cartouche de gauche :
Niveaux d'aléas :
fai : faible ;
m+ : moyen + ;
f+ : fort + ;
tf : très fort ;
tf+ : très fort+

Cartouche de droite :
Courbes iso-risques de probabilité de décès individuel par an



Barrières de Sécurité & Tests de Révision



D. Charpentier/F. Brissaud

RÉFÉRENCES

- [1] Brissaud F., Baros A., Bérenguer C. Probability of Failure of Safety-Critical Systems Subject to Partial Tests, dans les actes de la conférence RAMS 2010, San Jose, USA, 2010.
- [2] Bukowski J. V. A comparison of techniques for computing PFD average, dans les actes de la conférence RAMS 2005, Alexandria VA, USA, 2000.
- [3] IEC, IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, Genève : International Electrotechnical Commission, 2002.
- [4] Rausand M., Høyland A., System reliability theory; models, statistical methods, and applications, 2nd edition, New York : Wiley, 2002.
- [5] Rouvroye J. L., van den Blik E. G. Comparing safety analysis techniques, Reliability Engineering & System Safety, vol. 75, p. 289-294, 2002.
- [6] Rouvroye J. L., Wiegerinck J. A. Minimizing costs while meeting safety requirements: Modeling deterministic (imperfect) staggered tests using standard Markov models for SIL calculations, ISA transaction, vol. 45, p. 611-621, 2006.

Les Systèmes Instrumentés de Sécurité (SIS) constitués de capteurs (mesure de pression, détection de gaz, etc.), d'unités de traitement (automates) et d'actionneurs (vannes) jouent un rôle clef dans la prévention des risques industriels, en tant que barrières de sécurité. L'objectif d'un SIS est de maintenir un état sûr d'un process industriel par rapport à un événement dangereux (rejet de substance, incendie, explosion, etc.). L'enjeu est de connaître la disponibilité du SIS qui est la capacité à accomplir une ou plusieurs fonctions de sécurité à un instant donné (lorsqu'elles sont sollicitées), et dans des conditions données (leurs environnements). Les recherches de l'INERIS sur l'évaluation des SIS ont consisté à quantifier la disponibilité et la probabilité de défaillance à la sollicitation sur les architectures complexes et d'optimiser ainsi les périodicités de tests des SIS.

Ces travaux s'appuient sur les méthodes d'évaluation de la norme CEI 61508 [3] et le développement de modèles mathématiques pour des architectures redondantes complexes. La norme CEI 61508 propose des méthodes basées sur les diagrammes de fiabilité, arbres de défaillance, chaînes de Markov. L'approche de l'INERIS est différente : une approche analytique est proposée afin de disposer d'une expression paramétrique de la probabilité de défaillance dangereuse moyenne et de pouvoir ainsi faire une analyse paramétrique et d'optimiser les tests.

EXPRESSION DES PROBABILITÉS DE DÉFAILLANCE DANGEREUSE NON DÉTECTÉE

La politique de maintenance et de contrôle des systèmes de sécurité s'appuie sur la prévision du comportement de ces systèmes lors d'une sollicitation et sur la quantification de leur disponibilité et de leurs probabilités de défaillance. Ceci afin de s'assurer de l'adéquation entre les risques des installations et les moyens de tests mis en œuvre. En déterminant les probabilités de défaillance à la sollicitation de SIS soumis à des tests de révision partiels et complets*, il est possible de quantifier le niveau de sécurité de ces systèmes et d'en déduire un plan de tests afin de maintenir ce niveau. Le plan de test peut être optimisé en adaptant la durée entre tests (partiels et complets) afin de maintenir constant le niveau de sécurité.

L'étude porte sur les systèmes complexes avec une architecture redondante de type MooN, c'est-à-dire que le bon fonctionnement de M composants parmi N suffit à accomplir la fonction de sécurité. Les expressions analytiques des probabilités de défaillances (formules exactes ou approchées) sont simples à utiliser pour un exploitant d'une installation industrielle.

Il faut toutefois se méfier des évaluations de probabilité de défaillances de ces systèmes instrumentés qui s'appuient sur de nombreuses hypothèses qui sont trop souvent oubliées par les utilisateurs de ces formules comme par exemple :



- les N composants du système sont en service et opérationnels au démarrage ;
- les N composants du système sont testés simultanément lors de chaque test ;

- les défaillances détectées au cours d'un test partiel ou complet sont réparées immédiatement et, durant ce temps, des mesures sont prises afin de maintenir l'installation dans un état sûr. Des travaux complémentaires permettraient aisément de fournir des outils de maîtrise des risques qui conviendraient à un plus large champ d'applications, comme par exemple :

- des systèmes constitués d'éléments hétérogènes (éléments dont les taux de défaillance ne sont pas tous identiques),
- des systèmes sujets à des causes communes de défaillance,
- des systèmes vieillissants (dont certains taux de défaillance ne sont pas constants).

Ces évolutions peuvent facilement être résolues par des raisonnements similaires à ceux étudiés mais rendent souvent les expressions mathématiques plus difficiles à manipuler. Il conviendrait aussi d'exprimer formellement les intervalles de confiance de ces estimations.

APPLICATION À UN SYSTÈME DE PRÉVENTION D'INCENDIE SUR UNE INSTALLATION INDUSTRIELLE

Le modèle est appliqué à un système de prévention d'incendie par inertage à l'azote de l'atmosphère. Afin d'empêcher

les départs et la propagation d'incendie, tout en maintenant l'atmosphère respirable, la teneur en oxygène doit être maintenue autour de 15 %. L'entrepôt considéré comprend 6 capteurs d'oxygène. Comme l'azote introduit se répartit rapidement et de façon homogène, les capteurs sont supposés redondants. L'architecture du système est de type 2006 (le bon fonctionnement de 2 capteurs sur 6 suffit à accomplir la fonction de sécurité).

Le constructeur prescrit un test annuel des capteurs, ces tests sont donc supposés complets. Des inspections visuelles sont conseillées, ce sont des tests partiels qui ne permettent pas de détecter certaines défaillances visibles de l'extérieur. L'ensemble des 6 capteurs est testé à chaque test selon une politique qui consiste à effectuer les tests partiels périodiquement tous les 3 mois et un test complet annuellement.

L'évaluation a consisté à :

- utiliser les observations faites par un utilisateur sur une période donnée afin d'estimer le taux de défaillance des capteurs ;
- évaluer l'efficacité des tests partiels ;
- puis en déduire les probabilités de défaillance à la sollicitation du système.

Dans un second temps, une optimisation de la répartition des tests partiels est proposée afin de réduire la probabilité de défaillance dangereuse.

DÉFINITIONS

* Les tests de révision *complets*

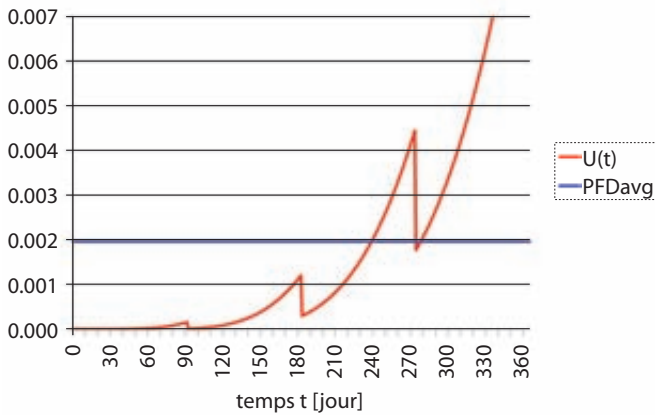
font référence aux essais périodiques permettant de détecter toutes les défaillances d'un SIS : si une défaillance s'est produite depuis la dernière révision, celle-ci peut être réparée et le SIS peut retrouver un état comparable à l'état initial.

Les tests de révision *partiels*

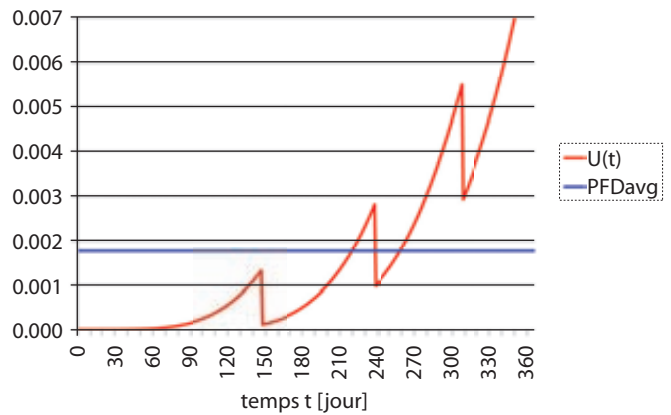
ne permettent, quant à eux, que de détecter certaines défaillances, laissant les autres non détectées jusqu'au prochain test complet. Des inspections visuelles, des contrôles incomplets et des essais imparfaits sont des exemples de tests partiels.

FIGURE 1

PROBABILITÉ MOYENNE DE DÉFAILLANCE DANGEREUSE (PFD_{avg}) ET INDISPONIBILITÉ (U(t)) POUR UNE POLITIQUE DE TESTS PÉRIODIQUES

**FIGURE 2**

PROBABILITÉ MOYENNE DE DÉFAILLANCE DANGEREUSE (PFD_{avg}) ET INDISPONIBILITÉ (U(t)) POUR UNE POLITIQUE DE TESTS OPTIMISÉE



ESTIMATIONS DE LA DISPONIBILITÉ ET DE LA PROBABILITÉ DE DÉFAILLANCE DANGEREUSE NON DÉTECTÉE

Quatre entrepôts, comprenant 6 capteurs chacun ont été observés sur une durée de 4 ans. Ces données et la modélisation du système permettent d'en déduire le taux de défaillance des capteurs de $6,1 \cdot 10^{-5}$ /heure, et une estimation de l'efficacité des tests partiels de 0,42. L'estimation de la probabilité de défaillance dangereuse non détectée du système avec une politique de tests périodiques telle que le préconise le constructeur est évaluée à $2,06 \cdot 10^{-3}$ (figure 1).

OPTIMISATION DE LA RÉPARTITION DES TESTS PARTIELS

Une optimisation de la politique de tests consiste à répartir les instants d'occurrence des tests partiels de façon à réduire la probabilité de défaillance dangereuse non détectée. La résolution du problème d'optimisation conduit alors aux occurrences suivantes : le premier test à 4,8 mois puis 3 mois, 2,3 mois et 1,9 mois. La probabilité de défaillance dangereuse non détectée est de $1,87 \cdot 10^{-3}$, soit une réduction d'environ 10 % par rapport à la politique de tests classique. De plus, l'indisponibilité maximale du système sur l'intervalle de test complet est réduite de plus de 25 % (figure 2).

CONCLUSION

La modélisation d'un système instrumenté afin d'évaluer la disponibilité et les probabilités de défaillance du système en tenant compte des tests (partiels et complets) permet de disposer d'un outil relativement simple pour l'optimisation du niveau de sécurité et son maintien dans le temps. Ces travaux ont porté sur les systèmes redondants et homogènes constitué de N voies identiques.

L'optimisation de la répartition et de l'occurrence des tests permet d'améliorer notablement les critères de sécurité. Sur le cas d'application présenté, une

réduction de 10 % de la probabilité de défaillance dangereuse non détectée et de 25 % de l'indisponibilité maximale est atteinte par rapport à une politique de tests périodiques. Il est ainsi possible d'optimiser les performances du système, sans surcoût associé uniquement en analysant le système et en définissant les durées adéquates entre chaque test.

Pour poursuivre sur l'évaluation des SIS, les recherches s'orientent vers la prise en compte du vieillissement des systèmes instrumentés dans l'optimisation des durées entre chaque test.

ABSTRACT

Safety barriers take an important part of industrial risk management. Even if these systems are not triggered frequently, when an initiating event occurs (overpressure, overflow, etc.), they aim at preventing undesired events on people, environment, and goods. Proof tests have therefore to be performed in order to check the functional state of the safety barriers and, if required, to perform the appropriate maintenance actions. Dependability criteria have then to be assessed by a practical model.

A set of general formulas is proposed for the probability of failure on demand (PFD) assessment of systems subject to partial and full tests. Partial tests (e.g. visual inspections, imperfect testing) may detect only some failures, whereas owing to a full test, the system is restored to an as good as new condition. Following the proposed approach, and according to an example, performance estimations of the system and test policies are presented, by using the feedback from previous tests. An optimization of the partial test distribution is also proposed, which allows reducing the average probability of system failure on demand.

L'analyse technique, humaine et organisationnelle de la sécurité

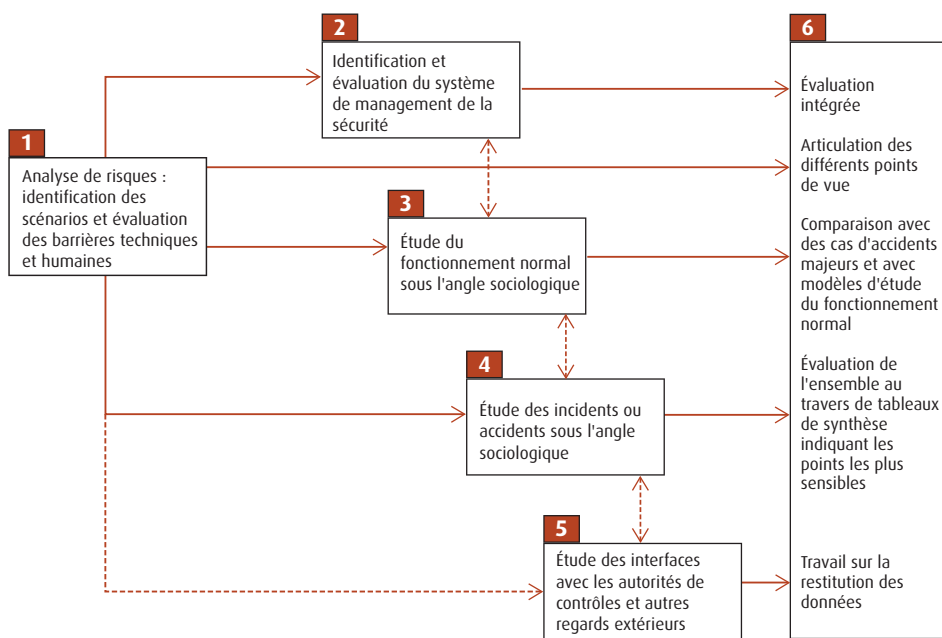


J. C. Le Coze

La méthode ATHOS, pour l'analyse technique, humaine et organisationnelle de la sécurité, est une méthode visant à intégrer plusieurs points de vue venus de disciplines diverses sur le fonctionnement de systèmes à risques à des fins d'évaluation globale. Historiquement la méthode ATHOS se situe dans le sillon des évolutions réglementaires européennes à la fin des années 1990, vers une prise en compte de la dimension de l'organisation,

au-delà des dispositions techniques, par l'intermédiaire des systèmes de gestion de la sécurité (traduit en droit français dans l'arrêté du 10 mai 2000). Toutefois, l'analyse ATHOS a souhaité dès le départ aller au-delà de l'exercice parfois formel de l'approche par les systèmes de management de la sécurité, et prendre en compte les travaux et connaissances en provenance de disciplines telles que l'ergonomie ou la sociologie, appliquées aux questions de sécurité. Une difficulté de l'exercice réside dans la mobilisation de connaissances et pratiques qui appartiennent à des domaines différents, en particulier des univers distants les uns des autres, comme les sciences pour l'ingénieur et les sciences sociales. Cet article a pour but de présenter succinctement comment se met en œuvre cette méthode, qui se déroule en 6 étapes (figure 1).

FIGURE 1
LES ÉTAPES DE LA MÉTHODE ATHOS

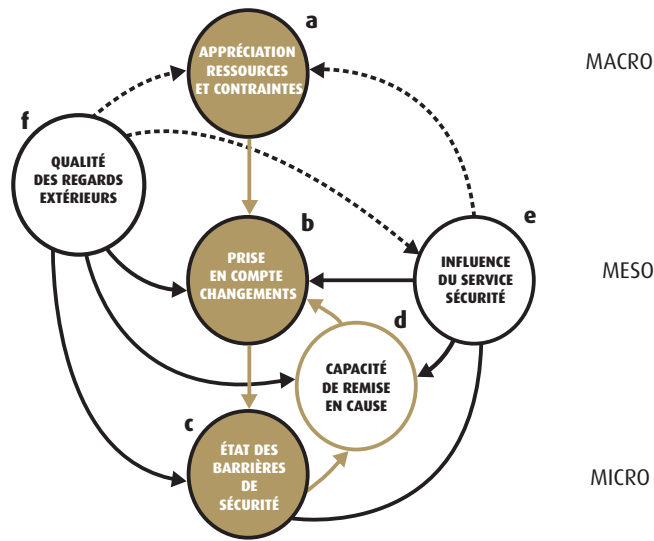


ÉTAPE 1 : L'IDENTIFICATION DES SCÉNARIOS ET L'ÉVALUATION DES BARRIÈRES TECHNIQUES ET HUMAINES

La première étape d'ATHOS consiste à mettre en œuvre à la fois une analyse de risques et une évaluation de la pertinence des barrières techniques et humaines par rapport aux scénarios retenus, en faisant appel aux connaissances à la fois techniques mais aussi ergonomiques.



FIGURE 2
 MODÈLE ATHOS DE SÉCURITÉ INDUSTRIELLE (FORMALISATION DE L'ÉTAPE 6)



L'évaluation des risques sur le plan technique se base sur l'analyse des installations, procédant par décomposition et cherchant, grâce aux connaissances des phénomènes (*i.e.* chimie, mécanique, etc.) et à la capacité de prédiction qu'elles offrent, à anticiper pour prévenir. C'est par l'intermédiaire de groupes de travail réunissant plusieurs catégories de personnels (opérateurs, chef d'équipes, ingénieurs procédés ou instrumentistes, ingénieurs sécurité) que les risques sont évalués et que des mesures de prévention sont proposées. Autour de plans représentant le fonctionnement des installations, des scénarios d'accidents sont anticipés et des mesures (barrières techniques et humaines) sont prévues et mises en œuvre.

ÉTAPES 2, 3, 4 ET 5 : LA PRISE EN COMPTE DE L'ORGANISATION SOUS DIFFÉRENTS ANGLES

La première étape est complétée par plusieurs autres étapes (étapes 2, 3, 4 et 5) qui permettent de pénétrer dans les dimensions organisationnelles de la sécurité, sur la base des points d'entrée identifiés à l'issue de la première étape. Ce sont ces étapes qui produisent l'innovation de la méthode par rapport à l'existant dans le domaine de l'évaluation des risques.

Dans la méthode ATHOS, les étapes 2, 3, 4 et 5 permettent de varier les angles de vue afin d'obtenir une description riche du fonctionnement réel de l'organisation. En particulier, à un mode plus classique d'audit se superpose une approche d'orientation sociologique qui permet une description fine des pratiques et interactions entre acteurs et services sans cadre formalisé *a priori* (*a contrario* des audits qui se basent sur des référentiels).

Afin de produire ces descriptions, un mode de suivi des activités de travail réel, inspiré des pratiques ergonomiques ou sociologiques, se basant à la fois sur des observations, des entretiens (semi-directs et directs, individuels et de groupe) et sur de l'analyse documentaire, est mis en œuvre. Il repose au préalable sur une connaissance des installations et des scénarios à risques ainsi que des barrières humaines et techniques qui ont été identifiées dans la première étape. Cette démarche vient à la suite d'une appréciation des dispositions prises par l'entreprise dans le domaine du management de la sécurité, en s'intéressant aux outils mais aussi aux méthodes qui sont déployées dans les activités tels que le retour d'expérience ou encore la gestion des modifications (étape 2). S'interroger sur

ces outils permet de saisir la conception organisationnelle telle qu'elle est pensée par les « concepteurs » du système de management de la sécurité. Ce sont bien souvent les directeurs de site aidés par l'encadrement en matière de sécurité industrielle, influencés par les standards pour les grands groupes, ou par les normes existantes sur le marché pour les autres. À cette étape, une importance est accordée à l'articulation des différentes activités ainsi qu'aux types d'outils et méthodes utilisées. Il existe en effet une variation dans les méthodes disponibles (des approches comportementalistes aux méthodes d'analyses des causes profondes des accidents par exemple).

L'étape 3, la description du fonctionnement normal, s'appuie sur le principe d'une compréhension des interactions entre les individus (au sein des collectifs des équipes de travail, entre services ou encore au sein du comité de direction) ainsi que des interactions des individus avec les installations. Le suivi du travail quotidien, par entretiens et observations, des activités clés de la gestion des risques (surveillance en salle de contrôle, manipulation de produits dangereux, dépotages, etc.) ainsi que des moments clés comme les réunions entre services ou au sein de services autour de la sécurité sont nécessaires pour identifier les modes d'interactions.

Cette démarche est répétée pour comprendre les dispositifs que met l'entreprise en place pour apprendre de ses propres incidents ou accidents (étape 4). Cette étape est une étape fondamentale car elle révèle la capacité en particulier de la direction et de l'encadrement de faire son auto-critique et d'analyser les dimensions organisationnelles sous-jacentes aux incidents et accidents qui surviennent dans l'entreprise. Enfin, avec la prise en compte du regard extérieur par les acteurs de l'organisation, l'étape 5 permet de bénéficier d'angles de vue en décalage avec leurs pratiques quotidiennes. Tirer parti du regard extérieur est un levier important de la sécurité industrielle, qui a fait défaut à beaucoup d'entreprises victimes de catastrophes, comme cela a été montré dans les investigations d'accidents majeurs.

ÉTAPE 6 : L'ÉVALUATION INTÉGRÉE ET LA RESTITUTION DES RÉSULTATS

L'évaluation intégrée repose au final sur l'articulation des points de vue obtenus lors de l'application des différentes étapes de la méthode ATHOS. Une grille de lecture est alors utilisée dans ce but. Elle a été élaborée sur la base d'investigations techniques et organisationnelles d'accidents majeurs ainsi que d'études sur le fonctionnement normal menées par l'INERIS ([1], [2]) qui, une fois exploitées, ont permis d'élaborer le modèle suivant (figure 2).

Ce modèle se lit comme suit : l'appréciation par l'entreprise de ses contraintes et ressources par rapport à son environnement (a - niveau macro) doit permettre un recul suffisant pour envisager les impacts des changements et transformations (internes ou externes, contraints ou choisis) sur la sécurité (b - niveau meso). Ceci afin de maintenir en état de fonctionnement les barrières techniques et humaines de sécurité (c - niveau micro). Les problèmes de mise en œuvre se traduisent par une écoute attentive des signaux faibles (portés potentiellement par des lanceurs d'alerte) ainsi qu'une capacité de remise en cause à la suite d'incidents (d). Les capacités d'écoute et de remise en cause reposent notamment sur un service sécurité compétent et suffisamment influent

(e), ainsi que par des regards extérieurs de qualité (f) que l'organisation est en mesure de mobiliser, de comprendre et de traduire dans les pratiques.

Les retours d'expérience industriels sur la mise en œuvre de la méthode – la méthode a été testée⁽¹⁾ sur trois entreprises à risque de la chimie – et de la grille de lecture sont très encourageants, malgré des changements de points de vue à accepter et à adopter, pour certaines des entreprises à risque participantes. En effet, parler ouvertement de toutes ces dimensions n'est pas aisé. Cette approche de l'évaluation à caractère organisationnel a été jusqu'à présent balisée par les pratiques d'audits.

Or les audits ne vont pas toujours aussi loin dans la description des problèmes réels rencontrés par les entreprises et contribuent à apporter une vision quelque peu déformée ou idéalisée des organisations [3]. À des fins de traduction opérationnelle lors des restitutions des résultats, des tableaux ont été proposés. Ils ont pour ambition de chercher à établir un lien entre cette approche innovante de nature à la fois descriptive et évaluative (qui s'écarte des audits habituels), avec l'univers gestionnaire qui s'inscrit dans des cadres de pensée habitués au pilotage des systèmes par les indicateurs et à la recherche de solutions standardisées.

NOTES

(1) Collaboration avec Michèle Dupré, sociologue au MODYS de Lyon (Mondes et dynamiques des sociétés).

RÉFÉRENCES

[1] Le Coze J. C. 2010a. Accident in a French dynamite factory: An example of an organisational investigation. *Safety science*. 48. Issue 1. 80-90.

[2] Le Coze J. C. 2010b. A study about changes and their impacts on safety. Article présenté à la conférence "Working on Safety", les 7, 8 et 9 septembre 2010 à Røros, Norvège.

[3] Le Coze J. C. Dupré, 2008. The need for translators and new models of safety. Dans Hollnagel E., Nemeth C., Dekker S., 2008. *Resilience Engineering Perspectives*. Volume 1 : Remaining Sensitive to the Possibility of Failure. Ashgate.

ABSTRACT

ATHOS, for "Analysis of Technical, Human and Organisational Safety" is a hybrid method for assessment of industrial safety that has been applied in empirical researches in the chemical industry. This research had the purpose of producing safety assessment of plants by taking into account organisational dimensions. One of the key principles of the project was to move beyond traditional audits as practiced in this industry in order to introduce insights from various disciplinary traditions such as engineering, ergonomic, sociology or political sciences. Based on several steps involving technical risk assessment, identification of technical and human barriers, evaluation of safety management system, description of real practices at shop floor and managerial levels as well as interactions with safety oversights (including regulator), the method attempts to capture the dynamical and systemic properties of industrial safety. The results are very encouraging. The three companies which participated to the research reacted for most of them very positively to this new way of assessing safety, beyond 'technically' and 'audit' oriented approaches. These researches demonstrate that it is possible today to better prevent technological risks by including human and social sciences into a still dominantly engineering based perspective.

Substances et procédés





La caractérisation des dangers des substances et l'évaluation des risques physicochimiques liés aux produits et à la mise en œuvre de procédés industriels est l'un des domaines d'expertise reconnus de l'Institut. Cette expertise doit s'entretenir et s'enrichir en permanence et justifie une activité de recherche soutenue. Parmi les thèmes que nous suivons en priorité, il convient de citer en particulier :

- l'actualité réglementaire (règlements REACH et CLP, Directive européenne sur les énergies renouvelables) ;
- les récentes percées industrielles des nanomatériaux et des nanotechnologies ;
- le plan de développement national de la filière « véhicules électriques » lequel s'inscrit dans un contexte largement européen, et même mondial ;
- la valorisation chimique et énergétique de la biomasse (concept de chimie verte) au sein de bioraffineries.

Dans ce contexte, conduire la réflexion sécurité en amont implique de développer de nouveaux outils d'évaluation, comme par exemple les outils prédictifs des propriétés physicochimiques dangereuses des produits (modélisation moléculaire), venant compléter les essais plus conventionnels, donnant l'accès à ces données requises dans le cadre de l'application de REACH et du CLP. Un article de ce rapport développe les acquis récemment obtenus par notre recherche dans ce domaine pour ce qui concerne la prédiction des propriétés d'explosivité de composés nitro-aromatiques. Ce travail est le fruit d'une collaboration avec l'ENSCP développée dans le cadre de la thèse de Guillaume Fayet. Les actions mises en œuvre par

ailleurs dans le cadre d'appels d'offres nationaux pour accompagner le développement sûr des nanotechnologies (projet Nano Innov) ou du véhicule électrique (programme STEEVE) sont également brièvement présentées. Elles attestent de la capacité de réactivité de l'Institut pour mettre en place les moyens spécifiques qu'exigent parfois les défis de sécurité posés par certains développements technologiques au regard de leur caractère novateur, multisectoriel ou du fait d'une brusque montée en puissance de leur industrialisation.

Un deuxième article, également fruit d'un travail de thèse défini par l'INERIS en collaboration avec l'Université d'Edimbourg montre tout l'intérêt de conjuguer analyse théorique et validations expérimentales à l'aide d'appareillages de laboratoire performants (calorimètres de Tewartson équipant les deux laboratoires) quand il s'agit d'explorer les impacts non conventionnels (hors détonation) de scénarios accidentels impliquant les matériaux énergétiques. Le travail s'est appuyé sur l'analyse des mécanismes complexes de décomposition et d'oxydation développés par des poudres fumigènes (mélanges lactose, cellulose, nitrate de potassium) lors de leur combustion. Dans le cadre de sa thèse, Hubert Biteau a mis en évidence, de manière originale, les domaines d'intervention respectifs de l'oxygène contenu dans le matériau lui-même et dans l'atmosphère gazeuse dans laquelle se déroulent les processus de combustion de ces matériaux énergétiques. Il est envisagé de consolider encore à l'avenir les partenariats académiques dans ce secteur de notre recherche, au vu des résultats encourageants obtenus.

- Tout en continuant d'adapter nos moyens expérimentaux aux nouvelles réglementations REACH et CLP, nous développerons la modélisation numérique des propriétés physicochimiques des substances telles que l'explosibilité, l'inflammabilité et la comburance, par exemple par les méthodes prédictives de type QSPR (Quantitative Structure – Property Relationships).

- Par une approche systémique du concept de bioraffinerie et en prenant en compte les indispensables critères de flexibilité de fonctionnement de ces installations, nos travaux viseront à proposer des moyens de diagnostic et d'amélioration de la sécurité de la filière biocarburants. Nous continuerons d'accompagner les développements technologiques de l'utilisation de l'hydrogène-énergie pour mettre à disposition des particuliers des installations sûres.

- Nous contribuerons à un développement plus sûr des technologies électrochimiques de stockage de l'énergie via la plateforme STEEVE et à travers des participations à des programmes de recherche tels que le programme européen HELIOS sur la sécurité des batteries Li-Ion.

Développement de modèles QSPR pour la prédiction des propriétés d'explosibilité des composés nitroaromatiques



G. Fayet/P. Rotureau

L'évaluation de l'explosibilité des substances chimiques condensées (risque d'explosion) lors de diverses opérations, comme la fabrication, le stockage, le transport ou la mise en œuvre, repose essentiellement sur le retour d'expérience et la conduite d'essais réalisés selon des référentiels réglementaires internationaux [1]. L'évolution récente de la réglementation européenne en matière de contrôle des produits chimiques (règlements REACH et CLP [2]) induit un volume de travaux incompatible avec une détermination expérimentale systématique de leurs propriétés dangereuses (faisabilité matérielle, coût financier et délais raisonnables) puisque plus de 140 000 substances chimiques sont concernées par REACH. Aussi, le recours à des méthodes prédictives (alternatives ou complémentaires à l'expérimentation) comme les approches QSPR (relations quantitatives structures-propriétés) sont largement encouragées par REACH.

Un programme de recherche a été lancé à l'INERIS, en 2007, en collaboration avec l'ENSCP, dont l'objectif est de développer des modèles de prédiction théorique des propriétés macroscopiques d'explosibilité des substances chimiques dangereuses, par le biais de la chimie quantique et de méthodes de type QSPR. Plus précisément, la thèse de G. Fayet (2007-2010) a été centrée sur le développement et l'évaluation de modèles QSPR capables de prédire la stabilité thermique (et plus particulière-

ment l'énergie de décomposition) ainsi que la sensibilité à la décharge électrique d'une famille de substances bien connues pour leurs propriétés explosives : les composés nitroaromatiques [3] dont font partie le TNT (trinitrotoluène) et l'acide picrique (trinitrophénol).

RELATIONS QUANTITATIVES STRUCTURES-PROPRIÉTÉS (QSPR)

La méthodologie QSPR consiste en la construction d'un modèle quantitatif reliant une propriété expérimentale à la structure moléculaire des composés étudiés. Cette dernière est caractérisée par des descripteurs constitutionnels (exemples : nombre de groupements, d'atomes), topologiques (basés sur la connectivité des atomes dans la molécule), géométriques (caractérisant la géométrie 3D de la molécule) ou quantiques (regroupant les informations énergétiques, électroniques et de réactivité). L'obtention du modèle peut se faire à l'aide de différents outils : réseaux de neurones, algorithmes génétiques ou plus couramment à l'aide de régressions linéaires ou multilinéaires. La mise en place et l'utilisation d'un modèle QSPR est résumé en **figure 1**. Une fois un modèle robuste obtenu, il peut alors être utilisé pour la prédiction de la propriété de composés similaires pour lesquels la propriété n'est pas connue, voire pour des molécules encore non synthétisées. Dans certains cas, le modèle peut également permettre la compréhension

des mécanismes mis en jeu dans la propriété étudiée.

PRÉDICTION DE LA STABILITÉ THERMIQUE

La stabilité thermique est une propriété importante des substances explosives, puisque les grandeurs qui la qualifient renseignent sur la quantité d'énergie dissipée durant le processus de décomposition et interviennent dans la démarche de classement de ces substances. Si sa caractérisation expérimentale (température et chaleur de décomposition) est bien définie, notamment par calorimétrie, peu de modèles prédictifs ont été développés pour ces propriétés.

Dans le cadre de nos travaux [4], un premier modèle QSPR a été mis en place à partir d'une base de données de 22 composés nitroaromatiques pour lesquels les chaleurs de décomposition ($-\Delta H$) sont extraites d'une unique référence [5] afin de s'assurer qu'elles ont été obtenues selon un protocole expérimental identique.

Plus de 300 descripteurs ont été obtenus avec le logiciel CodessaPro [6] à partir de structures moléculaires calculées *via* le logiciel Gaussian03 [7] à l'aide d'une méthode de modélisation moléculaire : la « Théorie de la Fonctionnelle de la densité » (DFT pour Density Functional Theory), une approche théorique fondée sur des concepts de mécanique quantique (comme la densité électronique) qui est utilisée en chimie et physique pour accéder à des

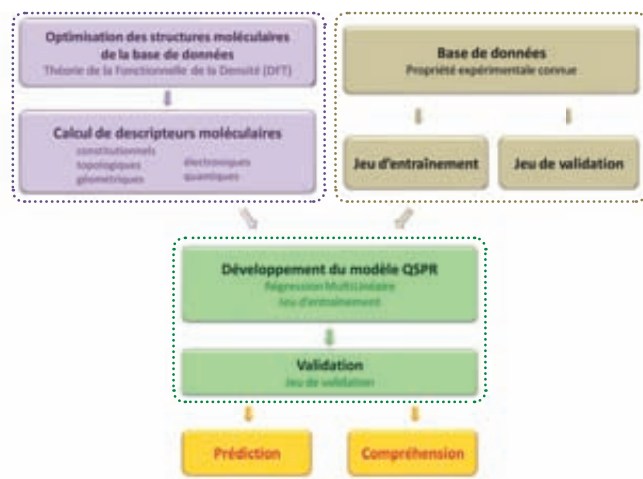


FIGURE 1
MISE EN PLACE ET UTILISATION D'UN MODÈLE QSPR

propriétés physico-chimiques à l'échelle moléculaire.

Ces descripteurs ont été intégrés dans une analyse statistique menant au développement d'un modèle multilinéaire le plus corrélé possible avec l'expérience mais avec un nombre de descripteurs suffisamment réduit pour éviter toute surparamétrisation du modèle, qui dégraderait son pouvoir prédictif.

Un modèle à 3 paramètres très corrélé avec les chaleurs de décomposition expérimentales est obtenu ($R^2=0,98$), comme montré en figure 2. Si un jeu de données externes est nécessaire pour évaluer la prédictivité du modèle, la validation croisée démontre la robustesse du modèle ($R^2_{cv}=0,97$). On notera par ailleurs la prédiction correcte de la chaleur de décomposition d'une molécule externe au set d'entraînement (le TNT).

$$-\Delta H \text{ (kJ/mol)} = 401,6 n_N + 2092,2 BO_{N,avg} + 13287 E_{O,max} - 3148,5$$

où n_N est le nombre d'atomes d'azote, $BO_{N,avg}$ l'ordre de liaison moyen pour un atome d'azote et $E_{O,max}$ l'indice de réactivité électrophile maximal pour un atome d'oxygène. Les trois descripteurs sélectionnés dans le modèle caractérisent le nombre de groupements nitro et leur capacité à se dissocier du reste de la molécule. Or, la chaleur de décomposition dépend bien de l'énergie libérée par la perte des groupements nitro et de leur nombre.

Le modèle développé présente une bonne corrélation avec l'expérience et a également un sens chimique lié au phénomène de stabilité thermique.

Si l'utilisation d'une base de données plus importante serait souhaitable afin de mettre en place une validation rigoureuse du modèle à l'aide d'un jeu de données externes, ce premier modèle QSPR, à la fois corrélé et signifiant chimiquement, démontre la pertinence de notre approche.

PRÉDICTION DE LA SENSIBILITÉ À LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE

Nous nous sommes également intéressés à une autre propriété des composés énergétiques, la sensibilité électrique pour 26 composés nitroaromatiques.

Parmi les différents modes d'initiation entraînant l'explosion (chaleur, impact, friction...), la sensibilité à la décharge électrique (EES) n'est pas, jusqu'à présent, la plus étudiée par approche prédictive.

Nous avons développé le modèle suivant à 4 paramètres [8] avec un coefficient de corrélation de 0,90 :

$$E_{ES}(J) = 29,6 n_{single} + 63,3 N_{C,max} + 168,4 Q_{C,min} - 27,8 V_{C,min} + 99,4$$

où n_{single} est le nombre relatif de liaisons simples et $N_{C,max}$, $Q_{C,min}$ et $V_{C,min}$ sont respectivement l'indice maximal de réactivité nucléophile, la charge minimale et la valence minimale pour un atome de carbone. Ces trois derniers descripteurs peuvent être reliés au carbone de la liaison C-NO₂. Or, la perte de ce groupement nitro est communément reconnue comme l'étape limitante de la décomposition des composés nitrés. Ces descripteurs semblent donc tout indiqués pour la prédiction de ce mode d'amorçage de la décomposition explosive. Cette première étude sera, dans le futur, approfondie en augmentant la base de données pour permettre la prise en compte d'un processus de validation mais elle démontre déjà l'applicabilité de la démarche employée.

MÉCANISMES DE DÉCOMPOSITION

Même si des modèles QSPR avec de forts pouvoirs prédictifs sont accessibles, ils ne nous donnent pas forcément accès aux détails des mécanismes réactionnels

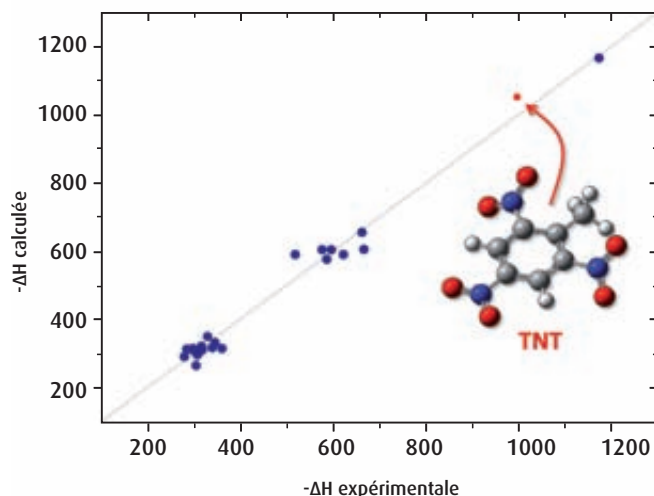


FIGURE 2
CHALEURS DE DÉCOMPOSITION CALCULÉES (-ΔHcal) À PARTIR DU MODÈLE EN FONCTION DES VALEURS EXPÉRIMENTALES (-ΔHexp) (kJ/mol)

RÉFÉRENCES

- [1] Rotureau P., Fayet G., Marlair G., Michot C., Joubert L., Adamo C. Évaluation de l'explosibilité des substances chimiques : des approches expérimentales classiques à la prédiction par la chimie quantique et les méthodes statistiques QSPR, *Actualité Chimique*, 2010, n° 337 : p. 51.
- [2] Règlement CE n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006.
- [3] Médard L. Les explosifs occasionnels. Tomes 1 et 2, Tech & Doc, 1987.
- [4] Fayet G., Rotureau P., Joubert L., Adamo C. QSPR Modeling of Thermal Stability of Nitroaromatic Compounds: DFT vs. AM1 Calculated Descriptors, *J. Mol. Model.*, 2009, 16, p. 805.
- [5] Duh Y. S., Lee C., Hsu C. C., Hwang D. R., Kao C. S. Chemical incompatibility of nitrocompounds, *J. Hazard. Mater.*, 1997, 53, p. 183.
- [6] CodessaPro, University of Florida, 2002.
- [7] Gaussian 03, Revision B.03, Gaussian Inc., Pittsburg, PA, USA, 2003.
- [8] Fayet G., Rotureau P., Joubert L., Adamo C. Predicting explosibility properties of chemicals from Quantitative Structure-Property Relationships, *Proceedings of the 43rd Loss Prevention Symposium and 5th Global Congress on Process Safety*, edited by AIChE, 2009, p. 15.
- [9] Fayet G., Joubert L., Rotureau P., Adamo C. A theoretical study of the decomposition mechanisms in substituted ortho-nitrotoluenes, *J. Phys. Chem. A*, 2009, 113, p. 13621.
- [10] Fayet G., Joubert L., Rotureau P., Adamo C. A theoretical study of the decomposition reactions in substituted nitrobenzenes, *J. Phys. Chem. A*, 2008, 112, p. 4054.
- [11] Fayet G., Joubert L., Rotureau P., Adamo C. On the use of descriptors arising from the conceptual density functional theory for the prediction of chemicals explosibility, *Chem. Phys. Lett.*, 2009, 467, p. 407.
- [12] Fayet G., Rotureau P., Joubert L., Adamo C. On the prediction of thermal stability of nitroaromatic compounds using quantum chemical calculations, *J. Hazard. Mater.*, 2009, 171, p. 845.

sous-jacents. Cette connaissance est fondamentale, non seulement pour l'identification de tous les processus microscopiques, mais aussi comme aide à la sélection efficace des descripteurs les plus adaptés et des molécules dans les bases de données utilisées.

En particulier, au sein des composés nitroaromatiques, les molécules substituées en position ortho avec le groupe nitro présentent des chemins de décomposition pouvant mettre en jeu des interactions directes entre le groupement nitro et les substituants situés en ortho [9]. En effet, en l'absence de substituant en position ortho, la décomposition est initiée par la rupture directe de la liaison C-NO₂ [10]. La présence d'un groupement méthyle en ortho favorise une interaction directe entre les groupements méthyle et nitro. L'utilisation de descripteurs de réactivité, accessibles grâce aux calculs DFT, apparaît alors tout indiquée dans le développement de modèles QSPR pertinents pour cette étude [11,12], afin de rendre compte de la complexité de ce processus de décomposition.

CONCLUSIONS

Deux modèles prédictifs des propriétés liées à l'explosibilité (la chaleur de décomposition et la sensibilité à la décharge électrique) des composés nitroaromatiques ont été développés à partir de calculs de chimie quantique permettant de décrire les structures moléculaires de ces composés en utilisant des descripteurs classiques (de type constitutionnels) mais aussi énergétiques et quantiques. Ces premiers résultats, d'une recherche tout à fait nouvelle à l'INERIS, montrent que les outils de chimie quantique associés aux méthodes QSPR sont des outils performants pour prédire les propriétés d'explosibilité des substances. Ces modèles intègrent, de plus, des descripteurs associés à la liaison C-NO₂ représentant le processus de décomposition des composés nitroaromatiques. L'augmentation des bases de données permettra une validation rigoureuse des modèles. Une fois validés et associés à d'autres modèles permettant de prédire la sensibilité à l'impact, par exemple, les modèles développés seront intégrés dans un outil global informatisé

permettant d'identifier correctement les dangers d'explosion des produits chimiques. Le développement de ces outils prédictifs QSPR, encouragé par REACh, viendra accélérer la caractérisation du danger d'explosion des substances chimiques enregistrées en fournissant une première évaluation des dangers considérés et en élaborant une stratégie de tests expérimentaux d'explosibilité optimisée si nécessaire. Ce travail démontre plus globalement que les outils de modélisation moléculaire ne sont pas réservés à la seule analyse des dangers toxiques présentés par les produits chimiques : leur potentiel vis-à-vis de la prédiction des dangers physico-chimiques est bien réel, quoiqu'encore sous-employé de nos jours.

COLLABORATIONS

ENSCP Chimie ParisTech – Équipe de Modélisation des Systèmes Complexes
Université de Modène et Reggio Emilia (Italie) – Département des Sciences Pharmaceutiques

ABSTRACT

The evaluation of condensed chemicals explosibility (risk of explosion) at various operational processes, such as manufacturing, storage, transport or implementation, is based on experimental trials according to international regulatory frameworks. The recent evolution of European regulations on control of chemicals (REACh and CLP regulations) leads to a volume of work inconsistent with a systematic experimental determination of their dangerous properties (feasibility, cost and reasonable times) because more than 140,000 chemicals are subjected to REACh. So, the use of predictive methods (alternative or complementary to experiments) like QSPR approaches (quantitative structure / property relationships) is widely promoted by REACh. New predictive methods have been developed to predict the properties of explosibility of nitroaromatic compounds with an original approach combining QSPR methodology and quantum chemistry tools.

Le projet de plateforme STEEVE (Stockage d'Énergie Electrochimique pour Véhicules Électriques) est né d'un constat simple : pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'Environnement (porter à 23 % en 2020 la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale en France), il faut offrir des solutions techniques innovantes parmi lesquelles le recours à l'énergie électrique pour assurer la mobilité des véhicules. Il faut donc anticiper une progression rapide du besoin de solutions de stockage d'énergie électrique de forte puissance, qui doit s'opérer dans des conditions de marché et de sécurité satisfaisantes. À l'heure actuelle, le domaine du stockage d'énergie électrochimique est largement dominé par l'Asie dont les standards de sécurité ne sont pas ceux de l'Europe. Il est nécessaire de progresser sur la compréhension des phénomènes dangereux associés à ces technologies nouvelles et à leur usage et d'assurer un encadrement approprié de leur mise sur le marché.

La plateforme STEEVE s'inscrit dans le cadre des plateformes d'innovation et vise à renforcer une synergie de compétences et de moyens sur le réservoir d'énergie que représente le stockage électrochimique. Elle regroupe des opérateurs (CEA, CNRS, EDF R&D, INERIS) qui possèdent une expertise sur ce sujet et continuent à développer à travers des programmes de recherche. Elle a pour vocation d'offrir aux industriels une filière

homogène de la recherche fondamentale à l'évaluation des performances et de la sécurité puis à la certification. Cette plateforme a également pour ambition de devenir une référence européenne pour l'accompagnement de l'innovation dans ce domaine et d'être complémentaire d'autres plateformes d'innovation contribuant au développement du véhicule décarboné.

Dans le cadre de cette plateforme et pour la partie STEEVE SÉCURITÉ, l'INERIS porte les activités d'essais et d'analyse sur les systèmes de stockage et principalement les batteries. Ainsi l'INERIS définit les protocoles et réalisera les essais de sécurité adaptés à l'utilisation et au transport des objets considérés : en plus des moyens d'essais et des outils d'analyse des risques préexistants à l'INERIS, qui seront adaptés à l'évaluation de la sécurité des systèmes de stockage d'énergie, un programme d'investissement en équipements et bâtiment est en cours. Il aboutira en 2012 à la réalisation d'un bâtiment de 240 m² entièrement dédié aux essais de sécurité sur les batteries.

En complément de cette activité, la direction de la Certification de l'INERIS développe un système de certification volontaire ELLICERT des batteries pour véhicules électriques qui s'appuie sur un référentiel prévoyant des tests «abusifs» sur cellules et packs de batteries.

D. Tigreat



Essai de combustion d'une batterie Li-ion.



Installation pour essai de chute sur les stockages d'énergie électrique.

Le plan Nano Innov, lancé en 2009, consiste à structurer la recherche dans les nanotechnologies tout en assurant la sécurité des opérateurs au poste de travail en présence de nanoparticules.

L'INERIS s'est engagé dans la recherche aux plans national et européen pour un développement maîtrisé des nanotechnologies depuis de nombreuses années. La métrologie est la clé de voûte de différents travaux menés à l'Institut sur la toxicité, l'écotoxicité et l'expologie. C'est pourquoi dès 2006, l'INERIS a entrepris de développer une instrumentation capable de détecter et d'identifier les nanoparticules dans différents milieux (air, eau). En matière de risque industriel, l'INERIS mène des recherches sur le comportement des poudres nanométriques vis-à-vis du risque d'explosion sur les sites de production.

SÉCURITÉ DES OPÉRATEURS AU POSTE DE TRAVAIL

Dans le cadre de Nano Innov, le CEA et l'INERIS interviennent pour la caractérisation des postes de travail (100 postes seront évalués en 2010) et cherchent à qualifier les Meilleures Technologies Disponibles (MTD) mises en œuvre dans les centres de recherches et

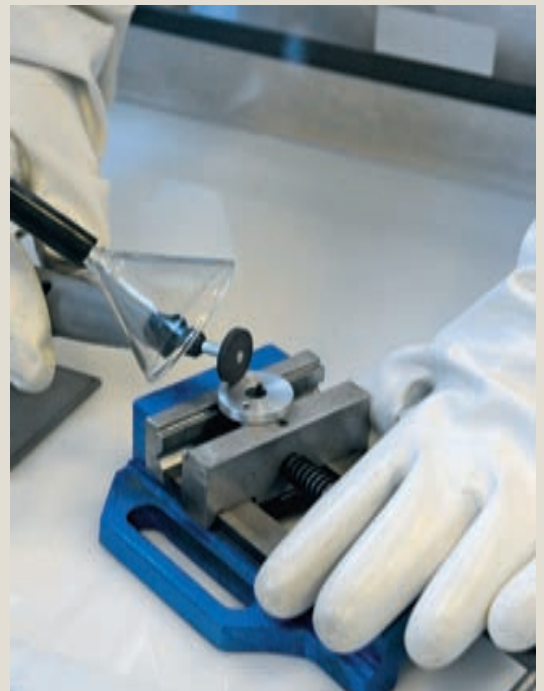
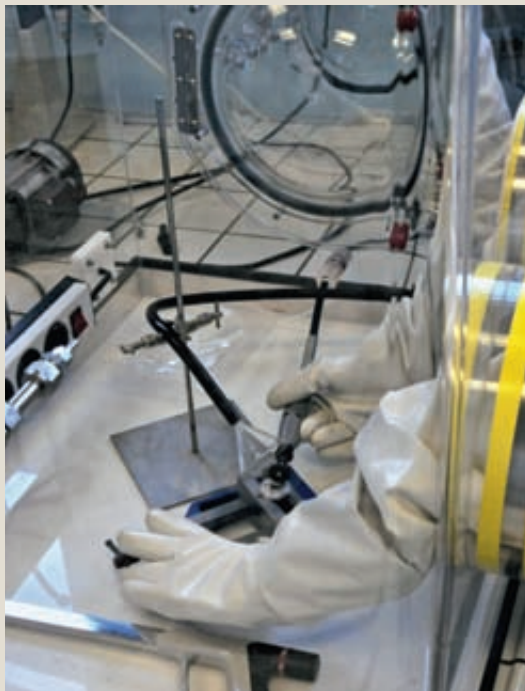
dans les unités de production industrielles. La sécurité ne pouvant être assurée qu'en tenant compte du facteur humain, le référentiel de certification Nano-Cert atteste de la connaissance des risques et des règles de sécurité par tous les acteurs de la chaîne de sécurité (opérateurs, préventeurs, services de secours).

L'absence de seuil d'exposition et les difficultés à mesurer les nanoparticules sur des sites de production a conduit le CEA, l'INRS et l'INERIS à développer une approche globale de la sécurité en réunissant des métrologues, des experts des risques industriels, des experts des risques aux postes de travail.

Ainsi en certifiant les opérateurs et en vérifiant que tous les moyens de prévention et de protection basés sur les MTD sont mis en œuvre, les recherches sur ces domaines nouveaux pourront être engagées dans les meilleures conditions.

De plus le comité de certification qui a approuvé le référentiel Nano-Cert réunit des centres de recherches, des industriels (chimie, électronique), une ONG et l'administration, ce qui a permis de développer des outils pour la recherche en associant les diverses parties prenantes.

D. Charpentier



Expérience de vieillissement accéléré de produits nanomanufacturés.

Étude de la combustion d'un mélange pyrotechnique fuel/comburant



H. Biteau/G. Marlair

DU BESOIN DE CARACTÉRISER LES MATÉRIAUX

Les incendies qui impliquent des matériaux énergétiques, constitués notamment de mélanges de type fuel/comburant solides, diffèrent des incendies de type conventionnel. Afin de prévenir la manifestation de tels scénarios, plusieurs directives (REACH, Seveso...) ont été établies. Elles mettent clairement en évidence que le point critique à maîtriser se concentre dans l'aptitude à comprendre le comportement du matériau énergétique dans des conditions hors de son champ d'utilisation normal. Lorsqu'ils sont soumis à un flux de chaleur suffisamment élevé, une décomposition thermique du composé s'opère. Le comburant libère des éléments oxydants qui diffusent dans le milieu gazeux et sont capables de réagir avec les éléments issus de la dégradation du fuel. Une réaction de combustion peut alors s'établir (figure 1). Le comburant provenant de la composition du matériau est le principal oxydant de la réaction de combustion en lieu et place de l'oxygène de l'air. Par ailleurs, certaines réactions chimiques issues de la décomposition thermique du matériau ou d'une combustion incomplète favorisent la formation de composés toxiques. Une gestion adaptée de la probléma-

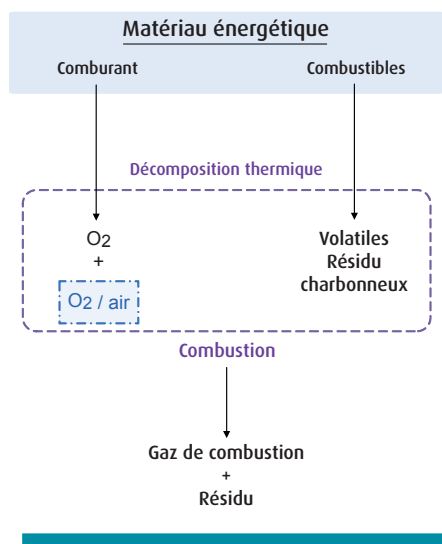
tique incendie liée aux matériaux énergétiques implique une meilleure compréhension des phénomènes chimiques intervenant durant la combustion. Pour ce faire, la définition d'une méthodologie, permettant de caractériser les principales réactions ayant lieu, les émissions de gaz de combustion ainsi que la quantité d'énergie libérée, est indispensable.

CARACTÉRISATION DES RÉGIMES DE COMBUSTION D'UN MÉLANGE PYROTECHNIQUE

Méthodologie

La caractérisation thermique et chimique des matériaux constitue l'un des domaines de base des sciences de l'incendie. Depuis plusieurs années, de nombreux travaux scientifiques combinés à l'élaboration de standards ont permis l'éclosion d'un savoir-faire dans l'étude du comportement d'un matériau soumis à un régime de combustion. La possibilité de s'inspirer d'une telle méthodologie pour les matériaux énergétiques a été considérée dans cette étude. Elle a consisté en deux approches complémentaires. Une analyse thermique permet de suivre l'évolution de la décomposition du matériau au cours du temps, ce dernier étant soumis

FIGURE 1
SCHEMA DE RÉACTION DE COMBUSTION D'UN MATÉRIAU ÉNERGÉTIQUE



à un flux de chaleur croissant. Cette technique aide à définir un schéma général de la dégradation thermique du matériau soumis à un gradient de température suffisamment faible pour permettre son observation. Une fois un schéma de décomposition obtenu, des essais de combustion peuvent être conduits à l'aide d'un calorimètre tel que le cône calorimètre [1] ou le Fire Propagation Apparatus (FPA) également nommé calorimètre de Tewarson [2]. Ces instruments ont été spécialement développés afin d'étudier l'inflammabilité de matériaux. Ils mesurent notamment les concentrations des principaux produits de combustion et permettent une estimation de la quantité de chaleur libérée. L'intérêt d'une telle étude est d'évaluer l'applicabilité de cette méthodologie pour un matériau énergétique représentatif de cette famille de composés chimiques, la vitesse de réaction de combustion étant ici proche du temps de réponse des instruments de mesure.

Étude de poudres fumigènes

Les spécimens tests consistent en des poudres fumigènes basées sur des mélanges ternaires d'amidon ($C_6H_{10}O_5$), de lactose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) et de nitrate de potassium (KNO_3), ce dernier jouant le rôle du comburant. Les mélanges se différencient par une concentration plus ou moins importante en KNO_3 .

combustion incomplète (CO, aldéhydes) et d'oxydes d'azote pour des milieux réactifs dont la concentration d' O_2 est inférieure à la valeur critique.

ESTIMATION DU DÉBIT D'ÉNERGIE LIBÉRÉE

Dans le cadre d'un incendie ou plus généralement d'une réaction de combustion, la vitesse du dégagement de la chaleur (HRR) apparaît comme l'un des paramètres essentiels à déterminer. Différentes méthodes permettent d'accéder à cette donnée. Si la chaleur de combustion du spécimen étudié est connue, alors une mesure de la perte de masse permettra d'obtenir une approximation plus ou moins correcte du HRR. Les deux principes de calcul du HRR les plus répandus reposent sur la mesure de consommation d' O_2 (calorimétrie par consommation d' O_2 , OC) [5] et la mesure de production de CO et CO_2 pour le second (calorimétrie par génération de CO/ CO_2 , CDG) [6]. Il n'est donc pas nécessaire de disposer d'informations relatives au matériau testé pour calculer le HRR. En effet, Thornton [7] et Tewarson [6] ont respectivement montré que, dans le cas de combustion complète, le HRR était proportionnel à la quantité d' O_2 consommée (OC) et à la quantité de CO_2 générée par la réaction (CDG) :

$$\dot{q} \approx \bar{E}_{O_2} \Delta \dot{m}_{O_2} (OC) \quad (1)$$

$$\dot{q} \approx \bar{E}_{CO_2} \Delta \dot{m}_{CO_2} (CDG) \quad (2)$$

Les coefficients de proportionnalité, E_{O_2} (OC) et E_{CO_2} (CDG) demeurent relativement constants pour la plupart des produits qu'ils considèrent et des valeurs respectives de 13,1 kJ/g d' O_2 ($\pm 5\%$) et 13,3 kJ/g de CO_2 ($\pm 11\%$) ont été calculées. Toutefois, un inconvénient lié à l'emploi de ces constantes empiriques réside dans l'impossibilité de quantifier de manière appropriée l'erreur associée au calcul du HRR. Ainsi, la possibilité de pouvoir utiliser ces constantes pour les matériaux énergétiques doit être préalablement vérifiée. Les méthodes de calculs OC, CDG et perte de masse ont été appliquées à des réactions de combustion impliquant les spécimens étudiés. Une comparaison des résultats a mis en évidence des divergences de l'ordre de 100 %. Dans le cas des mélanges testés, des coefficients énergétiques

L'utilisation d'outils de Calorimétrie Différentielle à Balayage (DSC) et de thermogravimétrie (ATD/ATG) couplés à un spectromètre IRTF a permis d'identifier les principaux mécanismes physiques et chimiques de la décomposition des échantillons. Les résultats soulignent que la décomposition du lactose précède, en termes de température, celle de l'amidon. Lorsque la décomposition de l'échantillon s'opère sous air, des réactions exothermiques d'oxydation sont observées à ce stade. Néanmoins, le principal exotherme intervient durant la décomposition du comburant quelle que soit la nature de l'atmosphère réactive (air ou atmosphère inerte d'azote). La concentration en comburant est donc un paramètre critique de l'intensité de la réaction de combustion. L'analyse thermique rend compte de comportements obtenus pour de faibles gradients de température peu représentatifs de conditions d'incendie. Des essais de combustion sont donc nécessaires afin d'approfondir l'analyse. L'utilisation du FPA a été conditionnée à sa capacité à capturer l'évolution de la réaction, ce qui a été vérifié [3]. Le FPA présente plusieurs avantages, dont la possibilité de pouvoir modifier la composition de l'atmosphère réactive. L'influence de la concentration d' O_2 présent dans le milieu réactif sur la combustion des poudres ternaires, a été établie. Les résultats d'expériences indiquent qu'en deçà d'une concentration critique de 17 % d' O_2 dans l'atmosphère réactive, la combustion du matériau n'est entretenue que par le comburant interne KNO_3 [4]. L' O_2 présent dans la composition du milieu réactif ne joue alors plus aucun rôle. Un modèle de propagation de flamme de diffusion a été élaboré et une concentration d' O_2 critique identique à celle de l'expérience a été obtenue. Ce phénomène de transition met en évidence deux types de combustion. Un régime de combustion lente, de type *smouldering*, est entretenu par le comburant KNO_3 présent dans la phase solide. Les gaz produits diffusant dans l'atmosphère réactive. Si le mélange est inflammable ($X_{O_2} > 17\%$), une seconde réaction de combustion en phase gazeuse (flamme de diffusion) s'établit. Enfin, le couplage du FPA avec un spectromètre IRTF montre la production de produits de

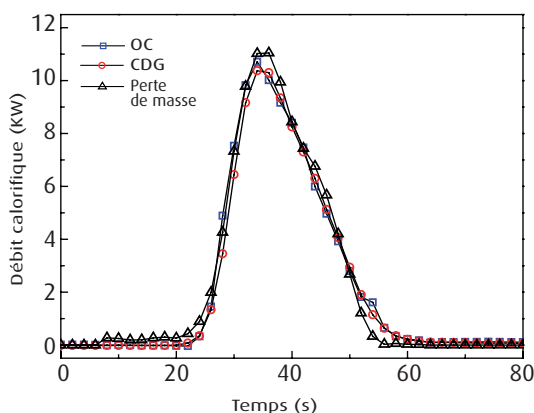


FIGURE 2

DÉBIT CALORIFIQUE DE LA RÉACTION DE COMBUSTION SOUS AIR D'UNE POUDRE TERNAIRE LACTOSE/AMIDON/ KNO_3 (25 %/25 %/50 %) ESTIMÉ AU MOYEN DES PRINCIPES DE CALORIMÉTRIE OC, CDG ET PAR PERTE DE MASSES

E_{O_2} et E_{CO_2} corrigés aux moyens d'un modèle de molécule virtuelle et d'une chaleur de réaction ont été nécessaires pour parvenir à des résultats de HRR à l'incertitude minimale [8] (figure 2). Néanmoins, cette approche suppose une connaissance suffisante de la chimie de combustion du matériau considéré.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La présence du comburant dans la composition même du produit induit un comportement au feu qui diffère des combustibles « conventionnels ». Le nombre croissant d'accidents impliquant des matériaux énergétiques appelle à une meilleure compréhension de leur processus de décomposition et de combustion dans un souci de prévention des risques et de maîtrise du développement durable mieux adaptées. Deux paramètres critiques liés à leur combustion doivent être correctement définis : les émissions toxiques et la quantité de chaleur dégagée. L'étude de la chimie de décomposition du matériau est primordiale. Une combinaison des techniques existantes d'analyse thermique et de calorimétrie

permet d'accéder à la description des principaux schémas de réactions. On met ainsi en évidence l'influence de l' O_2 contenu dans le milieu réactif sur le mode de combustion des mélanges étudiés. Le niveau d'émission de produits de combustion incomplète résulte du mode de combustion prédominant (régime de flammes ou *smouldering*). Néanmoins, il reste encore à estimer l'ensemble des paramètres cinétiques gouvernant les principaux mécanismes réactionnels.

Les principes de calorimétrie par consommation d' O_2 (OC) et calorimétrie par génération de CO/CO_2 (CDG) permettent d'estimer la vitesse de dégagement de la chaleur (HRR) de la combustion de matériaux énergétiques. Cependant, l'utilisation des constantes d'énergie E_{O_2} (OC) et E_{CO_2} (CDG) peut s'avérer inappropriée. Une estimation des coefficients énergétiques est possible mais nécessite une connaissance de la chimie du matériau. Par ailleurs, les deux modes de combustion principaux qui dépendent de la nature du milieu réactif associent des niveaux d'énergie libérés différents. Ces variations doivent être prises en compte dans le calcul du HRR afin de mieux limiter l'incertitude.

ABSTRACT

In the last years, energetic materials have been regularly involved in explosions and fire events. They react very rapidly and release large amounts of energy. Their main peculiarity stems from the oxidiser present in their composition, so they do not require oxygen from the air as their primary reaction partner. The thermal and chemical characterisation of such compounds is fundamental to understand their combustion behaviour and then becomes able to prevent severe hazards. A methodology based on combining a thermal analysis and calorimetry tests carried out using a Fire Propagation Apparatus enabled to determine an overall description of the physical and chemical mechanisms taking place during the combustion of sample energetic materials. The analysis showed that both the concentration in oxidizer and the composition of the reactive atmosphere influence the combustion regime that prevails. Understanding the decomposition and oxidizing processes occurring during the different combustion regimes is critical to predict potential toxic emissions. Another essential parameter for the characterisation of a fire scenario involving energetic materials is the Heat Release Rate (HRR). The use two calorimetric methods, Oxygen Consumption and Carbon Dioxide Generation principles, allowed the calculation of the HRR from the burning of the sample material. Nevertheless, a correction procedure based on the use of a fictitious molecule model and an estimation of the heat of reaction needs to be applied to account for the internal supply originating from the oxidizer.

RÉFÉRENCES

- [1] ISO 5660, Fire Tests – Reaction to Fire – Part 1: Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter), International Standards Organisation, Geneva, 1993.
- [2] ASTM E2058-03, Standard Test Method for Measurement of Synthetic Polymer Material Flammability Using a Fire Propagation Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, 2003.
- [3] Marlair G., Turcotte. R., Qwok Q. S. Branka, R. Toxicity Issues Pertaining to Burning Pyrotechnics, Proceedings of the 33rd International Pyrotechnic Seminar, 16 - 21 July, Fort Collins, USA, 2006, pp. 467-484.
- [4] Biteau H., Fuentes A., Marlair G., Torero J. L. The influence of oxygen concentration on the combustion of a fuel/oxidizer mixture, Experimental Thermal and Fluid Science, 34 (3), pp. 282-289 (2010).
- [5] Parker, W. J. Calculation of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications, NBSIR 81-2427, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD (1982).
- [6] Tewarson, A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, Section 3, Chapter 4, The National Fire Protection Association Press, 2002, pp. 3-82 – 3-161.
- [7] Thornton, W. M. The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds, Philosophical Magazine Series 6, 33, pp. 196-203 (1917).
- [8] Biteau H., Fuentes A., Marlair G., Brohez S., Torero J. L. Ability of the Fire Propagation Apparatus to characterise the heat release rate of energetic materials, Journal of Hazardous Materials, 166, pp. 916-924 (2009).

Phénomènes dangereux



Si les analyses de risques réservent aujourd'hui une juste place à l'estimation de la probabilité d'accident, le calcul des conséquences doit aussi faire l'objet d'un traitement précis étant donné son poids déterminant dans le calcul des zones d'urbanisation.

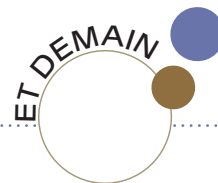
Pour réduire l'incertitude et optimiser les mesures de maîtrise des risques, il faut être capable d'introduire de manière fine les circonstances initiales de l'accident. Par ailleurs, si les conséquences potentielles des scénarios étudiés sont inacceptables, il faut être capable d'imaginer puis de calculer les barrières de sécurité qui conviennent. On doit donc aujourd'hui davantage raisonner en termes d'enchaînement de phénomènes : agression thermique ou mécanique d'un contenant, apparition d'une brèche et d'une fuite, formation d'une atmosphère inflammable (ou toxique), amorçage, explosion et incendie, effets mécaniques et thermiques dans l'environnement, effets dominos associés...

Ces nouvelles approches se reflètent dans l'organisation de l'INERIS comme par exemple le regroupement des compétences dans le pôle « Phénomènes Dangereux et Structures » et dans la manière de travailler au quotidien. Ainsi, dans ce pôle, les activités de recherche et de développement sont coordonnées par axes de recherches dont l'un (le programme EPHEDRA) vise spécifiquement à créer un environnement de simulation permettant l'enchaînement des phénomènes dangereux évoqués

ci-dessus. Les autres « axes », plus traditionnels (prédiction des caractéristiques des fuites et des nuages dangereux, simulation du développement et des conséquences des explosions), ont pour finalité de combler des lacunes identifiées et actuellement difficiles à réduire comme la compréhension et la modélisation des fuites en régimes multiphasiques ou de l'effet d'obstacles sur le déroulement d'une explosion.

Un premier article concerne la prédiction des effets dominos qui sont consécutifs à un premier accident (programme IMFRA). Par exemple, on peut imaginer une citerne contenant du gaz qui, prise dans un incendie, éclate. Des fragments de l'enveloppe peuvent alors percuter un second réservoir, provoquer une brèche et une fuite dangereuse. On a intégré dans le programme IMFRA toutes les composantes de ce risque qui déterminent *in fine* la probabilité d'impact et ses conséquences sur les « cibles » sensibles.

Un second article concerne la prédiction des conséquences des accidents routiers (transports de matières dangereuses) et des actes malveillants en tunnel, et propose une « intégration » des phénomènes dangereux (programme EGSISTES). On y traite de la formation des nuages dangereux, l'incendie, les effets thermiques et toxiques et on poursuit l'analyse jusqu'aux barrières de sécurité en croisant de façon harmonieuse la modélisation mathématique, numérique et la simulation expérimentale.



- Mieux comprendre les phénomènes dangereux en particulier l'explosion en milieu encombré, l'incendie en milieu confiné, les rejets diphasiques et supercritiques.
- Évaluer et mettre à la disposition de la communauté des outils de modélisation permettant de couvrir les principaux phénomènes dangereux.
- Produire et mettre à disposition des données de référence permettant de juger de la pertinence de tout modèle numérique, du plus simple au plus complexe (CFD).
- Éclairer les parties prenantes sur les limites des outils de modélisation et notamment la pertinence de certaines modélisations dans des cas particuliers d'utilisation.

Impacts de fragments et vulnérabilité des installations industrielles



F. Mercier

Un site industriel peut abriter plusieurs réservoirs cylindriques sous pression contenant du gaz ou des liquides. Une surpression, une agression mécanique, thermique ou autre peuvent conduire à l'éclatement d'un de ces réservoirs. Cette explosion peut générer des fragments (figure 4) qui peuvent impacter d'autres équipements, voire pénétrer partiellement ou perforer complètement ces derniers [1]. Un nouvel accident peut alors se produire et générer de nouveaux projectiles, eux-mêmes initiant d'autres accidents. Cet enchaînement catastrophique constitue un effet domino qui peut faire de nombreuses victimes : plus de 650 morts à Mexico en 1984, par exemple. Une méthode globale de traitement

de ce phénomène a été développée. À son stade initial, elle a fait l'objet d'une présentation dans le rapport scientifique 2006-2007 de l'INERIS. Depuis, les différentes étapes de ce modèle stochastique ont été affinées.

ANALYSE DE FIABILITÉ ET PROBABILITÉ DE RUINE

Chaque cycle élémentaire de l'effet domino peut être décrit comme suit (figure 1).

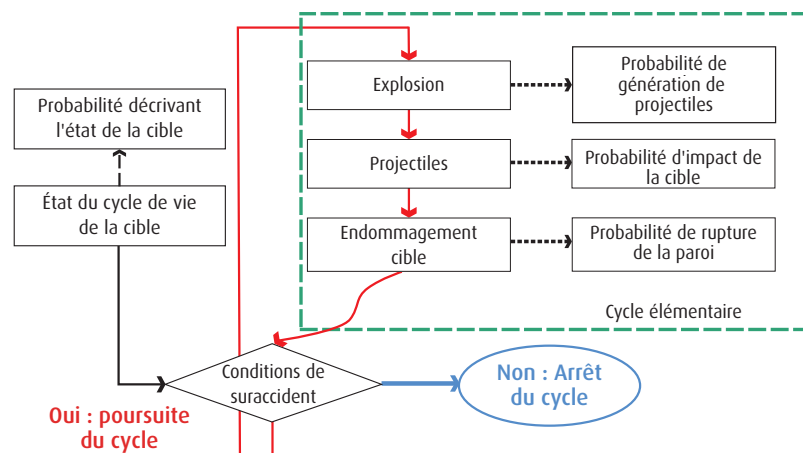
- Génération de projectiles par un accident initial. L'accident initiateur considéré ici est celui de l'explosion d'un réservoir sous pression. À cet événement est associée la probabilité de génération de fragments, P_{gen} .
- Impact d'autres équipements par les projectiles. À cette possibilité d'impact

est associée la probabilité d'impact, P_{imp} .

- Endommagement partiel ou perforation complète des cibles impactées. La nature de l'endommagement est dictée par différents paramètres telles que la taille du (des) projectile(s), de la cible, la masse... La probabilité de rupture de la cible à l'impact, P_{rup} , lui est associée.

La poursuite de l'effet domino est alors déterminée par l'endommagement subi ainsi que par l'état de la cible (réservoir vide ou plein par exemple) au moment de l'impact. Un endommagement de la cible n'induit pas toujours une explosion. Chacune de ces probabilités va maintenant être explicitée. L'impact considéré dans cette étude est celui d'un projectile métallique rigide sur une plaque métallique, mais les modèles développés permettent de traiter d'autres cas, notamment pour des cibles en béton.

FIGURE 1
SÉQUENCES DE L'EFFET DOMINO RÉSULTANT DE L'ÉCLATEMENT D'ENCEINTES SOUS PRESSION



CARACTÉRISATION DE L'AGRESSION

Terme source

Les multiples fragments projetés ont différentes formes, tailles et vitesses initiales ainsi que différents angles initiaux de départ. Il est alors nécessaire de définir convenablement les lois de distribution des termes sources : nombre de fragments, formes et tailles des fragments, leurs masses, leurs angles initiaux de départ (angles horizontal et vertical), leurs vitesses initiales de départ ainsi que leurs coefficients aérodynamiques (coefficients de portance et de traînée).

Nombre et forme de fragments

La formation de fragments lors de l'explosion d'un réservoir dépend de la pression, de la propagation des fissures, ainsi que du matériau constitutif. Le retour d'expérience montre que le changement de phase explosif (BLEVE) de réservoirs cylindriques génère un nombre limité de fragments : généralement deux ou trois, tout au plus quatre ou cinq. La taille des réservoirs n'a pas d'influence sur le nombre de fragments. Pour des réservoirs cylindriques, Hauptmanns [6] estime que le nombre de fragments suit une distribution log-normale. Cependant, dans la présente étude, un traitement des données accidentelles de Holden [8] à l'aide du principe du maximum d'entropie montre que le nombre de fragments suit une distribution exponentielle.

La forme des fragments dépend principalement du type de rupture ainsi que de la propagation de fissures dans la paroi du réservoir. Sur la base d'une analyse de Holden [8], dans la présente étude, les fragments sont supposés constitués de fonds de réservoir dans 23,5 % des cas, de plaques dans 30,5 % et de fonds oblongs de réservoir dans 46 % des cas.

Masse et vitesse initiale du fragment

Suivant les cas, la masse du fragment est obtenue à partir de la masse totale :

- soit en considérant une loi de distribution Bêta [6] ;
- soit à partir de son volume et de sa masse volumique.

La vitesse initiale des fragments est estimée à partir de la masse et des conditions thermodynamiques dans le réservoir avant l'éclatement. En effet, elle se calcule à partir de l'énergie cinétique, elle-même estimée à partir de l'énergie totale disponible avant l'explosion. Ici, l'énergie cinétique est obtenue à partir de l'énergie totale E , à partir des méthodes proposées par Baker et Baum [2], [3].

Angles de départ

Dans le cas d'un réservoir sphérique, le manque de données amène à postuler qu'il n'y a pas d'aire élémentaire préférentielle sur la surface de la sphère pour les angles de départ. Ainsi, pour un réservoir sphérique de rayon R ,

les angles de départ horizontal θ et vertical φ sont tels que la probabilité élémentaire reste constante. Pour les réservoirs cylindriques, cette distribution reste valide pour les seuls angles verticaux de départ (φ) des fragments. La distribution des angles de départ horizontaux (θ) des projectiles est spécifique aux réservoirs cylindriques. Les fragments sont projetés de manière préférentielle suivant dans les secteurs angulaires autour du grand axe [7].

Coefficients de portance et de traînée

La portance résulte de la dissymétrie entre l'extérieur et l'intérieur des fragments. Le coefficient de portance, C_L , s'exprime en fonction de l'angle d'inclinaison α . Le coefficient de traînée dépend de plusieurs paramètres, tel que la géométrie, la rugosité de la surface et l'orientation au regard de la direction de la vitesse. Une distribution uniforme du coefficient de traînée, C_D , peut être considérée sur certains intervalles [6]. Ici, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- pour les fragments de type fond de réservoirs, le coefficient de portance suit une distribution uniforme à l'intérieur de l'intervalle $[0,351 ; 0,468]$ et le coefficient de traînée suit une loi de distribution uniforme à l'intérieur de l'intervalle $[0,8 ; 1,1]$;
- pour la virole, l'effet de portance peut être négligé. Le coefficient de traînée suit une loi de distribution uniforme dans l'intervalle $[1,1 ; 1,8]$.

TRAJECTOIRE DES FRAGMENTS ET CARACTÉRISTIQUES D'IMPACT

La trajectoire des fragments est décrite en employant la trajectoire du barycentre des fragments. La rotation du fragment pendant le vol est négligée.

MODÈLE DE PÉNÉTRATION ET PERFORATION

Le modèle d'impact du fragment sur la plaque (figure 2) a pour paramètres e_t l'épaisseur totale de la plaque, h_p la profondeur de pénétration, d_p le diamètre du fragment, l_p la longueur du fragment, v_p la vitesse du fragment, α l'angle d'inclinaison du fragment et e_{cr} l'épaisseur critique de la plaque.

À l'impact avec la cible, le fragment

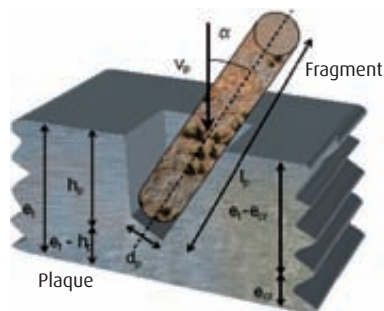


FIGURE 2

PLAQUE MÉTALLIQUE IMPACTÉE PAR UN PROJECTILE CYLINDRIQUE

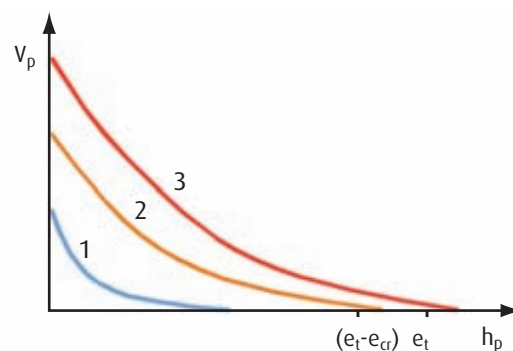


FIGURE 3

RELATION ENTRE VITESSE DU PROJECTILE ET PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION

- 1 : Pénétration partielle en deçà du domaine critique
- 2 : Pénétration partielle dans domaine critique
- 3 : Perforation complète



FIGURE 4

PROJECTIONS PRODUITES PAR L'EXPLOSION D'UNE CITERNE DE GPL (accident de Dagneux, mai 2007)

RÉFÉRENCES

- [1] Nguyen Q. B., Mebarki A., Ami Saada R., Mercier F., Reimeringer M. A. Monte-Carlo method used to study the fragment impact effect on the industrial facilities, Int. J. Simul. Multidisci. Des. Optim. 2 (2) 119-122 (2008), DOI: 10.1051/smdo:2008016.
- [2] Baker Q. A., Baker W. E. (1991). Pros and cons of TNT equivalence for industrial explosion accidents. Proc. of the Int. Conf. and Workshop on Modelling and Mitigating the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, 585-597.
- [3] Baum M. R. (1998). Rocket missiles generated by failure of a high pressure liquid storage vessel. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 11, 11-24.
- [4] Bless S. J., Barber J. P., Bertke R. S., Swift H. F. (1978). Penetration mechanics of yawed rods. Int. J. Eng. Sci., 16 (11), 829-834.
- [5] Bukharev Y. I., Zhukov V. I. (1995). Model of the penetration of a metal barrier by a rod projectile with an angle of attack. Combustion, Explosion and Shock Waves, 31 (3), 104-109.
- [6] Hauptmanns U. (2001-a). A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 14, 395-402.
- [7] Holden P. L., Reeves A. B. (1985). Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels. Inst. of Chem. Engin. Symposium Series, 93, 205-220.
- [8] Holden P. L. (1988). Assessment of Missile Hazards: Review of Incident Experience Relevant to Major Hazard Plant. Safety and Reliability Directorate, Health & Safety Directorate.
- [9] Lepareux M., Jamet P. H., Matheron P. H., Lieutenant J. L., Couilleaux J., Duboelle D., Aguilar J. (1989). Experimental and numerical studies of impacts on stainless steel plates subjected to rigid missiles at low velocity. Nuclear Engineering and Design, 115, 105-112.
- [10] Neilson A. J. (1985). Empirical equations for the perforation of mild steel plates. Int. J. of Impact Engineering 3 (2), 137-142.
- [11] Mebarki A., Mercier F., Nguyen Q. B., Ami Saada R. Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part I: Probabilistic description of the source terms, J. of Loss Prevention in the Process Ind., Volume 22, Issue 4, July 2009, Pages 408-416, ISSN 0950-4230, DOI: 10.1016/j.jlp.2009.02.006.
- [12] Mebarki A., Nguyen Q. B., Mercier F. Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II - Projectile trajectory and probability of impact, J. of Loss Prevention in the Process Ind., Volume 22, Issue 4, July 2009, Pages 417-425, ISSN 0950-4230, DOI: 10.1016/j.jlp.2009.02.005.

peut créer un cratère, réduisant ainsi l'épaisseur résiduelle de la cible dans la zone impactée. Trois scénarios principaux peuvent être distingués :

- *pénétration partielle dans le domaine critique* : l'épaisseur résiduelle de la plaque dans la zone d'impact reste inférieure à l'épaisseur critique, e_{cr} (figure 3, courbe 2) ;
- *pénétration partielle au-delà du domaine critique* : l'épaisseur résiduelle de la plaque a des valeurs situées dans l'intervalle $[0, e_{cr}]$ (figure 3, courbe 1). Dans le cas de systèmes sous pression (réservoirs, réacteurs...), cet affaiblissement peut être suffisant pour que la cible cède sous l'effet de sa pression de service ;
- *perforation complète* (figure 3, courbe 3). Ces deux derniers cas sont ceux le plus souvent rencontrés lors d'accidents industriels. À cet effet, des modèles mécaniques ont été développés en vue de calculer la profondeur de pénétration et pouvoir ainsi la comparer à l'épaisseur critique à partir de données expérimentales disponibles dans la littérature existante [4], [5], [9], [10]. Le modèle mécanique actuel permet de calculer la profondeur de pénétration pour diverses vitesses de projectiles

calées sur les résultats de Bless [4], Neilson [10]. Un modèle mécanique simplifié proposé permet d'estimer la profondeur de pénétration (h_p), dans le cas où la cible et le projectile sont métalliques.

La profondeur de pénétration dépend de l'angle d'incidence du projectile à l'impact, de son énergie cinétique, ainsi que des contraintes et déformations ultimes des matériaux constitutifs.

Nexter, partenaire de l'INERIS sur ce programme, a développé d'autres modèles, soit sur la base d'études numériques, soit au travers d'expériences.

RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Le modèle stochastique développé permet, en tablant sur un éclatement initial, de :

- qualifier les probabilités d'atteinte de cibles, par exemple en produisant des distributions de probabilités en fonction de la distance et du secteur angulaire ;
- qualifier leur endommagement à l'impact. Les perspectives de développement du modèle stochastique passent par l'intégration de l'état de la cible au moment de l'impact et par l'élargissement des modèles d'impact aux structures non métalliques.

ABSTRACT

The explosion of industrial facilities such as pressure vessels or reactors can produce many fragments. These fragments can originate a so-called domino effect if they impact other storage tanks or pressurized enclosures, which, in turn, can burst. This paper depicts the stochastic approach of an elementary cycle of the phenomenon. It has been implemented since 2005. It is based on the principle of entropy maximum. To do so, the main features of the projectiles (number, shape, mass, departure velocity and departure angles) have been developed with probability density functions (p.d.f.). These p.d.f. are the data injected in a further step of the study in order to appreciate the industrial risk. Then the trajectories of the fragments and their impact with targets have been modeled on the base of geometric relationships. The impact probabilities are estimated from the results of a Monte-Carlo simulation. In addition, interaction models between the projectiles and the target have been implemented, partly from the existing literature and to a certain extent from experiments driven by NEXTER, a partner in the project. These models are used to estimate the damage produced by the fragment on the target. Crossed with the life cycle state of the target (e.g. full or empty for a storage tank), the result can help to predict the continuation of the domino effect cycle.

EGSISTES : Évaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque des Systèmes de Transport En Souterrain



B. Truchot

Le projet EGSISTES (Évaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque aux Systèmes de Transports En Souterrain) avait pour objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans les scénarios de menace intentionnelle ou accidentelle. Les recherches réalisées pendant les trois ans du projet, tant sur le plan numérique qu'expérimental, ont permis d'obtenir une meilleure description de la physique des phénomènes dangereux et d'évaluer les modèles disponibles pour en prédire les conséquences. Ce document présente une partie des résultats obtenus. Une analyse des risques globaux pour les infrastructures souterraines de transport a fait ressortir trois phénomènes dangereux : l'explosion, l'incendie et la dispersion de gaz toxiques.

Ces trois phénomènes ont été étudiés expérimentalement et numériquement au cours du projet. Ce document traite des aspects expérimentaux et numériques des phénomènes d'incendie et de dispersion de gaz toxiques. Les phénomènes d'explosion, dont l'aspect expérimental a été étudié par l'INERIS, ne sont pas discutés ici.

INCENDIE EN TUNNEL : COMPORTEMENT DE LA NAPPE AVAL

En cas d'incendie, la réglementation actuelle [2] prescrit une ventilation longitudinale réduite, vitesse de ventilation de l'ordre de 1 à 2 m/s, pour des situations de tunnels congestionnés. Cette stratégie a pour but de maintenir une « certaine stratification des fumées à l'aval du foyer » pendant l'évacuation des personnes. L'objet de la campagne expérimentale était d'évaluer la présence et la stabilité de la stratification à l'aval du foyer et de comprendre l'impact de la présence de véhicules sur cette stratification. La galerie incendie de l'INERIS a été utilisée pour cette campagne expérimentale. L'installation a été décrite en détail dans [1] et [4]. Pour mémoire, il s'agit d'un tunnel à échelle 1/3 d'une section de 5,4 m², pour une longueur de 50 m. Pour étudier le comportement de la nappe aval et l'impact de véhicules sur la stratification, le foyer d'incendie était placé à 10 m de l'entrée de la galerie, soit une longueur d'étude de 40 m en aval.

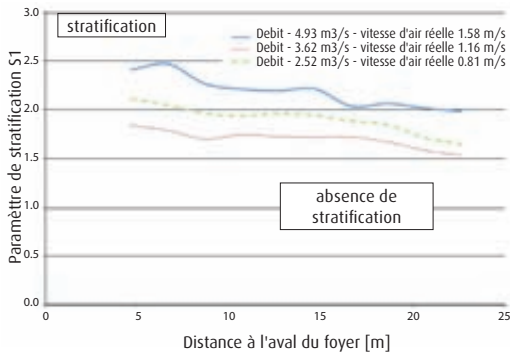
Caractérisation de la nappe aval

Afin d'étudier l'impact de la ventilation sur la stratification des fumées à l'aval du foyer, deux puissances d'incendie et trois débits de ventilation ont été étudiés. L'objet de cet article est d'évoquer les conclusions qui se dégagent de ces essais. La stratification d'une nappe de fumées peut être évaluée à l'aide du critère de stratification S1 (rapport entre la différence de température entre le plafond et le sol et l'augmentation de température moyenne) défini par Newman [5]. Ses travaux montrent que S1 est inférieur à 1,9 en cas de perte de la stratification. Pour la nappe aval, il est possible de définir deux régions en fonctions de la stratification [6] : une première région stratifiée, proche du foyer, une deuxième région plus lointaine non stratifiée. La limite entre ces deux régions varie en fonction des conditions de l'incendie et de la ventilation entre deux situations extrêmes d'absence complète de stratification ou au contraire de stratification sur la totalité du tunnel.

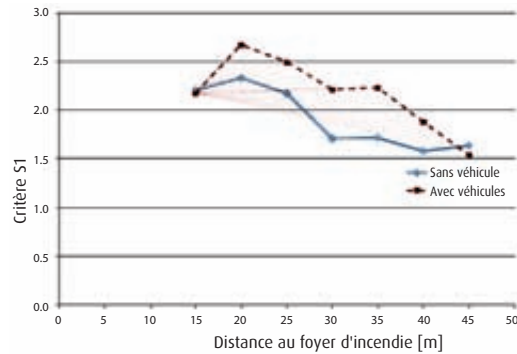
Afin d'évaluer la stratification à l'aval du foyer en cas d'incendie de véhicule dans un tunnel, l'évolution longitudinale du critère de stratification S1 est représenté sur la figure 1 pour un foyer de 350 kW et les trois débits de ventilation utilisés. Ainsi, ces essais montrent une faible stratification à l'aval du foyer dans une configuration de ventilation correspondant à celle rencontrée en tunnel congestionné, et ce d'autant plus que

FIGURE 1

ÉVOLUTION LONGITUDINALE DU CRITÈRE DE STRATIFICATION S1

**FIGURE 2**

ÉLÉMENTS SIMULANT LA PRÉSENCE DE VÉHICULES À ÉCHELLE 1/3 UTILISÉS POUR LES ESSAIS



l'on s'éloigne du foyer.

Outre l'aspect thermique montrant la perte de stratification, les images vidéo enregistrées durant les essais montrent la perte totale de la stratification visuelle. Cette dernière n'a aucun effet direct sur la sécurité des usagers mais pénalise leur évacuation.

Ainsi, les conditions d'évacuation à l'aval du foyer sont rapidement dégradées, représentant à l'échelle, la situation dans un tunnel en ventilation longitudinale. Cette dégradation est notable à la fois par la perte de visibilité qui en résulte, mais aussi par une dégradation certaine des conditions de tenabilité (conditions thermiques et toxiques compatibles avec la présence de personnes) à l'aval du foyer. Ces deux aspects cumulés impliquent une mise en sécurité délicate des usagers dans une telle situation et souligne l'importance, dans l'évaluation de la stratification, de ses différentes caractéristiques : thermique, toxique mais aussi visuelle.

Impact de véhicules sur la nape aval

La stratégie de ventilation prescrite par l'instruction technique [2] et décrite précédemment est applicable pour des tunnels congestionnés. Aussi, dans une telle situation, des véhicules seront présents à l'aval du foyer et leur impact sur la stratification des fumées doit donc être évalué. À cette fin, des éléments simulant la présence de véhicules, voitures et poids lourds, à échelle 1/3 ont été introduits dans la galerie incendie. La figure 2 montre l'évolution comparative du critère S1. Cette courbe a été obtenue à partir des résultats

de simulation FDS (Fire Dynamics Simulator), code de calcul 3D spécifique à la modélisation des incendies.

Les résultats montrent l'impact de véhicules sur la stratification des fumées. La perte de stratification observée sans les véhicules est moins nette en présence de véhicules, à proximité du foyer. Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus par [7] et confirmée par les simulations numériques réalisées dans le cadre de ce projet, figure 3. Toutefois, il est important de rappeler que ce résultat n'est valable qu'à proximité du foyer et, qu'au-delà d'une certaine distance, l'effet s'inverse, comme indiqué sur cette courbe en accord avec [7]. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que ces résultats dépendent de la distribution des véhicules à l'aval du foyer.

DISPERSION DE GAZ DENSES EN TUNNEL

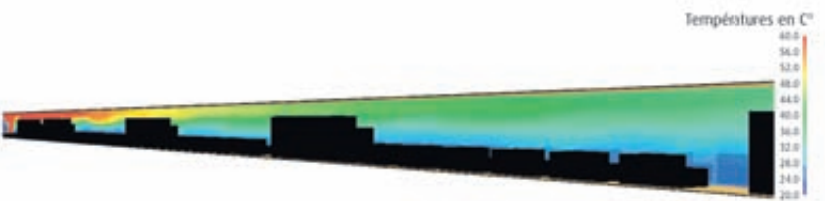
Une fuite de gaz toxique en tunnel peut engendrer des conséquences dramatiques mais elle n'est que très partiellement traitée dans les études spécifiques de

dangers. L'objet de cette campagne expérimentale était d'évaluer la capacité d'une ventilation incendie pour traiter un rejet accidentel de gaz toxique.

Étude expérimentale

Si les conséquences d'un rejet massif comme ceux définis par le modèle EQR (Évaluation Quantitative des Risques) [13] seraient critiques et difficilement gérables, il convient toutefois de s'interroger sur l'utilisation possible du système de ventilation dans des situations de rejet de gaz toxiques.

Ainsi, dans le but de caractériser le développement du nuage, des essais ont été réalisés dans la galerie incendie de l'INERIS, galerie représentant un tunnel à échelle 1/3. Le gaz utilisé pour les essais est l'argon, un gaz neutre intrinsèquement plus lourd que l'air, le rapport de densité entre l'argon et l'air atteignant 1,4. L'objectif de ces essais est à la fois de mieux comprendre le comportement d'un nuage de gaz dense en présence de ventilation longitudinale ou transversale mais aussi

**FIGURE 3**

VUE EN PERSPECTIVE DE LA GALERIE INCENDIE.

Simulation numérique du comportement des fumées en tunnel en cas de congestion. Les carrés figurent des véhicules et camions, les couleurs les champs de température.

de valider les outils de calcul existant afin de permettre une extension de la réflexion à des géométries réelles et à d'autres typologies de gaz.

La configuration dite de référence présentée ici est un jet vertical d'argon, avec un débit de 1 m³/min avec une vitesse du courant d'air longitudinal d'environ 0,5 m/s. La nappe de gaz reste alors stratifiée depuis le point de rejet jusqu'à la sortie du tunnel, comme le montre l'image issue des essais (figure 4 A). Après comparaison des résultats numériques aux valeurs expérimentales (figure 4 B), ces outils de simulation ont pu être appliqués à des situations réelles.

Cette comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques montre un bon accord, le code de calcul utilisé, FDS, permet ainsi de reproduire la nappe stratifiée et de la quantifier au travers des valeurs de concentration obtenues et de la hauteur de l'interface.

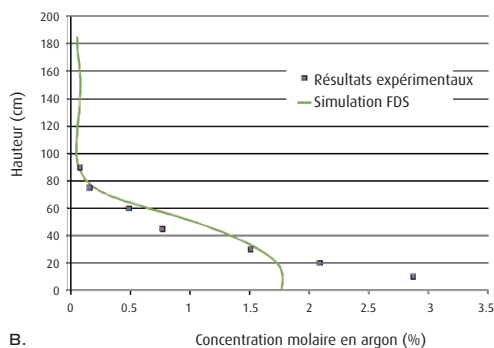
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les objectifs du projet EGSISTES étaient, outre une analyse du risque global dans les infrastructures de transport en souterrain, l'amélioration des connaissances pour les différents phénomènes physiques associés (incendie, explosion, dispersion d'un gaz toxique) et l'évaluation des outils de simulation ou, le cas échéant, le développement de nouveaux modèles. Cet article présente une partie des résultats pour les aspects relatifs à l'incendie et la dispersion de gaz

FIGURE 4

A. VISUALISATION DE LA NAPPE STRATIFIÉE

B. COMPARAISON ENTRE RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET SIMULATION NUMÉRIQUE



toxiques. Une campagne expérimentale réalisée pour étudier le comportement des nappes de fumée en cas d'incendie en tunnel a permis d'étudier l'impact de perturbations à la fois sur la nappe aval et la nappe amont. Ces expériences ont par ailleurs servi de base de validation aux codes FDS et Phoenix [3]. Enfin, les rejets de gaz denses ont pu être étudiés expérimentalement afin de déterminer le comportement d'un nuage de gaz dans une configuration de type tunnel. Cette campagne expérimentale a mis en avant la fragilité de la stratification de telles nappes de gaz. La comparaison de ces résultats avec les simulations numériques a permis de valider les codes de calcul et d'étendre ensuite numériquement la portée de cette étude.

RÉFÉRENCES

- [1] Truchot B., Heudier L., Proust C., William-Louis M., Benselama A., Fournier L., Armand P., Boucard A. EGSISTES – Évaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque des Systèmes de Transport En Souterrain. WISG 2009, Troyes.
- [2] Annexe 2 de la circulaire interministérielle 2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national.
- [3] Truchot B., Boehm M. et Waymel F. Numerical analysis of smoke layer stability. Congrès BHRG New York 2009.
- [4] Boehm M., Fournier L., Truchot B. Smoke stratification stability: Presentation of experiments. Congrès Gratz 2008.
- [5] Newman J., Tewarson A. Flame propagation in Ducts, Combustion and Flame 51:347 (1983).
- [6] Newman J. Experimental evaluation of Fire-Induced stratification, Combustion and Flame 57:33 (1984).
- [7] Waymel F., Fournier L., RUFFIN E. Étude numérique de l'influence des véhicules sur la déstratification des fumées d'un incendie en tunnel, Congrès AFTES – Octobre 2005.
- [8] Lee E., Finger M., Collins W., JWL equation of state coefficients for high explosives, Lawrence Livermore Lab., 1973, UCID-16189.
- [9] Catlin C. *et al.* Explosion hazards assessment: a study of the feasibility and benefits of extending current HSE methodology to take account of blast sheltering, Health and Safety Lab., Sheffield, HSL-2001-04.
- [10] Peyret R., Taylor T. D. Computational methods for fluid dynamics, Springer-Verlag, New-York 1983.
- [11] Rigas F., Sklavounos S. Experimentally validated 3-D simulation of shock waves generated by dense explosives in confined complex geometries Journal of Hazardous Materials, A121, pp. 23-30 (2005).
- [12] Sklavounos S., Rigas F. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, vol. 17, pp. 407-417, 2004.
- [13] Guide des dossiers de sécurité des tunnels routiers. Fascicule 3 : Les analyses des risques liés au transport des marchandises dangereuses, décembre 2005.

ABSTRACT

The objective of the EGSISTES (Global Evaluation of Intrinsic Security of Underground Transport Systems) project was the study of phenomena linked with global risk in underground transport infrastructures. The different kinds of dangerous phenomena linked with both accidental and intentional threat were identified during this project. Three families of phenomena have been enlightened: dispersion of R, B or C substances, explosion and fire. The study of those phenomena was achieved using both experimental and numerical approach. This paper is focused on fire and toxic product dispersion. The first part concerns the downstream smoke layer in confined configuration. In such a case, experiments show the quick degradation of tenability condition. Concerning toxic gases, both numerical and numerical approach show the difficulty in managing such a release to ensure safe conditions for users.

Prévention des risques du sol et du sous-sol



Les vingt premières années de l'INERIS ont vu une profonde évolution du champ d'activité en lien avec la prévention des risques du sol et du sous-sol. Lors de la création de l'Institut, les priorités de recherche étaient tournées vers l'amélioration de la sécurité dans les mines de charbon notamment pour la prévention des coups de terrains – phénomènes dynamiques en mines profondes – et la maîtrise des atmosphères dans les chantiers – limiter ou gérer les émissions de gaz dangereux.

Avec la décroissance rapide des activités minières françaises et la survenue des incidents liés à la fermeture et l'ennoyage des mines à la fin des années 1990, les développements se sont tournés vers la gestion de l'après-mine. Outre la mise en œuvre d'études approfondies consacrées à l'impact de l'ennoyage sur les anciens travaux miniers, d'importants efforts ont été déployés pour adapter la technique d'écoute microsismique à la détection des signes précurseurs d'effondrement ou d'affaissement brutal de la surface du sol à l'endroit d'anciennes exploitations souterraines. Parallèlement, l'Institut s'est progressivement ouvert à d'autres problématiques mobilisant les compétences acquises telles que la maîtrise des risques naturels de mouvements de terrain (carrières, vides de dissolution, falaises, versants, phénomène de retrait-gonflement des argiles) et la maîtrise de la sécurité des stockages en milieu géologique.

Désormais, les activités scientifiques se partagent entre une poursuite des recherches menées sur des thèmes « historiques » et le développement de nouvelles thématiques en lien avec les priorités croissantes de la société en termes de développement durable.

Ainsi, parmi les axes de recherche pour les années à venir, l'un a pour ambition de progresser dans la compréhension du comportement des massifs rocheux et la prévision du déclenchement d'éventuelles instabilités géologiques. Il s'intéresse en particulier à la caractérisation et la modélisation des effets de l'eau et du temps sur la stabilité des ouvrages rocheux ainsi qu'au développement d'outils de prédiction des ruptures, à travers notamment le développement de techniques de surveillance mettant à profit les technologies récentes en matière de transfert, de traitement et d'interprétation des signaux.

Un deuxième axe de recherche est bâti dans une optique de transfert des connaissances acquises vers des thématiques émergentes. Il porte sur l'évaluation des risques à long terme liés aux stockages souterrains notamment pour la filière CSC (captage, transport et stockage de CO₂). Les travaux ont pour vocation de développer des méthodes d'analyse de risque et d'identification de scénarios de défaillance portant sur l'ensemble de la chaîne intégrée. Ils mettent à profit les autres compétences de l'Institut : les risques accidentels pour le captage et le transport et les risques chroniques pour l'impact environnemental et sanitaire des substances injectées au sein d'aquifères profonds.

Enfin, un troisième axe porte sur le développement de compétences en termes d'évaluation de la vulnérabilité des biens à différents types d'aléas, en consacrant notamment une part importante à l'analyse du phénomène d'interaction sol-structure, crucial dans la compréhension des effets du retrait-gonflement des argiles, phénomène rendu particulièrement sensible dans une perspective de changement climatique.

ET DEMAIN

- Développer des méthodes non destructives performantes pour détecter et caractériser l'état des cavités souterraines.
- Mieux prendre en compte les effets de fluides (eau, gaz) et du temps sur la stabilité des ouvrages souterrains et des massifs rocheux.
- Caractériser l'évolution spatiale et temporelle de cavités créées par dissolution, pour mieux évaluer les risques de mouvements de terrain.
- Améliorer les outils de détection et l'analyse des signes précurseurs de mouvements de terrain de manière à assurer une surveillance optimale des sites à risque.
- Développer une méthode de référence d'analyse intégrée des risques relatifs aux stockages souterrains pour la filière « capture, transport et stockage souterrain du CO₂ ».
- Développer des outils de modélisation numérique prédictifs des phénomènes thermo-hydro-mécaniques et géochimiques et de leur interaction avec les ouvrages.
- Développer des méthodes de caractérisation en laboratoire et *in situ* d'interactions roches-fluides.

L'incertitude des analyses de risques de mouvements de terrain



R. Salmon

Effondrements, glissements de terrain, chutes de blocs... Face aux conséquences dramatiques que peuvent avoir certains mouvements de terrain engendrés par les objets rocheux, la gestion des risques est devenue une demande forte des populations concernées et constitue l'une des priorités de travail des pouvoirs publics.

La gestion des risques s'appuie d'abord sur leur identification et leur évaluation : prévoir la nature des phénomènes susceptibles de se réaliser, anticiper les dangers auxquels les populations et les infrastructures peuvent être exposées, évaluer l'échéance de la réalisation des scénarios de risques. Telles sont les questions auxquelles l'expert doit

apporter des éléments de réponse. Il s'agit donc pour l'expert de formuler des avis sur le futur, le probable, afin que le décideur établisse des choix dans le présent.

L'expertise a pour objet d'établir un diagnostic d'une situation donnée afin d'identifier ses évolutions futures. La notion d'incertitude apparaît donc sur deux plans : la capacité d'établir un diagnostic précis d'une situation donnée ; et la capacité d'établir des scénarios d'évolution pertinents.

Les cavités souterraines (naturelles ou anthropiques) et les fronts rocheux à l'origine d'éventuels mouvements de terrain sont des milieux caractérisés par une grande variabilité. Par conséquent, les connaissances disponibles sur la source potentielle de danger sont limitées.

Dans le cadre d'un travail de thèse mené à l'INERIS par Maxime Cauvin, en partenariat avec le LAEGO [1], une analyse systémique des incertitudes propres aux analyses du risque de mouvement de terrain a été réalisée. Elle a permis de proposer des outils là où les carences techniques les plus fortes ont été identifiées.

TYPOLOGIE DES INCERTITUDES

Puisque le concept d'incertitude est complexe au sens où il intègre des notions très différentes, il apparaît nécessaire d'en réaliser une typologie intégrant les spécificités liées aux mouvements de terrain.

Incertitude de diagnostic

Le premier type d'incertitude concerne les données nécessaires à l'établissement d'un diagnostic de la situation actuelle.

- La disponibilité de la donnée : probablement l'une des spécificités de l'évaluation des risques « mouvements de terrain ». Il n'est pas toujours possible de disposer de l'information relative à l'existence même d'une source de danger – une cavité souterraine – en un endroit donné. L'ancienneté de certains travaux souterrains a pu entraîner la perte de tout plan d'exploitation. On s'appuie donc sur l'existence d'indices (présence d'une couche géologique propice à l'exploitation, mouvements de terrains passés...).

- La valeur, précision et fiabilité de la donnée. S'agissant des données disponibles, les problématiques classiques de l'incertitude de la donnée s'appliquent (variabilité naturelle, spatiale et temporelle, manque de connaissance, biais de la mesure lors de la caractérisation...) (figure 1).

Incertitude d'expertise

L'incertitude d'expertise découle des choix que l'expert réalise au cours de son processus d'analyse.

- L'identification et la compréhension des phénomènes étudiés : problèmes liés à l'interprétation et l'analyse des événements passés, aux connaissances propres de l'expert, à sa capacité à se représenter le problème étudié.

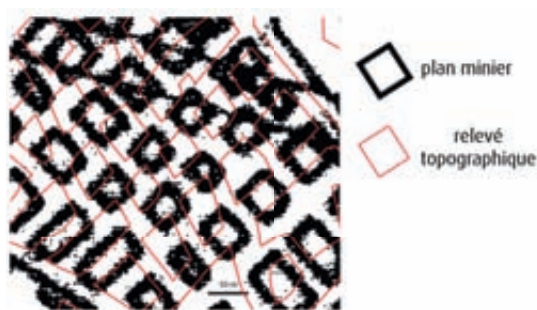


FIGURE 1
EXEMPLE D'INCERTITUDE SUR LA DONNÉE :
COMPARAISON ENTRE PLAN MINIER GÉORÉFÉRENCÉ ET
RELEVÉ TOPOGRAPHIQUE RÉEL (DONNÉES GEODERIS)

- Le choix de la méthode d'analyse : choix des scénarios, de la méthodologie de résolution, des outils et modèles adaptés.

Incertitude de modèle

De la phase d'expertise découle le choix de modèles mathématiques ou numériques permettant d'évaluer, d'estimer ou de caractériser le risque. L'utilisation de tels outils ne permet néanmoins que d'approcher la réalité et induit une certaine indétermination du résultat de l'analyse. Plus concrètement, l'incertitude de modèle concerne :

- leur représentativité, c'est-à-dire le problème de la simplification de la réalité ;
- leur fiabilité, c'est-à-dire les « biais » qui résultent du modèle lui-même : problèmes de calibrage, problèmes liés à l'utilisation d'outils numériques, etc. ;
- la problématique de la propagation des incertitudes dans les modèles.

DE NOUVEAUX OUTILS

S'appuyant sur la typologie établie et l'audit d'études d'analyses de risque de « mouvements de terrain », nous avons observé un certain nombre de carences : le manque d'outils permettant de préciser l'incertitude sur les données manquantes ; l'absence d'outils autorisant une hiérarchisation des sources d'incertitude.

L'indice de confiance

Lorsque l'acquisition des données ou la recherche des travaux souterrains (par la réalisation de sondages, d'investigations sur site, de relevés topographiques...) ne peuvent pas être réalisées pour des raisons financières ou humaines, la stratégie mise en œuvre revient à adopter une approche qualitative. Ainsi, le problème de l'existence de travaux souterrains est particulièrement délicat à traiter pour l'expert. Plutôt que d'adopter la stratégie qui consiste à faire comme si les travaux existaient réellement – et ainsi à se placer dans le pire des cas – une marge de sécurité qualitative est indirectement utilisée.

La confiance que peut avoir un expert vis-à-vis de l'existence réelle d'une source de danger est dépendante de la source d'information qui lui a permis d'identifier celle-ci. La qualité de l'information influencera directement le

Plan à disposition	Exploitation partielle	Chambres et piliers		5	
		Vides de petites dimensions (galeries isolées, exploitation filonienne)		5	
	Exploitation totale	Bien foudroyée (cf. méthode d'exploitation)		1	
		Mal foudroyée (cf. qualité du plan, méthode d'exploitation)		3	
	Type d'exploitation inconnu	Exploitation voisine contemporaine	Exploitation totale		3
			Exploitation partielle		4
		Archives	Informations disponibles	Exploitation totale	3
Exploitation partielle				5	
Pas d'information disponible		3			
Pas de plan à disposition	Géologie favorable + présence visible d'indices miniers (ancien effondrement, ouvrage)			4	
	Géologie favorable + présence mentionnée dans les archives d'indices miniers (ancien effondrement, ouvrage)			3	
	Géologie favorable OU ancien effondrement en surface OU présence mentionnée dans les archives de travaux miniers			2	
	Doute sur la nature du désordre visible OU fiabilité faible de l'information géologique			1	

FIGURE 2
EXEMPLE DE GRILLE DE VALEURS POUR L'INDICE D'EXISTENCE DES VIDES SOUTERRAINS DE PETITES DIMENSIONS

niveau de confiance qu'il aura. Chaque type d'information est donc caractérisé par un niveau de confiance, un « indice d'existence », caractérisant la probabilité qu'une source de danger existe réellement sur un site donné, compte tenu de l'information qui a permis de l'identifier. Plus l'indice d'existence est grand, plus l'information est fiable et plus grande sera la crédibilité de la présence d'un ouvrage pouvant générer un accident.

Les travaux réalisés se sont inspirés du domaine de la prévision météorologique avec l'« indice de confiance » développé par Météo France. L'échelle utilisée, allant de 1 (indice le plus bas) à 5 (indice le plus haut) permet une communication facile qui apparaît relativement compréhensible par le public. Cette même échelle a été conservée pour l'indice d'existence que nous proposons. Son sens réel doit néanmoins être précisé (figure 2). Obtenir un indice d'existence de 5 ne signifie pas automatiquement qu'un aléa existe. Cela signifie uniquement que l'expert considère comme le plus crédible la possibilité de présence d'un ouvrage souterrain. Il lui faudra ensuite évaluer la possibilité que ce vide génère ou non

des effets en surface. Cette approche a permis de mieux caractériser la notion de « prédisposition » (probabilité d'occurrence) dans le cadre de la réalisation des études d'aléa des Plans de Prévention des Risques Miniers.

Poids des incertitudes : priorité aux données d'entrée ou au choix du modèle ?

Les outils permettant d'évaluer le poids de l'incertitude liée aux données d'entrée sur les résultats sont nombreux (études de sensibilité, simulations de Monte-Carlo...). En revanche, peu d'approches permettent d'évaluer le poids de l'incertitude liée au choix du modèle ni de comparer ces deux types d'incertitude.

Nous avons développé une démarche permettant de prendre en compte, non seulement l'incertitude liée aux données d'entrée, mais également l'incertitude liée au choix du modèle. Le principe de notre démarche consiste à intégrer l'ensemble des modèles dans l'analyse. L'étude se retrouve ainsi exemptée du problème du choix du modèle unique et des préférences ou de la subjectivité propres à l'expert. Puisque chaque modèle « approche »

la réalité d'une manière différente, l'intégration au sein de la même analyse de plusieurs modèles peut permettre de tendre plus justement vers la réalité. De manière à réaliser une telle intégration, les modèles sont choisis de manière aléatoire dans le processus d'estimation du risque.

Après traitement analytique, la démarche présente clairement les parts respectives de l'incertitude liée aux données d'entrée, aux paramètres de modèle et au choix du modèle et permet d'identifier les sources principales d'incertitudes sur le résultat.

Dans un contexte où les moyens de diminution de l'incertitude sont souvent limités, cette démarche accompagne l'expert afin de choisir la stratégie pour préciser le résultat de son analyse de la manière la plus efficace. La démarche permet d'identifier la nature des investigations à mettre en œuvre en priorité, ou encore de préciser si les moyens doivent être déployés préférentiellement sur l'investigation de terrain ou sur les développements numériques.

PERSPECTIVES

D'autres perspectives peuvent être envisagées. La nécessité de la prise en compte de la composante temporelle de l'aléa a été abordée par exemple, mais les premiers modèles proposés souffrent d'un retour d'expérience insuffisant afin d'en améliorer la robustesse. Par ailleurs, les travaux développés se sont surtout concentrés sur le concept de l'aléa et pas sur la notion de risque. Une approche similaire relative à la

caractérisation de la vulnérabilité et des enjeux permettrait de progresser vers une approche intégrée de l'évaluation du risque « mouvement de terrain ».

EXEMPLE : APPLICATION À L'ÉVALUATION DE LA PROBABILITÉ DE RUINE D'UN PILIER DE MINE

Plusieurs modèles (formules analytiques) permettent d'évaluer la possibilité de ruine d'un pilier de mine. L'application de la démarche montre que 57 % de l'incertitude sur le résultat est portée par la variabilité et la mauvaise connaissance des données d'entrée du problème et 43 % est expliquée par la dispersion des modèles qui ne permettent que d'approcher la réalité. La source principale d'indétermination dans ce problème est liée à la mauvaise connaissance des dimensions géométriques des piliers de mine (responsable de plus du tiers de la variance totale).

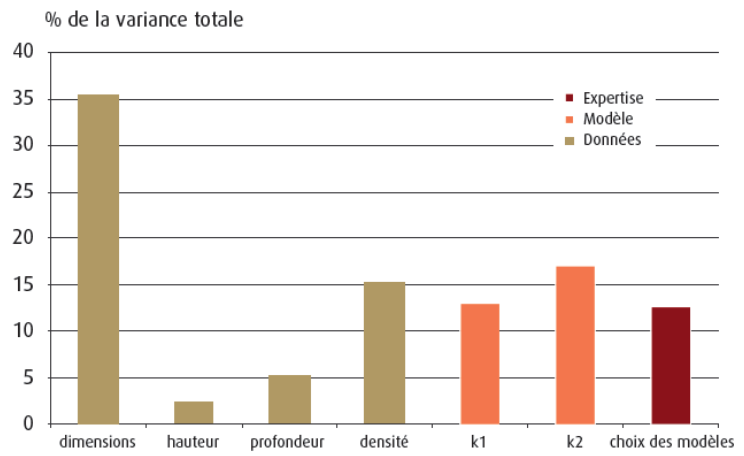


FIGURE 3
CONTRIBUTION DES DIFFÉRENTES SOURCES D'INCERTITUDE À L'INDÉTERMINATION

ABSTRACT

Ground movements induced by underground cavities or rock slopes may lead to tragic consequences. Risk management has become a strong demand from concerned population and is one of the priorities of public authorities. Risk management is primarily based on the identification and assessment of hazard: predicting the nature of the phenomena likely to occur, anticipating hazards likely to affect people and infrastructures can be exposed, scheduling the implementation of risk scenarios.

Based on a thesis completed in INERIS by Maxime Cauvin, in partnership with LAEGO ("Taking into account uncertainties and probability calculations in ground and underground risk studies", December 20, 2007), a systemic analysis of uncertainties in risk analysis of ground movement was carried out. It enabled to establish a typology of uncertainties that fits "ground movements" risk analyses specificity.

Moreover, tools were developed in order to fill identified scientific gaps:

- a confidence index to characterize the confidence of the expert in a context of missing input data based on their nature and quality;
- a methodology for comparing the weight of the uncertainty of input data and models on the result. This enables a more effective way of deciding where extra resources should be allocated (on field investigations, numerical modeling enhancements...).

RÉFÉRENCES

- [1] Cauvin M., Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilités dans les risques liés au sol et sous-sol. Thèse de doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Nancy. Présentée et soutenue publiquement le 20 décembre 2007.
- [2] Cauvin M., Verdel T., Salmon R. Modeling uncertainties in mining pillar stability analysis. Risk Analysis, 2009, vol. 29, n° 10, pp. 1371-1380.
- [3] Cauvin M., Prise en compte des incertitudes et calcul de probabilité dans le domaine des risques liés au sous-sol. Application à la carrière souterraine de Grozon. Actes des 25^{es} Rencontres universitaires de génie civil, 23-25 mai 2007, Bordeaux, 8 p.
- [4] Cauvin M., Salmon R., Verdel T. Dealing with uncertainties in the context of post mining hazard evaluation. Proceedings of the symposium post-mining 2008, 6-8 February 2008, Nancy.

Comportement hydromécanique des géomatériaux : applications aux ouvrages souterrains



M. Souley

Après une période d'exploitation intense des mines, la France et d'autres pays européens sont confrontés aux problèmes posés par la fermeture et l'abandon de ces ouvrages, notamment leur stabilité mécanique sous l'effet d'une remontée

progressive des eaux souterraines après l'arrêt des pompages d'exhaure. Par ailleurs, la gestion des ressources naturelles (eau, gaz et hydrocarbures), explique le grand intérêt pour la communauté scientifique d'étudier le comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés, composés d'une matrice (roche poreuse et microfissures) et de fractures souvent disposées en réseaux. Enfin, l'exigence de sécurité et de fiabilité des sites de stockage, notamment de déchets radioactifs a donné lieu, depuis plus d'une vingtaine d'années, à des études approfondies sur le comportement thermohydromécanique de la roche hôte et des barrières ouvragées.

Ce sont quelques exemples de problématiques géoenvironnementales, mettant en jeu les comportements mécanique, hydromécanique et thermohydromécanique (THM) complexes et illustrant la nécessité de mieux comprendre les phénomènes s'y rattachant. L'approche adoptée dans cette recherche consiste à mener de front un travail expérimental, un travail de modélisation théorique des phénomènes (développements conceptuel et numérique) et un travail d'applications aux structures sur site. Plus précisément, à l'issue des essais en laboratoire et/ou d'observations *in situ* sur de nombreux matériaux (minerai de fer, argillites de l'Est et granite ; joints rocheux de granite, de schiste et de grès), plusieurs modèles conceptuels et lois de

comportement ont été développés. Ces modèles constitutifs ont été implantés dans des codes de calculs, et des applications à des cas réels ont été réalisées aussi bien pour des interprétations d'essais ou d'expériences *in situ* spécifiques que pour des rétro-analyses et des confrontations avec les mesures. Les applications concernent les structures de stockage de déchets radioactifs (laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne et celui de Manitoba au Canada creusés entre 400 et 500 m de profondeur, la mine de Kamashi au Japon située à 1000 m) et les ouvrages miniers (bassins houillers de Provence, bassins ferrifère et salifère lorrains) [3]. Cette méthodologie sera illustrée par trois exemples mettant en œuvre l'expérience, la modélisation théorique et les applications.

EXEMPLE 1 : UN NOUVEAU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL POUR CARACTÉRISER LE COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE D'UNE MATRICE POREUSE ET FRACTURÉE

L'étude expérimentale, théorique et numérique du comportement hydromécanique de fracture isolée a été largement abordée dans la littérature depuis plusieurs décennies. C'est moins le cas lorsque la matrice constituant les épontes de la fracture est perméable (naturellement et/ou due à l'endommagement), à l'exception de quelques

RÉFÉRENCES

- [1] MODEX-REP - Constitutive Model of the Meuse/Haute-Marne Argillites. EC Modex-Rep Project – Contract FIKW-CT-2000-0029 - Deliverable 2 & 3.
- [2] Souley M., Armand G., Su K., Wileveau Y. (2007). Modelling of the hydromechanical response of a shaft sinking in a deep claystone Int. Symp. On Numerical Models in Geomechanics (NUMOGX) 25-27 April 2007, Rhodes (Greece), Pande & Pietruszczak (eds), Balkema, ISBN 978-0-415-44027-1, pp. 269-275.
- [3] Souley M. (2010). Comportement mécanique et hydromécanique des massifs rocheux : applications aux ouvrages souterrains. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches de l'INPL, Nancy, 100 p + 2 annexes.
- [4] Souley M., Lopez P., Boulon M., Thoraval A. (2010). Hydromechanical couplings between fracture and rock mass in the case of a fractured sandstone. Rock Mechanics and Rock Engineering (soumis).
- [5] Souley M., Su K., Ghoreychi M., Armand G. (2010). A viscoplastic behaviour including damage for deep argillaceous rocks: from in situ observations to constitutive equations. In: 4th Int. Symposium on "Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement", Nantes, France, March 29 - April 1st, 2010.



FIGURE 1
DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ACCUEILLANT UN ÉCHANTILLON FRACTURÉ dont le pourtour et le forage d'injection d'eau sont imperméabilisés ; la fracture comporte un collier amovible

études numériques. Un dispositif expérimental (figure 1), permettant de caractériser en même temps les écoulements dans la fracture et dans la matrice poreuse, mais aussi individuellement dans la fracture ou dans la matrice, a été mis au point en partenariat avec le laboratoire L3S de Grenoble. Les essais hydromécaniques réalisés sur un grès poreux et fracturé ont permis de progresser dans la compréhension des couplages hydromécaniques dans la fracture et la matrice, et leurs interactions. Il a été démontré que la perméabilité de la fracture à travers son ouverture hydraulique dépend aussi bien de sa fermeture mécanique que des contraintes effectives régnant dans les épontes [4]. De plus, ce dispositif offre l'opportunité de quantifier expérimentalement, avec précision, les échanges entre la fracture et la matrice.

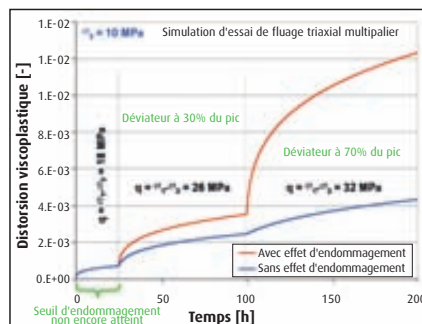
EXEMPLE 2 : DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE RHÉOLOGIQUE POUR LES ARGILITES

Plus de 400 m de galeries horizontales au niveau principal de -490 m du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (LS/MHM) ont été équipés depuis avril 2005 pour les mesures continues de convergence et d'extension dans le but d'une meilleure compréhension de la réponse des argilites en fonction du temps à l'échelle de l'ouvrage souterrain. Ces mesures ont montré que :

(a) les déformations viscoplastiques (ou différées) sont anisotropes et dépendent de l'orientation de la galerie par rapport à l'état initial des contraintes ;
(b) les vitesses de déformations viscoplastiques observées dans les zones saines loin des parois de galeries sont du même ordre de grandeur que celles

obtenues sur échantillons en laboratoire. Les vitesses enregistrées dans la zone endommagée ou fracturée près des parois sont de 1 à 2 ordres de grandeur plus élevées. Ceci indique l'influence de l'endommagement et des fractures ouvertes sur les vitesses viscoplastiques. En s'appuyant sur ces observations et nos recherches antérieures, une loi de comportement endommageable-viscoplastique a été proposée pour les argilites de l'Est :

- à court terme, l'endommagement, la rupture et le comportement « post-pic » sont approchés par la théorie de plasticité basée sur la généralisation de Hoek & Brown récemment revisitée ;
- le comportement à long terme étend le modèle de Lemaitre modifié ;
- en première approximation, l'influence de l'endommagement et des fractures sur les déformations viscoplastiques est introduite dans l'énergie d'activation et l'écroissage à travers des évolutions en fonction de la variable d'endommagement. La figure 2 illustre la validation de la loi sur un chemin de contraintes n'ayant pas servi à l'identification des paramètres de loi (essai de relaxation) et l'apport de la nouvelle loi sur un chemin de fluage



multiaxial et multipulier [5]. Par ailleurs, la plupart des essais mécaniques instantanés étant réalisés sur des échantillons d'argilites à l'état hydrique naturel (quasi saturé), en conditions pseudo-non drainées et sans mesure de la variation de pression de pore, le comportement hydromécanique a été, dans un premier temps, approché en contraintes totales. Les travaux en cours sont : d'une part, son application pour interpréter les mesures issues de différentes expériences *in situ* ; et d'autre part, son enrichissement en prenant en compte les deux phénomènes transitoires, couplages hydromécaniques et viscoplasticité.

EXEMPLE 3 : APPLICATION AUX STRUCTURES DE STOCKAGE DES DÉCHETS AU LABORATOIRE SOUTERRAIN LS/MHM

Afin de caractériser le comportement mécanique, hydromécanique et thermohydromécanique des argilites du Callovo-Oxfordien, une grande campagne d'essais de laboratoire a été menée en 1995 et 2001 au cours de laquelle plusieurs centaines d'essais géomécaniques ont été réalisés par différents laboratoires nationaux et européens. Sur la base de ces essais, plusieurs modèles rhéologiques de prédiction du comportement à court terme et à long terme ont été développés dans le cadre du projet européen MODEX-REP ou de partenariat avec l'ANDRA [1]. Plus récemment, le comportement hydromécanique de ces argilites a également été étudié dans le cadre des expérimentations *in situ*, notamment l'expérimentation REP « réponse à l'excavation d'un puits », où des mesures en continu de pression de pore, de déformations

FIGURE 2
LOI DE COMPORTEMENT ENDOMMAGEABLE-VISCOPLASTIQUE. Mise en évidence de l'effet d'endommagement sur les déformations différées.

et de déplacements (extensomètres, convergensomètres et inclinomètres) ont été réalisées dans les forages à partir d'une niche située à -445 m au Laboratoire souterrain LS/MHM (figure 3). Les mesures de perméabilité (à l'eau) réalisées dans les chambres de mesure de pression dans les forages ont montré l'existence « vraisemblable » de deux zones distinctes : la première, adjacente à la paroi du puits, montrant de fortes valeurs de perméabilité correspondant à la zone perturbée au sens mécanique (EDZ) ; et l'autre zone, associée à des variations très modérées de la perméabilité, correspondant à la zone perturbée au sens hydraulique (EHZ). Un modèle conceptuel de variations de perméabilité autour du puits a donc été proposé. Ce modèle permet de combiner l'évolution empirique (issue des mesures *in situ*) de la perméabilité avec la distance radiale de la paroi dans l'EZH et l'évolution de la perméabilité liée à l'endommagement dans l'EDZ à travers la distorsion plastique considérée comme variable d'endommagement [2].

Ce modèle conceptuel est utilisé pour expliquer les variations de pression observées dans l'expérimentation REP. Les résultats sont montrés sur la figure 3. Le forage REP2102 est approximativement orienté dans la direction de la contrainte horizontale mineure : les chambres de mesure de pression PRE_01, PRE_03 et PRE_05 sont respectivement situées à la distance radiale de 4,9, 2,7 et 1,7 m de la paroi du puits. La figure 3B montre la comparaison des pressions :

- le modèle prédit correctement la chute de pression après le passage du front ;
- dans les chambres (PRE_01, PRE_03 et PRE_05), des surpressions plus élevées se sont développées. Le modèle et les mesures prévoient ces surpressions avant le passage du front. Cependant, en termes d'amplitude de surpression, le modèle tend à sous-estimer cette variation (relativement à la pression de pore initiale) comparée aux mesures, d'environ 0,5 MPa ;
- la baisse instantanée de la pression de pore à chaque séquence de fonçage est bien prédite. Ces résultats n'avaient pas pu être prédits sans la prise en compte de l'évolution de perméabilité dans l'EDZ et l'EZH.

Si le modèle conceptuel d'évolution de perméabilité a permis d'améliorer de manière significative les prédictions de pression en champ proche, il présente l'inconvénient d'utiliser en partie une relation basée sur un critère géométrique (distance radiale de la paroi du puits) plutôt qu'une grandeur intrinsèque du matériau en champ proche comme la porosité.

En conclusion, une méthodologie de modélisation en géomécanique a été proposée, basée sur la compréhension et la quantification des mécanismes physiques en jeu. Les applications s'inscrivent dans le cadre des problématiques liées à l'après-mine, à la gestion des ressources naturelles ou à la performance des structures de stockages. Notre retour d'expérience montre que, dans de nombreux cas, des hypothèses simplificatrices ne permettent pas d'expliquer les phénomènes multiphysiques de plus en plus complexes. Ceci justifie l'intérêt des recherches permanentes et pluridisciplinaires entreprises en France comme à l'étranger.

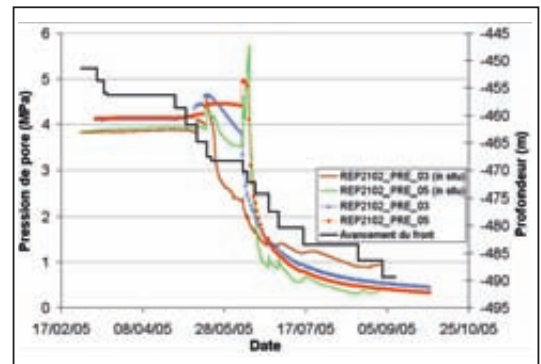
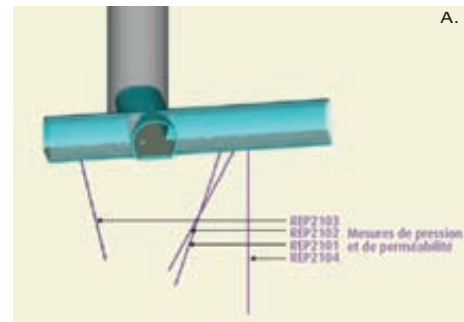


FIGURE 3

A. EXPÉRIMENTATION REP (réponse à l'excavation d'un puits) : vues des forages et chambres de mesures à partir de la niche
B. Confrontation entre mesures et modèle

ABSTRACT

Research presented here is justified by several problematics in relation to the geoenvironmental applications: post-mining with regard to the mechanical stability of the abandoned mines due to a progressive rise of ground water after the end of the dewatering process; the deep underground storage of hydrocarbons or radioactive wastes. The approach adopted in this research consists to jointly undertake an experimental study, a theoretical modeling of physical phenomena (conceptual and numerical developments) and in situ applications.

On the basis of the laboratory tests and/or in situ experiments carried out on several geomaterials (iron ore, claystones and granite; rock joints of granite, schist and sandstone), several conceptual models and rheological laws were developed. These constitutive models were also implemented in numerical codes and applied to interpret specific in situ experiments and to perform retro-analyses with confrontations between measurements and predictions.

The practical applications involve structures of deep underground radioactive waste repository (such as the underground laboratory of Meuse/Haute-Marne in France) and the mining works. The details of methodology and the applications carried out are widely discussed in Souley (2010). Three examples are illustrated here:

- a new experimental device allowing to characterize the hydraulic exchanges between fracture and matrix in a double porosity environment,
- the developments of a macroscopic viscoplastic model of argillites aimed to improve the viscoplastic strain prediction in the EDZ (Extent of Damaged Zone) around the LS/MHM drifts are proposed based on the in situ observations,
- the modeling of REP experimentations (including the hydromechanical behaviour) at the underground laboratory of Meuse/Haute-Marne (LS/MHM).

Comportement à long terme de la craie



J. B. Kazmierczak/F. Laouafa

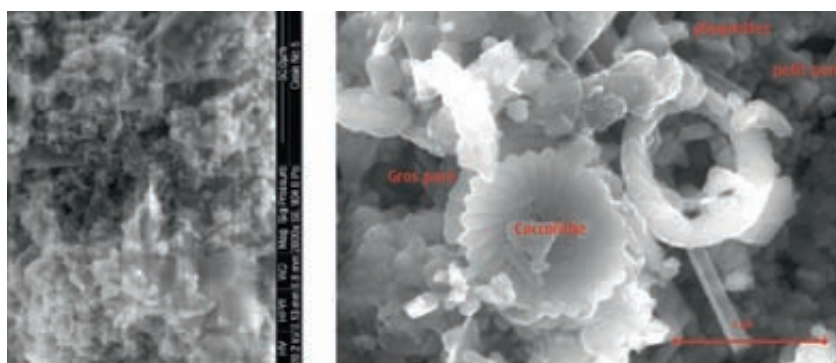
Les recherches menées sur la craie sont motivées par l'existence sur le territoire français de nombreux vides souterrains d'origine anthropique (carrières) ou naturelle (résultant de dissolution) dans ce matériau. L'existence de ces vides pose naturellement la question de leur devenir, de leur comportement et de leur stabilité à court comme à long terme. Le comportement mécanique de la craie est sensible à l'environnement hydrique dans lequel elle se trouve. Ce matériau possédant une matrice poreuse, des transferts de masses, de fluides ou de chaleur se développent en son sein. Les mécanismes de transfert ainsi que leur cinétique dépendent de l'atmosphère ambiante et des différents équilibres thermodynamiques entre les différentes phases (solide, liquide,

gaz). La craie est très sensible au degré de saturation (proportion de liquide dans le volume poreux), non seulement d'un point de vue chimique mais aussi mécanique. En fonction des composantes minéralogiques, sur le long terme, des phénomènes de dissolution peuvent se produire et contribuer à la diminution de la résistance des ouvrages souterrains (piliers, par exemple) par une augmentation du volume poreux. Pour appréhender correctement ces comportements, des essais ont été réalisés à différentes échelles en laboratoire et *in situ*. Ils mettent en œuvre des dispositifs très sophistiqués tels qu'un Microscope Électronique à Balayage Environnemental couplé à une platine de compression et à des appareillages de terrain plus classiques (capteurs d'humidité, extensomètres).

LE MATÉRIAU

La craie d'Estreux est une roche sédimentaire, datée du Crétacé supérieur. Généralement blanche et poreuse, elle contient des fractions argileuses, riches en glauconie, d'où sa couleur gris-vert.

La microstructure de la craie d'Estreux est présentée sur la **figure 1**. On peut y observer un coccolithe entier de diamètre de l'ordre de 5 μm , des plaquettes de coccolithes cassées de dimensions diverses (entre 0,5 et 2,5 μm) et des pores de formes variées. On remarque que les pores sont regroupés en deux groupes : des gros pores de formes convexes et de petits pores de formes variées. Les petits pores ont une dimension comparable au diamètre moyen d'accès obtenu par la technique du porosimètre (1,4 μm).



LES ESSAIS DE LABORATOIRE

Divers travaux menés dans le cadre d'un programme de recherche ont permis d'analyser les mécanismes de dégradation ou d'altération des propriétés mécaniques de la craie (craie d'Estreux). Des changements imperceptibles à l'œil nu (microdissolution, augmentation modérée de la porosité, microfissurations) pouvant être à l'origine d'une diminution des caractéristiques de résistance mécanique de la roche sont ainsi analysés au MEBE. Des essais de traction-compression uniaxiaux à une échelle « micro » ont été effectués dans le MEBE à l'aide d'une platine spécifiquement

FIGURE 1
IMAGES DE LA CRAIE D'ESTREUX AU MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE ENVIRONNEMENTAL (MEBE)

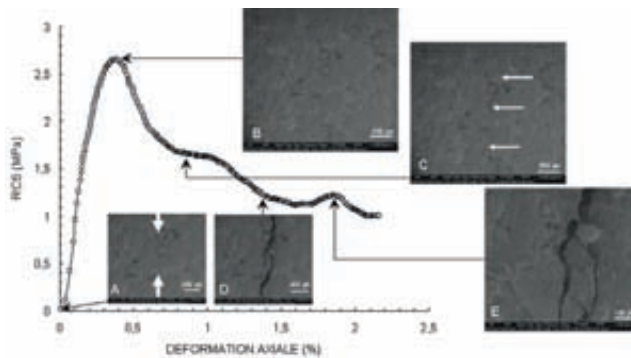


FIGURE 2
 ESSAI MICROMÉCANIQUE DE COMPRESSION UNIAXIALE DANS LE MEBE SUR UN ÉCHANTILLON DE CRAIE SATURÉE EN EAU (A) : au pic de résistance. la surface de l'échantillon est identique à celle de l'échantillon intact (B) : à environ 0,9 % de déformation axiale. une fracture pseudo-verticale devient apparente (C) avec une ouverture progressive dans la phase post rupture (D) et (E). Platine de compression (à gauche). Les images sont réalisées à partir d'un agrandissement de x37 (A) jusqu'à x310 (E). Elles concernent à la fois la mésostructure et la microstructure de la craie.

développée à cet effet. On présente, pour un échantillon saturé en eau, l'évolution des mécanismes de rupture au cours de la sollicitation « micromécanique » (figure 2).

Les analyses effectuées lors de ces recherches mettent en évidence les recoupages visco-hydromécaniques complexes dus à l'action de l'eau et à l'effet du temps. L'eau modifie l'état de contrainte de la craie, provoque l'affaiblissement généralisé de celle-ci et réduit son domaine élastique (figure 4). On observe également une réduction de la résistance avec le temps. L'envahissement d'eau et la faible vitesse de déformation (de l'ordre de 10^{-12} /s) d'un massif (phénomènes rencontrés dans la nature) ont des effets défavorables sur la résistance de la craie.

Dans le cadre de ces recherches plusieurs aspects ont été examinés :

- l'effet de l'eau : les études des couplages hydromécaniques, basées sur les concepts de sols non saturés. Ce travail

permet de proposer et de développer des dispositifs qui sont nécessaires et recommandés pour une bonne caractérisation du comportement hydromécanique de la craie en laboratoire. Dans le cadre partiellement saturé, la signature hydrique ou courbe de rétention de la craie d'Estreux a été construite (figure 3) ;

- l'effet du temps : cet effet a été étudié à partir de plusieurs types d'essais tels que le fluage, la relaxation à différentes vitesses de déformation et/ou de chargement. Ces essais mettent en évidence la dépendance du comportement de la craie vis-à-vis de la vitesse de sollicitation ;
- la microstructure de la craie : ces études ont montré que la craie est un milieu poreux avec des vides, de l'eau et des grains de calcite. La cimentation est présente entre ces grains. Des mécanismes de dissolution, transport et précipitation se manifestent en surface de l'échantillon ;
- les modèles de comportement de la

craie : plusieurs modèles constitutifs ont été analysés et développés pour décrire le comportement prenant en compte la vitesse de sollicitation ainsi que l'effet de la succion – différence entre pression de l'air et pression du fluide.

LES MESURES *IN SITU*

Dans la carrière d'Estreux, l'hygrométrie ambiante et les évolutions du niveau de la nappe phréatique, liées aux cycles saisonniers, sont les deux facteurs principaux à l'origine des changements d'hydratation dans la craie. Des mesures effectuées *in situ* depuis 2004 révèlent que la température dans la galerie est relativement stable, voisine de 11 °C, mais que l'humidité relative varie entre 80 % et 100 %.

L'instrumentation du site d'Estreux a été réalisée dans l'objectif d'étudier le comportement à long terme de la craie dans son environnement naturel, au sein d'une carrière souterraine abandonnée.

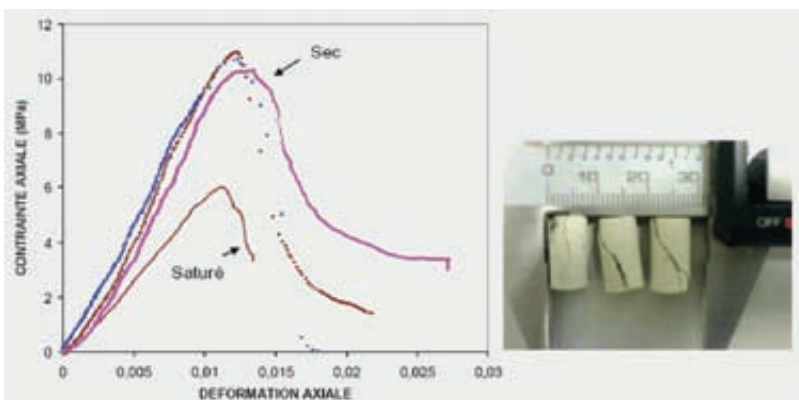


FIGURE 4
 RÉSISTANCE EN COMPRESSION SIMPLE POUR DIFFÉRENTS DEGRÉS DE SATURATION ET PHOTOS DES MICROÉCHANTILLONS APRÈS RUPTURE (ESSAIS MICRO)

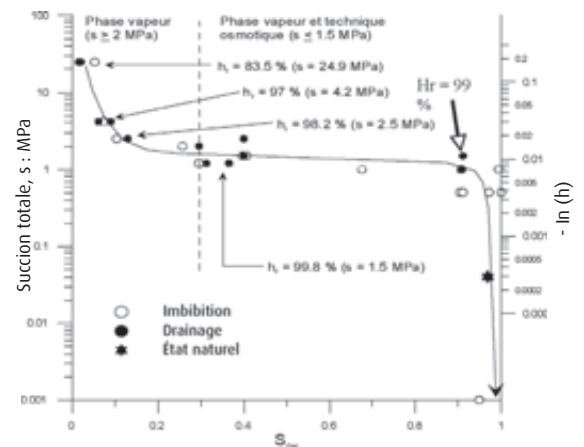


FIGURE 3
 COURBE DE RÉTENTION D'EAU DE LA CRAIE D'ESTREUX (S_{rw} : degré de saturation. S : succion. H_r : humidité relative)

Elle a vocation à décrire, dans le temps, l'évolution temporelle de paramètres tels que la température, l'humidité, la pression interstitielle et la déformation des piliers ; paramètres caractérisant ou affectant le comportement et les propriétés mécaniques du massif et/ou de l'ouvrage souterrain.

Des mesures effectuées *in situ* sur ce pilier montrent en particulier que la variation de la pression capillaire en profondeur nécessite un délai pour se propager au cœur du pilier.

RÉSULTATS

L'analyse au Microscope Électronique à Balayage Environnemental a permis d'effectuer des essais dans une atmosphère à hygrométrie contrôlée. La mise au point d'un dispositif de chargement mécanique au sein du MEBE a permis de réaliser des essais de compression uniaxiale sur des « micro-éprouvettes ». On a montré l'intérêt de l'utilisation de ce type de microscope pour l'observation des géomatériaux dans des contextes multiphasiques et multiphysiques, tels ceux rencontrés par les craies. Des phénomènes comme la création de fissures lors de phases d'hydratation, l'approfondissement et l'élargissement de dépressions

assimilables aux pores ont ainsi pu être observés. Ces résultats originaux encouragent l'utilisation de cet outil dans le domaine de la géotechnique. Les essais hydromécaniques, effectués en laboratoire, à l'aide de méthodes spécifiques (phase vapeur et pression osmotique) fournissent des données essentielles telle que la courbe de rétention d'eau du matériau par exemple. Cette dernière traduit le comportement « hydrique » du matériau poreux et laisse entrevoir quelle pourrait être l'interaction entre la roche et l'eau dans le terrain en place. D'autres essais plus conventionnels, menés sur de petites éprouvettes de craie, ont mis en évidence la dépendance de la réponse mécanique vis-à-vis de la succion et de la vitesse de sollicitation. Ainsi, la résistance apparaît être une fonction de la vitesse de sollicitation et de la valeur de succion régnant au sein du matériau. En d'autres termes, le domaine d'élasticité (critère de plasticité) croît avec la succion et la vitesse de sollicitation. L'extrapolation des résultats suggère qu'il y a une diminution significative de la résistance du matériau lorsque la vitesse de la sollicitation est très faible. Cela est très important, car en

carrières souterraines, la vitesse de sollicitation est souvent très faible, accompagnée d'une hygrométrie élevée, et peut donc avoir pour conséquence une diminution de la résistance des piliers ou de celle du toit et du mur. Par ailleurs, alors que la convergence du toit et du mur apparaît clairement linéaire (avec toutefois des vitesses très faibles), les extensomètres placés dans le pilier présentent des variations cycliques saisonnières (en plus d'une tendance globale linéaire) *a priori* impossible à corrélérer avec les températures mesurées, la pluviométrie (hygrométrie, niveau de la nappe, poids d'eau dans les terrains de surface, etc.) ou la pression atmosphérique. Les variations des grandeurs mesurées : température, déplacement, pression, bien que faibles, mettent en évidence des tendances d'évolution, certes très lentes mais logiques. Ces évolutions s'expliquent parfaitement dans le contexte des carrières abandonnées à faible profondeur où la variation des sollicitations d'origine hydraulique, mécanique ou thermique est faible. Ces différents éléments permettent d'imaginer les conséquences du changement climatique attendu sur le devenir de ces ouvrages.


ABSTRACT

Chalk mine pillars are submitted to mechanical loading and to variations of water saturation that can be due to seasonal environmental changes as water level fluctuations, hygrometry, temperature or atmospheric pressure. Hydraulic modifications may affect the long term stability of pillars. In order to analyze the behaviour and strength of such material, several experimental investigations at different scales (microscopic, mesoscopic and macroscopic) have been conducted on saturated, partially saturated and dry chalk samples. The microscopic scale analysis was performed in an Electron Scanning Environmental Microscope (ESEM). Water retention properties and a series of high pressure controlled suction odometer mesoscopic compression tests were carried out on chalk samples extracted from a pillar. The macroscopic scale concerns the monitoring of several variables (temperature, moisture, strains) in a pillar of the abandoned Estreux chalk mine (France). These three scales were considered in order to determine accurately the general features of the chalk hydromechanical behaviour. The potential impact of the water content variations on the mechanical behaviour of the chalk has been realized based in the frameworks of the classical unsaturated soils mechanics. Suction hardening was clearly identified, resulting in increasing yield stresses with suction. Collapse under wetting at constant applied vertical load was also observed. Rate dependency and two principal failure modes (shear and pore collapse) were observed and formalized. In situ observation shows irreversible displacement and strains evolution with hygrometry.

RÉFÉRENCES

- [1] Auvray C. (2003). Vieillessement et comportement rhéologique du gypse. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine: 265.
- [2] Sorgi C., De Gennaro V. (2007). Analyse microstructurale au MEB environnemental d'une craie soumise à chargement hydrique et mécanique. C. R. Geoscience 339, 468-481.
- [3] Nguyen H. D., De Gennaro V., Delage P., Sorgi C. (2008). Retention and compressibility properties of a partially saturated mine chalk. First European Conference on Unsaturated Soils, Durham.
- [4] Nguyen, H. D. (2009). Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. Thèse École des Ponts, ParisTech.

Publications



Liste des articles
parus dans
les revues
à comité de
lecture ou
«proceedings»
à diffusion large,
entre le
30 juin 2009
et le 31 juillet 2010.

Nota : tous les auteurs sont
mentionnés, mais seuls les noms
des auteurs INERIS figurent en gras.

Risques chroniques

2009

VIEL J.F., CARDIS E., MOISSONNIER M., **DE SEZE R.**, HOURS M.
Radiofrequency exposure in the french general population: band, time, location and activity variability.
Environment International, 2009, vol. 35, n° 8, pp. 1150-1154.

BESSAGNET B., MENUT L., CURCI G., HODZIC A., GUILLAUME B., LIOUSSE C., MOUKHTAR S., PUN B., SEIGNEUR C., SCHULZ M.
Regional modeling of carbonaceous aerosols over Europe - focus on secondary organic aerosols.
Journal of Atmospheric Chemistry, 2008, vol. 61, n° 3, pp. 175-202.

PERY A.R.R., **BOIS F.Y.**
Stochasticity in PBPK models: implications for cancer risk assessment.
Risk Analysis, 2009, vol. 29, n° 8, pp. 1182-1191.

MENUT L., MASSON O., **BESSAGNET B.**
Contribution of Saharan dust on radionuclides aerosol activity levels in Europe? The 21-22 february 2004 case study.
Journal of Geophysical Research, 2009, vol. 114, art. n° D16202.

DABO D., **BADREDDINE R.**, DE WINDT L., DROUADAINE I.
Ten-year chemical evolution of leachate and municipal solid waste incineration bottom ash used in a test road site.
Journal of Hazardous Materials, 2009, vol. 172, n° 2-3, pp. 904-913.

DE MEIJ A., GZELLA A., CUVELIER C., THUNIS P., **BESSAGNET B.**, VINUESA J.F., MENUT L., KELDER H.M.
The impact of MM5 and WRF meteorology over complex terrain on CHIMERE model calculations.
Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, vol. 9, n° 17, pp. 6611-6632.

HODZIC A., JIMENEZ J.L., MADRONICH S., AIKEN A.C., **BESSAGNET B.**, FAST J., LAMARQUE J.F., ONASCH T.B., ROUX G., ULBRICH I.M.
Modeling organic aerosols during MILAGRO: importance of biogenic secondary organic aerosols.
Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, vol. 9, n° 17, pp. 6949-6981.

BOIS F.
Modélisation physiologique des interactions métaboliques.
Environnement Risques & Santé, 2009, vol. 8, n° 5, pp. 413-424.

AMODEO T., **DUTOUQUET C.**, **LE BIHAN O.**, ATTOUI M., **FREJAFON E.**
On-line determination of nanometric and sub-micrometric particle physicochemical characteristics using spectral imaging-aided Laser-Induced Breakdown Spectroscopy coupled with a Scanning Mobility Particle Sizer.
Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy, 2009, vol. 64, n° 10, pp. 1141-1152.

PISSOT N., BESOMBES J.L., **LEOZ-GARZIANDIA E.**, JAFFREZO J.L.
Impact de la combustion du bois sur la qualité de l'air ambiant de quatre villes de France : évaluation de l'approche par traceurs organiques.
Pollution Atmosphérique, 2009, n° 203, pp. 325-333.

MANDIN C., **DELERY L.**
État des connaissances sur les émissions des appareils de bureautique et les risques sanitaires potentiels associés.
Pollution Atmosphérique, 2009, n° 203, pp. 260-263.

TISSOT S.
REACH : les éléments fondamentaux du dispositif.
Actualité Chimique, 2009, n° 333, pp. 58-63.

ZDANEVITCH I., **BOUR O.**, LLINAS L., LEJAL S.
Comparison of polluting potentials of liquid emissions from MBT plants.
COSSU R., DIAZ L.F., STEGMANN R. (Eds.). SARDINIA 2009 : Proceedings of the 12th International waste management and landfill symposium, 5-9 October 2009, Cagliari, Italy; CISA Publisher, 2009, pp. 399-400.

BOUR O., **ZDANEVITCH I.**, BRIAND M., LLINAS L.
Estimating methane emission and oxidation from two temporary covers on landfilled MBT treated waste.
COSSU R., DIAZ L.F., STEGMANN R. (Eds.). SARDINIA 2009 : Proceedings of the 12th International waste management and landfill symposium, 5-9 October 2009, Cagliari, Italy; CISA Publisher, 2009, pp. 577-578.

CHASSAGNAC T., **ZDANEVITCH I.**, **BOUR O.**
COSSU R., DIAZ L.F., STEGMANN R. (Eds.). SARDINIA 2009 : Proceedings of the 12th International waste management and landfill symposium, 5-9 October 2009, Cagliari, Italy; CISA Publisher, 2009, pp. 457-458.

KHEFFI A., COLLART C., D'OR D., **BOUR O.**, GARCIA M., SALPETEUR V.
Methodology developments for measuring biogas emissions from landfill surface.
COSSU R., DIAZ L.F., STEGMANN R. (Eds.). SARDINIA 2009 : Proceedings of the 12th International waste management and landfill symposium, 5-9 October 2009, Cagliari, Italy; CISA Publisher, 2009, pp. 599-600.

QUIOT F., **ROLLIN C.**, **MASSELOT G.**, JORDANA S.
Simulation du transfert de polluants dans les sols et les eaux souterraines : recommandations pour le choix du modèle et de la démarche.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

MICHEL J., GUJISAITE V., OUVRARD S., **DENYS S.**, SIMONNOT M.O.
Les expériences de laboratoire permettent-elles de prévoir le transport de HAP et de métaux à l'échelle du lysimètre de terrain ?
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

DEMOUGEOT-RENARD H., HAOUCHE-BELKESSAM L., **DENYS S.**, GARCIA M., D'OR D.
Couplage de mesures sur site et de méthodes géostatistiques : mise en oeuvre « en temps réel » à l'aide d'un FPXRF Projet REPERAGE.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

BERT V., MENCH M., VANGRONVELD J., KUSCHK P., SCHWITZGUEBEL J.P.
Application des phytotechnologies : état de l'art.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

SAADA A., GOURRY J.C., **ROLLIN C.**, GUERIN V., PROUST E., ZORNIG C., COLOMBANO S.
Projet ATTENA : développement de mesures de terrain permettant la mise en évidence de l'atténuation naturelle des polluants organiques.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

UZU G., SARRET G., **BONNARD R.**, SOBANSKA S., PROBST A., SILVESTRE J., PRADERE P., DUMAT C.
Absorption foliaire des métaux présents dans des particules atmosphériques issues d'une usine de recyclage de batteries : biotest laitue.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

BATAILLARD P., GUERIN V., BERANGER S., COLOMBANO S., BELLIER S., LOUVRIER M., JULLIEN M., **ROLLIN C.**, **BADREDDINE R.**, **BOUR O.**, KRIMISSA M., LABOUDIGUE A., VANSIMAYES C., ZENTAR R.
CAPHEINE - De l'utilité de s'intéresser à la zone non saturée des sites pollués par des éléments traces : quelles caractérisations et dans quel but ?
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

HAZEBROUCK B., BAUMONT G., LEGOUT C., MAROT F.
COMRISK : un guide et une boîte à outils pour l'implication des populations dans l'évaluation et la gestion d'un site ou sol pollué.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

FEIDT C., DENYS S., FLOCH-BARNEAUD A., CABOCHÉ J., DOR F., DABIN C., TACK K.
Biodisponibilité des polluants du sol : définition, caractérisation et utilisation potentielle dans la gestion des sites et sols pollués.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

DENYS S., DOR F.
La nécessaire complémentarité des approches environnementales et sanitaires dans la gestion des sols pollués.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

DOR F., DENYS S., DANIAU C., BELLENFANT G., ZEGHOUN K., DABIN C., NEDELLEC V., MOSQUERON L., FLOCH-BARNEAUD A., MATHIEU A.
Exposition des enfants par ingestion de sol et de poussières contaminés : quels choix pour les évaluations de risque ?
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

BENOIT Y., CHANCERELLE L., DUMESTRE A., FALCAO SALLES J., FAYOLLE-GUICHARD F., GRUNDMANN G., KYSELKOVA M., MORINIÈRE J.
Traitement biologique *in situ* au sein d'un aquifère de polluants de type ETBE et MTBE.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

HULOT C., HAZEBROUCK B., GAY G., MAROT F.
Émission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : comparaison mesures sur sites et modélisations.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

TACK K., MOUTON J., MEUNIER L., MESTRE-PUJOL D., DENYS S.
Bioaccessibilité et spéciation de l'arsenic des sols autour de l'ancien site minier de Salsigne.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

MUNOZ M., BADREDDINE R., BRUNEL C., DESTRIGNEVILLE C.
Évaluation du comportement à long terme des déchets miniers par un essai de lessivage dynamique : application à différentes conditions physico-chimiques.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

MENCH M., BERT V., RENELLA G., VANGRONSVELD J., ADRIAENSEN K., KUMPIENE J., MULLER I., MAGNIE M.C., TLUSTOS P., CUNDY A.
Comment mettre en œuvre des solutions de stabilisation *in situ* ou de phytoremédiation dans les stratégies de gestion durable des sols contaminés en éléments traces.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

BERT V., MENCH M., RUTTENS A., KUMPIENE J., MULLER I., CUNDY A., FRIESL-HANL W., TLUSTOS P., RENELLA G., TACK K., DENYS S., COCHET N., VIALLETTE F., MAGNIE M.C., BRIGNON J.M., JOLLIVET P., MARSCHNER B., SOULARUE J.P., RASPAIL F., PUSCHENREITER M.
SUMATECS : gestion durable des sols contaminés par les éléments traces : état de l'art et besoins de recherche.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

BERT V., LACHEREZ S., CARON L., LORS C., DESAILLY G., LABOUDIGUE A., DAMIDOT D., GAUCHER R.
Phytostabilisation d'un site pollué par les éléments traces : opération pilote et pérennité du traitement.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

MANGERET A., ROLLIN C., ATTEIA O.
Comparaison de cinétiques de biodégradation du PCE déterminées sur 3 échelles différentes : étude d'une pollution mixte PCE/huiles minérales.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

UZU G., SAUVAIN J.J., DENYS S., TACK K., PRADERE P., DUMAT C.
Évaluation de l'exposition humaine au plomb par ingestion et inhalation de PM10 et PM2,5 émises par une usine de recyclage de batteries.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

HEYMAN C., BARRET A.S., JEHANNIN P., DESCAMPS C., DENYS S., DECLERCQ C.
Cas de saturnisme inexpliqués à proximité d'une centrale thermique de production d'électricité au charbon.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

DENYS S., FLOCH-BARNEAUD A., MATON D., JACQUEMIN P., DOR F.
Contribution de l'interprétation de l'état des milieux à la gestion d'un site dont les sols présentent une anomalie géochimique : le cas de la commune de Saint-Laurent-le-Minier, Gard.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

CABOCHÉ J., DENYS S., TACK K., JONDREVILLE C., RYCHEN G., FEIDT C.
Validation d'un test de mesure de la bioaccessibilité du plomb dans les sols pollués.
Actes des 2^e Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, 20-21 octobre 2009, Paris.

DOR F., MULTIGNER L., DOORNAERT B., LAFON D., DUBOUDIN C., EMPEREUR-BISSONNET P., LEVY P., BONVALLOT N.
The French approach to deriving toxicity reference values: an example using reprotoxic effects.
Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2009, vol. 55, n° 3, pp. 353-360.

DEVILLERS J., PANDARD P., CHARISSOU A.M., BISPO A.
Use of multicriteria analysis for selecting ecotoxicity tests.
DEVILLERS J. (Ed.). Ecotoxicology modeling. New York:

Springer, 2009, pp. 117-143. (Emerging topics in ecotoxicology, vol. 2).

DEVILLERS J., PANDARD P., CHARISSOU A.M., BISPO A.
Interspecies correlations for predicting the acute toxicity of xenobiotics.
DEVILLERS J. (Ed.). Ecotoxicology modeling. New York: Springer, 2009, pp. 85-115. (Emerging topics in ecotoxicology, vol. 2).

PANDARD P.
Daphnia tests.
MOSER H., ROMBKE J. (Eds.). Ecotoxicological Characterization of Waste. Results and experiences of an international ring test. New York: Springer, 2009, pp. 97-104.

BAZIN C., PANDARD P., CHARISSOU A.M., BARTHEL Y.
Ceriodaphnia dubia Chronic Toxicity Tests.
MOSER H., ROMBKE J. (Eds.). Ecotoxicological Characterization of Waste. Results and experiences of an international ring test. New York: Springer, 2009, pp. 161-164.

DEVILLERS J., PANDARD P., CHARISSOU A.M.
Sélection multicritère de bioindicateurs de la qualité des sols.
Étude et Gestion des Sols, 2009, vol. 16, n° 3-4, pp. 233-242.

BERT V., SEUNTJENS P., DEJONGHE W., LACHEREZ S., THI RHANH THUY H., VANDECASTEELE B.
Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites.
Environmental Science and Pollution Research, 2009, vol. 16, n° 7, pp. 745-764.

MENCH M., SCHWITZGUEBEL J.P., SCHROEDER P., BERT V., GAWRONSKI S., GUPTA S.
Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety.
Environmental Science and Pollution Research, 2009, vol. 16, n° 7, pp. 876-900.

JOACHIM S., MORIN A., THYBAUD E.
Effet du cuivre sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques.
Actualité Chimique, 2009, n° 334, pp. 55-58.

MARTIN A., BOIS F.Y., PIERRE F., WILD P.
Occupational exposure to cobalt : a population toxicokinetic modeling approach validated by field results challenges the Biological Exposure Index for urinary cobalt.
Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2010, vol. 7, pp. 54-62.

DEVILLERS J., DOUCET J.P., PANAYE A., MARCHAND-GENESTE N., PORCHER J.M.
Structure-activity modeling of a diverse set of androgen receptor ligands.
DEVILLERS J. (Ed.). Endocrine disruption modeling. CRC Press, 2009, pp. 335-356.

MARCHAND-GENESTE N., DEVILLERS J., DORE J.C., PORCHER J.M.
e-Endocrine disrupting chemical databases for deriving SAR and QSAR models.
DEVILLERS J. (Ed.). Endocrine disruption modeling. CRC Press, 2009, pp. 379-398.

PORCHER J.M., DEVILLERS J., MARCHAND-GENESTE N.
Mechanisms of endocrine disruptions. A tentative overview.
DEVILLERS J. (Ed.). Endocrine disruption modeling. CRC Press, 2009, pp. 11-46.

COSNEFROY A., BRION F., GUILLET B., LAVILLE N., PORCHER J.M., BALAGUER S., AIT-AISSA S.
A stable fish reporter cell line to study estrogen receptor transactivation by environmental (xeno) estrogens.
Toxicology in Vitro, 2009, vol. 23, n° 8, pp. 1450-1454. (Proceedings of ESTIV 2008, the 15th International Congress on In Vitro Toxicology, 25 to 28 Sept 2008 Stockholm, Sweden)

KINANI S., BOUCHONNET S., CREUSOT N., BOURCIER S., BALAGUER P., PORCHER J.M., AIT-AISSA S.
Bioanalytical characterisation of multiple endocrine and dioxin-like activities in sediments from reference and impacted small rivers.
Environmental Pollution, 2010, vol. 158, n° 1, pp. 74-83.

CREUSOT N., KINANI S., BALAGUER P., TAPIE N., LE MENACH K., MAILLOT-MARECHAL E., PORCHER J.M., BUDZINSKI H., AIT-AISSA S.
Evaluation of an hPXR reporter gene assay for the detection of aquatic emerging pollutants: screening of chemicals and application to water samples.
Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2010, vol. 396, n° 2, pp. 569-583.

MOMBELLI E., RINGEISSEN S.
The computational prediction of toxicological effects in regulatory contexts: current use and future potential of QSAR tools.
Actualité Chimique, 2009, n° 335, pp. 52-59.

FORET G., HAMAOUI L., SCHMECHTIG C., EREMENKO M., KEIM C., DUFOUR G., BOYNARD A., COMAN A., UNG A., BEEKMANN M.
Evaluating the potential of IASI ozone observations to constrain simulated surface ozone concentrations.
Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, vol. 9, n° 21, pp. 8479-8491.

BONNARD R., MCKONE T.E.
Integration of the predictions of two models with dose measurements in a case study of children exposed to the emissions from a lead smelter.
Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal, 2009, vol. 15, n° 6, pp. 1203-1226.

Ji X., LE BIHAN O., RAMALHO O., MANDIN C., D'ANNA B., MARTINON L., NICOLAS M., BARD D., PAIRON J.C.
Characterisation of particles emitted by incense burning in an experimental house.
Indoor Air, 2010, vol. 20, pp. 147-158.

ABOU CHAKRA O.
Contribution des granules intrapolliniques à l'allergénicité des pollens. Modulation par les polluants atmosphériques.
Thèse de doctorat de l'Université Paris VII. Présentée et soutenue publiquement le 15 juin 2009

CABOCHE J.
Validation d'un test de mesure de la bioaccessibilité des éléments traces métalliques dans les sols pollués.
Thèse de doctorat de l'INPL. Présentée et soutenue publiquement le 28 septembre 2009.

FEVRE-GAUTIER A.L.
Indicateurs développement durable et agro-ressources pour l'industrie.
Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Troyes. Présentée et soutenue publiquement le 2 février 2009.

KINANI S.
Identification de substances chimiques à activité de perturbation endocrinienne dans des matrices environnementales : développement d'une approche couplant tests biologiques *in vitro* et méthodes physico-chimiques d'analyse.
Thèse de doctorat de l'École Polytechnique de Palaiseau. Présentée et soutenue publiquement le 21 janvier 2009.

MICHEL J.
Évaluation du transport de HAP et de métaux dans les sols non saturés.
Thèse de doctorat de l'INPL. Présentée et soutenue publiquement le 09 octobre 2009.

BERT V., TACK K., VIALLETTE F., MAGNIE M.C., BERQUET A., COCHET N., SCHOEFS O.
Prospects in biomass valorization from phytoextraction of Cd, Pb and Zn with hyperaccumulator.
Actes du 12^e congrès de la SFGP, 14-16 octobre 2009, Marseille.

PERY A., BROCHOT C., HOET P.H.M., NEMMAR A., BOIS F.Y.
Development of a physiologically based kinetic model for 99m-Techneium-labelled carbon nanoparticles inhaled by humans.
Inhalation Toxicology, 2009, vol. 21, n° 13, pp. 1099-1107.

MANGERET A.
Cinétiques de dégradation des solvants chlorés dans les eaux souterraines : changement d'échelle du laboratoire à l'aquifère.
Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux III. Présentée et soutenue publiquement le 8 décembre 2009.

VAN RONGEN E., SAUNDERS R., CROFT R., JUUTILAINEN J., LAGROYE I., MIYAKOSHI J., DE SEZE R., TENFORDE T., VERSCHAEVE L., VEYRET B., XU Z.
Effects of radiofrequency electromagnetic fields on the human nervous system.
Journal of Toxicology and Environmental Health Part B, 2009, vol. 12, n° 8, pp. 572-597.

2010

ABOU CHAKRA O.R., LACROIX G., SENECHAL H., THIBAUDON M.
Synergie pollen-polluants et rôle des facteurs météorologiques sur le risque de pollinose : évolution des consultations dans la région amiénoise pendant la saison pollinique 2007.
Revue Française d'Allergologie. [accepté pour publication 10/11/2009]

MENUT L., BESSAGNET B.
Atmospheric composition forecasting in Europe.
Annales Geophysicae, 2010, vol. 28, n° 1, pp. 61-74.

MIFFRE A., ABOU CHACRA M., GEFFROY S., RAIROUX P., SOULHAC L., PERKINS R.J., FREJAFON E.
Aerosol load study in urban area by Lidar and numerical model.
Atmospheric Environment, 2010, vol. 44, n° 9, pp. 1152-1161.

BOIS F.
Physiologically based modelling and prediction of drug interactions.
Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2010, vol. 106, n° 3, pp. 154-161.

NGO L., RYAN L.M., MEZZETTI M., BOIS F.Y., SMITH T.J.
Estimating metabolic rate for butadiene at steady state using a Bayesian physiologically-based pharmacokinetic model.
Environmental and Ecological Statistics. [accepté pour publication 12/08/2009]

KONOVALOV I.B., BEEKMANN M., MELEUX F., DUTOT A., FORET G.
Combining deterministic and statistical approaches for PM10 forecasting in Europe.
Atmospheric Environment, 2009, vol. 43, n° 40, pp. 6425-6434.

DENYS S., CABOCHE J., FEIDT C., HAZEBROUCK B., DOR F., DABIN C., FLOCH-BARNEAUD A., TACK K.
Biodisponibilité et bioaccessibilité des métaux et métalloïdes des sols pollués pour la voie orale chez l'homme.
Environnement Risques & Santé, 2009, vol. 8, n° 5, pp. 433-438.

PERE J.C., MALLET M., BESSAGNET B., PONT V.
Evidence of the aerosol core-shell mixing state over Europe during the heat wave of summer 2003 by using CHIMERE simulations and AERONET inversions.
Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36, art. n° L09807

AMMARI M., GAMEZ C., LECOMTE A., SAKLY M., ABDELMELEK H., DE SEZE R.
GFAP expression in the rat brain following sub-chronic exposure to a 900 MHz electromagnetic field signal.
International Journal of Radiation Biology, 2010, vol. 86, n° 5, pp. 367-375.

PERY A., TROISE A., TISSOT S., VINCENT J.M.
Comparison of models to analyze mortality data and derive concentration-time response relationship of inhaled chemicals.
Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2010, vol. 57, n° 1, pp. 124-128.

COURTOIS A., ANDUJAR P., LADEIRO Y., DUCRET T., ROGERIEUX F., LACROIX G., BAUDRIMONT I., GUIBERT C., ROUX E., CANAL-RAFFIN M., BROCHARD P., MARANO F., MARTHAN R., MULLER B.
Effect of engineered nanoparticles on vasomotor responses in rat intrapulmonary artery.
Toxicology and Applied Pharmacology, 2010, vol. 245, n° 2, pp. 203-210.

INFRAY N., PALLUEL O., PICCINI B., SANCHEZ W., AIT-AISSA S., NOURY P., GOMEZ E., GERODIE P., MINIER C., BRION F., PORCHER J.M.

Endocrine disruption in wild populations of chub (*Leuciscus cephalus*) in contaminated French streams.

Science of The Total Environment, 2010, vol. 408, n° 9, pp. 2146-2154.

PERY A., DESMOTS S., MOMBELLI E.

Substance-tailored testing strategies in toxicology: an in silico methodology based on QSAR modeling and Monte Carlo.

Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2010, vol. 56, n° 1, pp. 82-92.

DIOTEL N., LE PAGE Y., MOURIEC K., TONG S.K., PELLEGRINI E., VAILLANT C., ANGLADE I., BRION F., PAKDEL F., CHUNG B.C., KAH O.

Aromatase in the brain of teleost fish: expression, regulation and putative functions.

Frontiers in Neuroendocrinology, 2010, vol. 31, n° 2, pp. 172-192.

SPARFEL L., PINEL-MARIE M.L., BOIZE M., KOSCIELNY S., DESMOTS S., PERY A., FARDEL O.

Transcriptional signature of human macrophage exposed to the environmental contaminant benzo(a)pyrene.

Toxicological Sciences, 2010, vol. 114, n° 2, pp. 247-259.

SANCHEZ W., PICCINI B., MAILLOT-MARECHAL E., PORCHER J.M.

Comparison of two reference systems for biomarker data analysis in a freshwater biomonitoring context.

Environment International, 2010, vol. 36, n° 4, pp. 377-382.

BEAUDOUIN R., MICALLEF S., BROCHOT C.

A stochastic whole-body physiologically based pharmacokinetic model to assess the impact of inter-individual variability on tissue dosimetry over the human lifespan.

Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2010, vol. 57, n° 1, pp. 103-116.

DAVID A., GOMEZ E., AIT-AISSA S., ROSAIN D., CASELLAS C., FENET H.

Impact of urban wastewater discharges on the sediments of a small mediterranean river and associated coastal environment : assessment of estrogenic and dioxin-like activities.

Archives of Environmental Contamination & Toxicology, 2010, vol. 58, n° 3, pp. 562-575.

JULLIEN A., DE LARRARD F., BERCOVICI M., LUMIERE L., PIANTONE P., DOMAS J., DUPONT P., CHATEAU L., LERAY F.

Le projet OFRIR : une approche multiacteurs du recyclage dans les infrastructures routières.

Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2009, vol. 275, pp. 65-84.

MALHERBE L., WROBLEWSKI A., LETINOIS L., ROUIL L.

Evaluation of numerical models used to simulate atmospheric pollution near roadways.

ALBERGEL A. (Ed.). *Proceedings of the 13th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 13)*, 1-4 June 2010, Paris. Boulogne-Billancourt : ARIA Technologies, 2010, pp. 697-700.

LEGER K., VAN DEN ELSHOUT S., UNG A., MALHERBE L., MELEUX F., SONGEUR C., HONORE C., PERNOT D.

www.airqualitynow.eu, a common website and air quality indices to compare cities across europe.

ALBERGEL A. (Ed.). *Proceedings of the 13th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 13)*, 1-4 June 2010, Paris. Boulogne-Billancourt : ARIA Technologies, 2010, pp. 403-407.

BEEKMANN M., et al., CHIAPPINI L., FAVEZ O., AYZOZ G., BESSAGNET B., ROUIL L., ROSSIGNOL S., et al.

The megapoli paris campaign for urban aerosol characterisation - a comprehensive data set for air quality model evaluation.

ALBERGEL A. (Ed.). *Proceedings of the 13th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 13)*, 1-4 June 2010, Paris. Boulogne-Billancourt : ARIA Technologies, 2010, pp. 519-523.

DAVID A., FENET H., ESCANDE A., MUNARON D., ROSAIN D., MAILLOT-MARECHAL E., AIT-AISSA S., CASELLAS C., GOMEZ E.

In vitro biomonitoring of contamination by estrogenic compounds in coastal environments: comments on the use of *M. galloprovincialis*.

Environmental Toxicology. [Accepté pour publication]

ROSSIGNOL S., CHIAPPINI L., PERRAUDIN E., DOUSSIN J.F.

Simultaneous study of gas phase and secondary organic aerosols' chemical composition.

WEILENMANN M., LACHER R. (Eds.). *Proceedings of the 18th International symposium «Transport and air pollution»*, 18-19 May 2010, Dübendorf, Switzerland. Dübendorf: Empa, 2010.

AL FARAJ A., BESSAAD A., CIESLAR K., LACROIX G., GAILLARD S., CANET-SOULAS E., CREMILLIEUX Y.

Long-term follow-up of lung biodistribution and effect of instilled SWCNTs using multiscale imaging techniques.

Nanotechnology, 2010, vol. 21, n° 17, art. n° 175103.

GERAUDIE P., BOULANGE-LECOMTE C., GERBRON M., HINFRAY N., BRION F., MINIER C.

Endocrine effects of the tapeworm *Ligula intestinalis* in its teleost host, the roach (*Rutilus rutilus*).

Parasitology, 2010, vol. 137, n° 4, pp. 697-704.

CONNAN O., TACK K.

Metals in marine environment (mollusc *Patella* sp., fish *Labrus bergylta*, crustacean *Cancer pagurus*, beach sand) in a nuclear area, the North Cotentin (France).

Environmental Monitoring and Assessment, 2010, vol. 165, n° 1-4, pp. 67-86.

BESSAGNET B., SEIGNEUR C., MENUT L.

Impact of dry deposition of semi-volatile organic compounds on secondary organic aerosols.

Atmospheric Environment, 2010, vol. 44, n° 14, pp. 1781-1787.

DUCROT V., BILLOIR E., PERY A., GARRIC J., CHARLES S.

From individual to population level effects of toxicants in the tubicifid branchiura sower by using threshold effect models in a bayesian framework.

Environmental Science and Technology, 2010, vol. 44, n° 9, pp. 3566-3571.

GHEERARDYN L., LE BIHAN O., MALHAIRE J.M., GUILLON O., GIBAUT C., DORE E., MORGENEYER M.

Nanoparticle release from nano-containing product, introduction to an energetic approach.

Technical proceedings of the 2010 NSTI Nanotechnology conference & expo (Nanotech), 21-24 June 2010, Anaheim, USA. New York : CRC Press, 2010, vol. 1, pp. 736-739.

AMODEO T., DUTOUQUET C., DUFOUR J.P., LE BIHAN O., FREJAFON E.

Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) for on-line monitoring and workplace surveillance of nanoparticle production processes.

Technical proceedings of the 2010 NSTI Nanotechnology conference & expo (Nanotech), 21-24 June 2010, Anaheim, USA. New York : CRC Press, 2010, vol. 1, pp. 736-739.

Risques accidentels

2009

BRISSAUD F., BARROS A., BERENGUER C., CHARPENTIER D.

Reliability study of an intelligent transmitter. PHAM H., NAKAGAWA T. (Eds.). *Proceedings of the 15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, 6-8 August 2009, San Francisco, USA.*

DAUBECH J., SOCHET I., PROUST C.

Interaction of acoustic waves with flame front propagation. *Process Safety Progress, 2009, vol. 28, n° 3, pp. 237-243.*

VIGNES A., DUFAUD O., PERRIN L., THOMAS D., BOUILLARD J., JANES A., VALLIERES C.

Thermal ignition and self-heating of carbon nanotubes: From thermokinetic study to process safety. *Chemical Engineering Science, 2009, vol. 64, n° 20, pp. 4210-4221.*

LE COZE J.C.

Accident in a French dynamite factory: An example of an organisational investigation. *Safety Science, 2010, vol. 48, n° 1, pp. 80-90.*

BRISSAUD F., CHARPENTIER D., FOULADIRAD M., BARROS A., BERENGUER C.

Failure rate evaluation with influencing factors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, vol. 23, n° 2, pp. 187-193.*

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

Case retrieval in ontology-based CBR systems. MERTSCHING B., HUND M., AZIZ Z. (Eds.). *KI 2009: Advances in Artificial Intelligence. Proceedings of the 32nd Annual conference on artificial intelligence, 15-18 September 2009, Paderborn, Germany. Berlin: Springer, 2009, pp. 564-571. (Lecture Notes in Computer Science, vol. 5803/2009).*

KONSTANDINIDOU M., NIVOLIANITOU Z., PLOT E., CAMUS F., MONFERINI A., LEVA C., KONTOGIANNIS T., KAFKA P.

Human reliability analysis for reducing risk in an LPG treatment and storage plant. BRIS R., GUEDES SOARES C., MARTORELL S. (Eds.). *Reliability, risk and safety: theory and applications: proceedings of the ESREL 2009, 7-10 September 2009, Prague, Czech Republic. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 307-314.*

BRISSAUD F., CHARPENTIER D., BARROS A., BERENGUER C.

Design of complex safety-related systems in accordance with IEC 61508. BRIS R., GUEDES SOARES C., MARTORELL S. (Eds.). *Reliability, risk and safety: theory and applications: proceedings of the ESREL 2009, 7-10 September 2009, Prague, Czech Republic. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 1555-1562.*

LILLEHEIER T.

Strategies for handling common cause failures in complex safety instrumented systems. An example to illustrate different methods. BRIS R., GUEDES SOARES C., MARTORELL S. (Eds.). *Reliability, risk and safety: theory and applications: proceedings of the ESREL 2009, 7-10 September 2009, Prague, Czech Republic. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 1693-1699.*

LEGER A., LEVRAT E., WEBER P., LUNG B., DUVAL C., FARRET R.

Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2009, vol. 223, n° 4, pp. 313-332.*

CHINEAUX J., JANES A., SALLE B., PETIT J.M.

Conditions de formation d'une atmosphère explosive lors de la mise en œuvre d'un liquide inflammable. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2009, n° 216, pp. 23-31.*

VIGNES A., DUFAUD O., PERIN L., BOUILLARD J., THOMAS D.

De la validité des appareillages standards lors de la détermination des caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité de nanopoudres. *Actes du 12^e congrès de la SFGP, 14-16 octobre 2009, Marseille.*

VECHOT L., MINKO W., BIGOT J.P., KAZMIERCZAK M., VICOT P.

Analyse de l'emballage thermique d'un système chimique hybride non tempéré. *Actes du 12^e congrès de la SFGP, 14-16 octobre 2009, Marseille.*

KRAUSMANN E., CRUZ A.M., AFFELTRANGER B.

Natech accidents at industrial facilities. The case of the Wenchuan earthquake. HUANG C., WIENER J.B., NI J. (Eds.). *New perspectives on risk analysis and crisis response: Proceedings of the 2nd International conference on risk analysis and crisis response (RACR), 19-21 October 2009, Beijing, China. Paris: Atlantis Press, 2009, pp. 53-59.*

DUPRE M., ETIENNE J., LE COZE J.C.

L'interaction régulation/régulé : considérations à partir du cas d'une entreprise SEVESO II seuil haut. *Gérer & comprendre - Annales des Mines, 2009, n° 97, pp. 16-27.*

KLAIS O., WESTPHAL F., BENAÏSSA W., CARSON D.

Guidance on safety / health for process intensification including MS design; Part I: reaction hazards. *Chemical Engineering & Technology, 2009, vol. 32, n° 11, pp. 1831-1844.*

BENAÏSSA W., ELGUE S., GABAS N., CABASSUD M., CARSON D., DEMISSY M.

Dynamic behaviour of a continuous heat exchanger/reactor after flow failure. *International Journal of Chemical Reactor Engineering, 2008, vol. 6, article A23.*

MARTINAIS E., CHANTELAUVE G.

Identification et analyse des risques en entreprise : de l'approche déterministe à l'approche probabiliste. BRILHAC J.F., FAVRO K. (Eds.). *Planifier le risque industriel. Prévention - PPI - PPRI. Contrôle - responsabilité - zonage. Démarche volontaire des entrepreneurs. Paris: Victoires Éditions, 2009, pp. 30-42.*

RIVIERE C., MARLAIR G.

The use of multiple correspondence analysis and hierarchical clustering to identify incident typologies pertaining to the biofuel industry. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining, 2010, vol. 4, n° 1, pp. 53-65.*

LEGER A.

Contribution à la formalisation unifiée des connaissances fonctionnelles et organisationnelles d'un système industriel en vue d'une évaluation quantitative des risques et de l'impact des barrières envisagées. *Thèse de doctorat de l'Université Henri-Poincaré (Nancy 1). Présentée et soutenue publiquement le 28 mai 2009.*

NGUYEN Q.B.

Fiabilité des installations industrielles sous l'impact de fragments de structures. Effet Domino. *Thèse de doctorat de l'Université de Marne-la-Vallée. Présentée et soutenue publiquement le 20 mai 2009.*

PROUST C., LEPRETTE E.

The dynamics of vented gas explosions. *Conference proceedings of the 2009 AIChE spring national meeting & 5th global congress on process safety - 43rd Loss prevention symposium, 26-30 April 2009, Tampa, USA.*

BITEAU H.

Caractérisation des impacts thermiques et chimiques de matériaux énergétiques non susceptibles de détoner en masse. *Thèse de doctorat de l'Université d'Edimbourg. Présentée et soutenue publiquement le 21 décembre 2009.*

2010

DECHY N., DIEN Y., FUNNEMARK E., ROED-LARSEN S., STOOP J., VALVISTO T., VETERE ARELLANO A.L.

Results and lessons learned from the ESREDA's Accident Investigation Working Group: Introducing article to «Safety Science» special issue on «Industrial Events Investigation». *Safety Science. [accepté pour publication]*

FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.

On the prediction of thermal stability of nitroaromatic compounds using quantum chemical calculations. *Journal of Hazardous Materials, 2009, vol. 171, n° 1-3, pp. 845-850.*

STUDER E., JAMOIS D., JALLAIS S., LEROY G., HEBRARD J., BLANCHETIERE V.

Properties of large-scale methane / hydrogen jet fires. *International Journal of Hydrogen Energy, 2009, vol. 34, n° 23, pp. 9611-9619.*

TOGNETTI V., FAYET G., ADAMO C.

Can molecular quantum descriptors predict the butene selectivity in nickel(II) catalyzed ethylene dimerization? A QSPR study. *International Journal of Quantum Chemistry, 2009, vol. 110, n° 3, pp. 540-548.*

KLAIS O., WESTPHAL F., BENAÏSSA W., CARSON D.
Guidance on safety / health for process intensification including MS design; Part II: explosion hazards.
Chemical Engineering & Technology, 2009, vol. 32, n° 12, pp. 1966 - 1973.

ROTUREAU P., FAYET G., MARLAIR G., MICHOT C., JOUBERT L., ADAMO C.
Évaluation de l'explosibilité des substances chimiques : des approches expérimentales classiques à la prédiction par la chimie quantique et les méthodes statistiques QSPR.
Actualité Chimique, 2010, n° 337, pp. 51-58.

KLAIS O., WESTPHAL F., BENAÏSSA W., CARSON D.
Guidance on safety / health for process intensification including MS design; Part III: risk analysis.
Chemical Engineering & Technology, 2010, vol. 33, n° 3, pp. 444-454.

FAYET G., JOUBERT L., ROTUREAU P., ADAMO C.
A theoretical study of the decomposition mechanisms in substituted o-Nitrotoluenes
Journal of Physical Chemistry A, 2009, vol. 113, n° 48, pp. 13621-13627.

FAYET G., JACQUEMIN D., WATHELET V., PERPETE E.A., ROTUREAU P., ADAMO C.
Excited state properties from ground state DFT descriptors: A QSPR approach for dyes.
Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2010, vol. 28, n° 6, pp. 465-471.

BRISAUD F., BARROS A., BERENQUER C.
Probability of failure of safety-critical systems subject to partial tests.
Proceedings of the Annual reliability and maintainability symposium (RAMS), 25-29 January 2010, San-Jose, USA.

FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.
QSPR modeling of thermal stability of nitroaromatic compounds: DFT vs. AM1 calculated descriptors.
Journal of Molecular Modeling, 2010, vol. 16, n° 4, pp. 805-812.

LEFEBRE F., BOOTEN M., MEULENBRUGGE J., PENELON T., RINGLET J.P., KEMPENAERS S., SMEETS N., PAGANINI M.
SEVESEO : earth observation based services in support to industrial and technological risk management.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 1, pp. 33-39.

GOOIJER L., CORNIL N., LENOBLE C.
International benchmark study of a fictitious LPG plant - A comparison of the QRA approach of HSE (UK), RIVM (NL), INERIS (FR) and FPMs (Walloon Region Belgium).
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 1, pp. 137-144.

DESCOURRIERE S., CHAUMETTE S.
Land use planning around hazardous onshore pipelines: implementation of the French new principles.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 1, pp. 105-112.

RIVIERE C., MARLAIR G., VIGNES A.
Learning of the root factors of incidents potentially impacting the biofuel supply chains from some 100 significant cases.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 35-42.

BOUCHET S., KASPRZYCKI S., LEPINE N., MORIN J.C.
Evaluation of fixed point H2S gas detectors intended for use in industrial safety applications.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 483-486. [Poster]

FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.
Development of a new QSPR based tool to predict explosibility properties of chemical substances within the framework of REACH and GHS.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 387-390. [Poster]

ANTOINE F.
Assessment of the evaporation correlations performance.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 471-474. [Poster]

DI TOMMASO S., ROTUREAU P., VIGNES A., ALZERRECA M., BENAÏSSA W., ADAMO C.
Study of the peroxidation mechanism of diethyl ether (DEE).
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 327-333.

JANES A., MARLAIR G., ROTUREAU P.
Biodiesel: a case study of the impact of new rules regarding the classification and labelling of physical and chemical properties of chemicals.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 423-426. [Poster]

LEPRETTE E., REIMERINGER M., CARRAU A., MATHIEU I.
Mechanical and thermal effects of simultaneous LPG tanks explosions in Dagneux, France, may 7th 2007.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 335-342.

PENELON T., JAMOIS D., PROUST C.
Liquefied gas over water: an experimental approach at medium scale to assess gas/water interactions and vapor dispersion.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 203-210.

HOUSON I., AFFELTRANGER B., KLAIS O.
Incorporation of health safety and environmental considerations for multiscale processing during early decision making.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 241-248.

CALOGINE D., DUPLANTIER S.
Estimation of pollution by fire extinguishing water.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 391-394. [Poster]

VIGNES A., MUNOZ F., BOUILLARD J., DUFAUD O., PERRIN L., LAURENT A., THOMAS D.
Risk assessment of the ignitability and explosivity of aluminium nanopowders.
SUTER G., DE RADEMAEKER E. (Eds.). Loss prevention and safety promotion in the process industries: proceedings of the 13th international symposium, 6-9 June 2010, Brugge, Belgium. Antwerpen: Technologisch Instituut, 2010, vol. 2, pp. 187-194.

KLAIS O., ALBRECHT J., CARSON D., KRAUT M., LOB P., MINNICH C., OLSCHIEWSKI F., REIMERS C., SIMONCELLI A., UERDINGEN M.
Guidance on safety/health for process intensification including MS design. Part IV: Case studies
Chemical Engineering & Technology, 2010, vol. 33, n° 7, pp. 1159-1168.

KRAUSMANN E., CRUZ A.M., AFFELTRANGER B.
The impact of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake on industrial facilities.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, vol. 23, n° 2, pp. 242-248.

BITEAU H., FUENTES A., MARLAIR G., TORERO J.L.
The influence of oxygen concentration on the combustion of a fuel/oxidizer mixture.
Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, vol. 34, n° 3, pp. 282-289.

LACOME J.M., PROUST C.
Analysis of the dispersion of large unconfined clouds following a massive spillage of liquid helium on the ground.
ALBERGEL A. (Ed.). Proceedings of the 13th International conference on harmonisation within atmospheric dispersion modelling for regulatory purposes (HARMO 13), 1-4 June 2010, Paris, Boulogne-Billancourt: ARIA Technologies, 2010, pp. 477-481.

Risques du sol et du sous-sol

2009

GOMBERT P., FARRET R., LAHAIE F.

Adaptation des outils d'analyse de risques aux futurs complexes de stockage géologique de CO₂. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 2009, n° 213, pp. 142-154.

CHERKAOUI A., LOPEZ P.

CO₂ storage risk assessment: feasibility study of the systemic method MOSAR. GUARASCIO M., BREBBIA C.A., GARZIA F. (Eds.). *Safety and security engineering III*. Southampton: WIT Press, 2009, pp. 173-184.

GENSTERBLUM Y., VAN HEMERT P., BILLEMONT P., BUSCH A., CHARRIERE D., LI D., KROOSS B.M., DE WEIRED G., PRINZ D., WOLF K.H.A.A.

European inter-laboratory comparison of high pressure CO₂ sorption isotherms. I: activated carbon. *Carbon*, 2009, vol. 47, n° 13, pp. 2958-2969.

CAUVIN M., VERDEL T., SALMON R.

Modeling uncertainties in mining pillar stability analysis. *Risk Analysis*, 2009, vol. 29, n° 10, pp. 1371-1380.

DECK O., VERDEL T., SALMON R.

Vulnerability assessment of mining subsidence hazards. *Risk Analysis*, 2009, vol. 29, n° 10, pp. 1381-1394.

DIDIER C.

Postmining management in France: situation and perspectives. *Risk Analysis*, 2009, vol. 29, n° 10, pp. 1347-1354.

MOREL J., ARMAND G., REAUD V.

Feasibility of excavation of disposal cells in 500 meter deep clay formation. VRKLIJAN I. (Ed.). *Rock engineering in difficult ground conditions - Soft rocks and karst (EUROCK 2009): Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics (ISRM)*, 29-31 October 2009, Cavtat, Croatia. London: Taylor & Francis, 2010, pp. 561-566.

CHARRIERE D.

Caractérisation de la sorption de gaz sur les charbons. Application au stockage géologique du CO₂ dans les veines de charbons. *Thèse de doctorat de l'INP de Toulouse. Présentée et soutenue publiquement le 6 octobre 2009.*

THORAVAL A., GUGLIELMI Y., CAPP A F.

Caractérisation hydromécanique des fractures *in situ*. Développement d'une sonde amovible d'auscultation et amélioration des méthodes d'interprétation par simulations numériques 3D. *Revue Française de Géotechnique*, 2009, n° 128, pp. 35-45.

KOSECKI A.

Optimisation d'une source vibratoire pour la détection des cavités souterraines par sismique réflexion haute résolution. *Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lille. Présentée et soutenue publiquement le 7 décembre 2009.*

NGUYEN H.D.

Influence des interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités souterraines dans la craie. *Thèse de doctorat de l'ENPC. Présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 2009.*

2010

CONTRUCCI I., KLEIN E., LIZEUR A., LOMAX A., BENNANI M.

Management of post-mining large-scale ground failures : blast swarms field experiment for calibration of permanent microseismic early-warning systems. *Pure and Applied Geophysics*, 2010, vol. 167, n° 1-2, pp. 43-62.

MERCERAT E.D., DRIAD-LEBEAU L., BERNARD P.

Induced seismicity monitoring of an underground salt cavern prone to collapse. *Pure and Applied Geophysics*, 2010, vol. 167, n° 1-2, pp. 5-25.

BELEM T., SOULEY M., HOMAND F.

Method for quantification of wear of sheared joint walls based on surface morphology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2009, vol. 42, n° 6, pp. 883-910.

KOSECKI A., PIWAKOWSKI B., DRIAD-LEBEAU L.

High resolution seismic investigation in salt mining context. *Acta Geophysica*, 2010, vol. 58, n° 1, pp. 15-33.

BALLAND C., REAUD V.

High-resolution velocity field imaging around a borehole: excavation damaged zone characterization. *Geophysics*, 2009, vol. 74, n° 6, pp. E223-E232.

CHARRIERE D., POKRYSZKA Z., BEHRA P.

Effect of pressure and temperature on diffusion of CO₂ and CH₄ into coal from the Lorraine basin (France). *International Journal of Coal Geology*, 2010, vol. 81, n° 4, pp. 373-380.

CHARRIERE D., BEHRA P.

Water sorption on coals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 344, n° 2, pp. 460-467.

CHARMOILLE A., BECH F., DAUPLEY X., GOMBERT P.

Tracking the space-time evolution of a karstic system with fast dissolution kinetics developed in gypsum formations. ANDREO B., CARRASCO F., DURAN J.J., LAMOREAUX J.W. (Eds.). *Advances in research in Karst media: proceedings of the 4th international symposium on Karst*, 27-30 April 2010, Malaga, Spain. Berlin: Springer, 2010, pp. 343-348. (*Environmental earth sciences*)

GOMBERT P., GRANIER D., DE SEZE R., PANDARD P., GONDELLE F., EL KOUKALY F., BENKADA F.Z., TOUSSAINT R.

Toxicity and ecotoxicity of by-products degradation of fluorescent tracers in the karstic chalk of Normandy (France). ANDREO B., CARRASCO F., DURAN J.J., LAMOREAUX J.W. (Eds.). *Advances in research in Karst media: proceedings of the 4th international symposium on Karst*, 27-30 April 2010, Malaga, Spain. Berlin: Springer, 2010, pp. 275-280. (*Environmental earth sciences*). [Poster]

GOMBERT P., CHARMOILLE A., DIDIER C., D'HOTELANS R.

Impact of the expected climate change on the stability of underground cavities in France. ANDREO B., CARRASCO F., DURAN J.J., LAMOREAUX J.W. (Eds.). *Advances in research in Karst media: proceedings of the 4th international symposium on Karst*, 27-30 April 2010, Malaga, Spain. Berlin: Springer, 2010, pp. 521-526. (*Environmental earth sciences*). [Poster]

GOMBERT P., AUDRA P.

Bordure cévenole rurasique ardéchoise : ressource et évolution de l'aquifère. AUDRA P. (Dir.). *Grottes et karsts de France. Association française de karstologie : 2010*, pp. 296-297. (*Karstologia Mémoires*, n° 19)

RAYNAUD S., VASSEUR G., CELERIER B., LOGGIA D., GHOREYCHI M., MATHON M.H., MAZEROLLE F.

Experimental study of the relation between the permeability of kaolinite and its deformation at micro and macro scale. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, vol. 47, n° 4, pp. 559-567.

BROSSE E., BADINIER G., BLANCHARD F., CASPARD E., COLLIN P.Y., DELMAS J., DEZAYES C., DREUX R., DUFURNET A., DURST P., FILLACIER S., GARCIA D., GRATALOUP S., HANOT F., HASANOV V., HOUEL P., KERVEVAN C., LANSIART M., LESCANNE M., MENJOZ A., MONNET M., MOUGIN P., NEDELEC B., POUTREL A., RACHEX X., RENOUX P., RIGOLLET C., RUFFIER-MERAY V., SAYSET S., THINON I., THORAVAL A., VIDAL-GILBERT S.

Selection and characterization of geological sites able to host a pilot-scale CO₂ storage in the Paris basin (PICOREF). *Oil and Gas Science and Technology. [accepté pour publication]*



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



MIXTE
Papier issu de
sources responsables
FSC® C014475



ISSN 1765-1379 - Dépôt légal : novembre 2010

Imprimé sur Symbol Freelifife sans chlore issu de forêts gérées durablement.



*maîtriser le risque
pour un développement durable*

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