

2008 - 2009

Rapport Scientifique



INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Sommaire

- 01 Avant-propos**
Vincent Laffèche, Directeur général
- 02 Stratégie de recherche**
 - 06** Faits marquants 2008-2009
 - 08** Programmes 190
 - 09** Programmes de recherche soutenus par l'ANR
 - 10** L'INERIS, partenaire de 25 programmes européens
 - 11** Sujets de thèses publiés en 2009
 - 12** Gouvernance scientifique
 - 13** Les Commissions scientifiques
 - 15** Indicateurs du Contrat d'objectifs 2006-2010
- 16 Éco-Toxicologie**
 - 17** Stratégie de recherche
 - 18** Recherche et identification de polluants chimiques perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques : approche bio-analytique
 - 21** La modélisation en écotoxicologie
 - 24** Neurotoxicité sur le système nerveux central
- 28 Air**
 - 29** Stratégie de recherche
 - 30** Modélisation et surveillance de la qualité de l'air : de nouvelles données d'observation pour l'amélioration des modèles
 - 33** Mise au point d'une nouvelle méthode de prélèvement pour l'analyse des composés organiques semi-volatils
 - 36** Détection en temps réel de nanoparticules par spectroscopie de plasma induit par laser
- 40 Sols Pollués et risques autour des installations classées**
 - 41** Stratégie de recherche
 - 42** Évaluation de l'impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères utilisés en technique routière
 - 45** Validation d'un test de mesure de la bioaccessibilité des éléments traces métalliques dans les sols pollués
 - 48** Évaluation des risques environnementaux : analyse critique de l'approche méthodologique européenne (TGD) à partir d'un exemple d'application *in situ*
 - 51** Améliorer les méthodes d'estimation prospective de l'exposition aux polluants des populations autour d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
- 56 Explosions**
 - 57** Stratégie de recherche
 - 58** Développement des biocarburants et enjeux de sécurité liés aux procédés de production et à la distribution
 - 63** Nanoris : étude des risques d'explosion liés à la production et l'utilisation de nanoparticules
 - 66** Prédiction des mécanismes d'accélération de la combustion dans les atmosphères explosives (EXPRES)
 - 69** Recherche partenariale avec Fike Corp., ICT, LCD
- 72 Facteur Humain**
 - 73** Stratégie de recherche
 - 74** DIRIS : utilisation des diagrammes d'influence dans l'analyse des risques pour les installations industrielles
 - 77** La méthode Oméga 20
- 80 Sécurité globale et malveillance**
 - 81** Stratégie de recherche
 - 82** Méthodes intégrées d'évaluation des risques et des menaces. Programmes européens SECURE SITE et IMPROVE
 - 84** Le Groupement scientifique AGEGRIS
 - 86** Programme REALEX - Évaluation des risques et expertise en temps réel pour la gestion des crises NRBC
- 88 Prévention des risques de mouvements de terrain**
 - 89** Stratégie de recherche
 - 90** Caractérisation et prédiction du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés
 - 92** Surveillance de l'évolution d'une cavité saline jusqu'à son effondrement
 - 95** Impact des mouvements de terrains sur les bâtis et les infrastructures
- 98 Stockage du CO₂**
 - 99** Stratégie de recherche
 - 100** Vers une méthode d'analyse des risques globale de la filière CSC, intégrant plusieurs échelles de temps
 - 104** Faisabilité du stockage du CO₂ en gisement houiller et étude de l'adsorption du CO₂ sur le charbon
 - 107** Évaluation de l'impact mécanique d'un stockage de CO₂ dans un aquifère du bassin parisien
- 109 Publications**



Vincent LAFLÈCHE, Directeur général

Valérie Pécresse, ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche, a présenté en septembre dernier, la première édition de la stratégie nationale de recherche et d'innovation pour permettre à la France de mieux répondre aux attentes et besoins de la société, et faire face à la compétition scientifique et économique mondiale. La maîtrise des risques et le renforcement de la sécurité est l'une des cinq priorités mises en exergue, dimension privilégiée de l'innovation technologique.

Contribuer à la maîtrise des risques technologiques connus ou émergents, axe essentiel des activités de l'INERIS, constitue la priorité de son contrat d'objectifs 2006-2010. Au cœur de sa mission depuis bientôt 20 ans, il met cette expertise au service de l'innovation, pour accompagner, dans le cadre de la recherche partenariale, le développement de nouveaux produits ou procédés pour les rendre directement propres et sûrs.

Les grands problèmes environnementaux – effet de serre anthropogénique, érosion de la biodiversité, perturbateurs endocriniens... – ont mis l'accent sur les risques nouveaux attachés au progrès technique. Ces derniers sont parfois qualifiés « d'indirects » car la connaissance qu'en a le citoyen provient de témoignages et non pas d'une observation personnelle ; difficiles à appréhender, ils peuvent être générateurs de suspicion voire de peur. Le Professeur Ortwin Renn pointe la nécessité pour l'expert, pour être crédible auprès des citoyens, de développer leur confiance. « Créer la confiance dans les institutions en charge de l'évaluation et du management des risques : donner aux citoyens l'assurance que les structures de gouvernance des risques sont capables de gérer les risques d'une manière efficace, juste et acceptable (cette crédibilité est cruciale lorsque les citoyens n'ont pas par eux-mêmes l'expérience de ces risques et ont besoin d'une information neutre et impartiale). »⁽¹⁾

La gouvernance scientifique et technique de l'INERIS évolue vers la création d'un comité d'orientation stratégique auquel participeront les différentes parties prenantes. Cet espace est de nature à développer la confiance et assurer à l'institut la crédibilité nécessaire à l'accomplissement de sa mission dans l'accompagnement de l'innovation.

In September of this year, the French higher education and research minister Valérie Pécresse presented the first part of a national research and innovation strategy to allow France to respond more effectively to the expectations and needs of society, and to keep up with global scientific and economic competition. Managing risks and reinforcing safety is one of the five priorities highlighted in this plan and is a privileged dimension of technological innovation.

Contributing to the management of known or emerging technological risks is a key aspect of the work of INERIS and is the priority of its contract of objectives for 2006-2010. With almost 20 years of experience in this field, it puts this expertise at the service of innovation, via partnerial research, to help develop new products or procedures and make them directly clean and safe.

The major environmental problems – anthropogenic greenhouse effect, erosion of biodiversity, endocrine disruptors, etc. – have highlighted the new risks attached to technical progress. These risks are sometimes described as 'indirect' since the public's knowledge of them comes from other sources rather than personal observation; they are difficult to grasp and can generate suspicion or even fear. Professor Ortwin Renn underlines the necessity for experts, in order to be credible, to build up public trust. "Creation of confidence in institutions responsible for the assessment and management of risk: give people the assurance that the existing risk governance structures are capable of handling risks in an effective, efficient, fair and acceptable manner (such credibility is crucial in situations in which there is a lack of personal experience and people depend on neutral and disinterested information)."⁽¹⁾

The scientific and technical governance of INERIS is developing towards the creation of a strategic steering committee which will bring together the different parties concerned. The creation of such a committee should increase confidence and give the institute the credibility required to accomplish its mission to support innovation.

(1) « Risk governance towards an integrative approach », livre blanc de l'International Risk Governance Council, 2005, p. 57.

(1) "Risk governance towards an integrative approach" white paper by the International Risk Governance Council, 2005, p.57.



Pierre Toulhoat, Directeur scientifique

La fin de l'année 2008 et le début de l'année 2009 ont permis de constater que les thèmes de recherche de l'INERIS font l'objet d'attentes de plus en plus pressantes. Ces thèmes suscitent une mobilisation massive impliquant les autres acteurs de la recherche, mais aussi les industriels, et de plus en plus directement la société civile, à travers l'évolution de la gouvernance scientifique de l'Institut et l'implication accrue des parties prenantes.

L'INERIS a renforcé de manière visible en 2008 et 2009 ses partenariats au niveau régional. Outre l'unité mixte PériTox avec l'Université de Picardie Jules-Verne, l'INERIS s'est impliqué dans la fondation universitaire de l'UTC, plus particulièrement dans un volet spécifique consacré à la toxicologie et l'écotoxicologie, doté pour l'instant de 3,5 millions d'euros. Opérationnelle depuis le début de 2009, cette fondation a déjà à son actif des réalisations concrètes, notamment une chaire « Modélisation mathématique et biologie systémique pour la toxicologie prédictive » dirigée par Frédéric Bois, expert internationalement reconnu du domaine.

Sur le site de l'INERIS à Verneuil-en-Halatte, la plateforme expérimentale Animex sera réceptionnée fin 2010. Cet outil est essentiel pour la mise au point et la validation des méthodes développées en toxicologie prédictive. Ces réalisations concrétisent d'ores et déjà la mise en place du Pôle National Applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie en Sud-Picardie, dont la création avait été recommandée par le Comité Opérationnel Recherche du Grenelle de l'Environnement. Pour accélérer le développement de ce pôle, et assurer une synergie avec les acteurs nationaux, l'INERIS a reçu en 2009 une subvention exceptionnelle de 5 millions d'euros, dont 3,2 millions d'euros sont affectés à un consortium de recherche, organisé en neuf équipes projet associant les principaux acteurs nationaux de la toxicologie de l'écotoxicologie.

L'INERIS participe à l'élaboration de stratégie nationale de recherche en toxicologie et écotoxicologie en lien avec le ministère de la Recherche et de l'Enseignement supérieur. La création du réseau

During late 2008 and early 2009, we were able to perceive that the research themes of INERIS were the subject of increasingly insistent expectations. These themes give rise to massive mobilization involving other actors in research, and also industrialists, and more and more civil society, through the development of scientific governance in the Institute and increased involvement on behalf of interested parties.

In 2008 and 2009, INERIS visibly reinforced its partnerships on a regional level. In addition to the mixed unit PERITOX with the «Université de Picardie Jules-Verne», INERIS got involved in the university foundation of the UTC, more particularly in a specific aspect dedicated to toxicology and ecotoxicology, endowed with 3.5 M€ for the time being. Operational since early 2009, this foundation has practical achievements to its credit, notably a chair of « Mathematical modelling and systemic biology for predictive toxicology » led by Frédéric Bois, an internationally recognized expert in this field.

On the INERIS site in Verneuil en Halatte, the experimental platform Animex will be received at the end of 2010. This tool is essential for finalizing and validating methods developed in predictive toxicology. These achievements are already materialized by the setting up of the «Pôle National Applicatif en Toxicologie et Ecotoxicologie en sud-Picardie» (National Application Center for Toxicology and Ecotoxicology in South Picardie), the creation of which had been recommended by the «Comité Opérationnel Recherche du Grenelle de l'environnement» (Operational Research Committee of the Government Environmental Round Table). In order to accelerate development of this centre and provide synergy with national actors, INERIS received in 2009 an exceptional subsidy of 5 M€, including 3.2 M€ affected to a research consortium, organized into 9 project teams associating the main national actors in the field of toxicology and ecotoxicology.

INERIS participates in the elaboration of a national strategy for research in toxicology and ecotoxicology in line with the «Ministère

ANTIOPEs à l'initiative de l'INERIS, en 2008, a été un facteur de cohésion et d'articulation des principaux acteurs (INSERM, CEA, INRA, CNRS).

Dans ce domaine, les enjeux stratégiques sont incarnés par l'évolution réglementaire européenne en vue de la protection de l'environnement et des populations, à savoir la Directive Cadre sur l'Eau et le règlement REACH. L'INERIS, en lien avec ses partenaires du réseau AQUAREF et l'ONEMA, veille à ce que les résultats de la recherche et le progrès des connaissances conduisent à définir les meilleures manières d'atteindre les objectifs de bon état écologique des milieux aquatiques et de garantir la qualité des mesures et de la surveillance.

En ce qui concerne le règlement REACH, l'INERIS a joué un rôle moteur pour animer la réflexion nationale portant sur les réponses de la recherche aux demandes des industriels et des pouvoirs publics en matière de sécurité et d'impact des produits chimiques. Cette animation s'est effectuée conjointement avec le CNRS dans le cadre de l'atelier de réflexion prospective ARP PRO-REACH, mis en place par l'ANR, dont le rapport a été présenté le 24 septembre 2009. Les besoins, recommandations et priorités ont été élaborés et mis en forme par les chercheurs de divers organismes et les industriels.

de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur» (Ministry for Research and Higher Education). The creation of the ANTIOPES network on the initiative of INERIS, in 2008, was a cohesion and coordination factor for the main actors (INSERM, CEA, INRA, CNRS).

In this field, strategic issues are embodied by the change in European regulations for protecting the environment and populations, i.e. the Water Framework Directive and the REACH regulation. INERIS, in line with its partners of the AQUAREF network, and ONEMA ensure that results from research and knowledge progress lead to defining better ways for achieving the goals of good ecological status of water environments and of guaranteeing the quality of the measurements and monitoring.

As regards the REACH regulation, INERIS acted as a drive for moderating national debate on the answers given by the research community to the demands of industrialists and public authorities pertaining to safety and impact of chemicals. This moderation was carried out together with the CNRS within the framework of the prospective think-tank workshop ARP PRO REACH, set up by ANR, the report of which was presented on September 24th 2009. The needs, recommendations and priorities were drawn up and formatted by researchers from various organizations and industrialists.

INTERVIEW DE VÉRONIQUE BACH

Professeur des Universités à l'Université de Picardie Jules-Verne

“ Mettre en synergie leurs compétences complémentaires...”

En tant que responsable de l'équipe « PeriTox », pouvez-vous nous expliquer l'originalité de cette structure mixte hospitalo-universitaire qui associe l'INERIS et l'Université de Picardie Jules-Verne ?



PeriTox (Périnatalité et risques toxiques) est la première unité mixte entre une université et l'INERIS. Créée en 2008, elle regroupe 45 personnes (universitaires de l'Université de Picardie Jules-Verne, ingénieurs de l'INERIS et médecins du CHU d'Amiens). L'objectif est de mettre en synergie leurs compétences complémentaires en regroupant des physiologistes, des biologistes, des modélisateurs toxicologues, des pédiatres, des gynécologues. Les thématiques de recherches sont centrées sur les effets des toxiques et physiques environnementaux sur la santé et le développement des fonctions vitales des populations sensibles que sont les enfants et les femmes enceintes. Ces problématiques s'inscrivent dans une perspective de protection des futures générations et dans les objectifs du Plan National Santé Environnement et du Grenelle de l'Environnement.

Cette synergie créée au niveau régional, est un des éléments constitutifs du Pôle national Applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie. Elle permet également de fédérer les enseignements dispensés au niveau de l'Université de Picardie Jules-Verne (IUP Ingénierie de la Santé).

<http://www.u-picardie.fr/labo/peritox>

INTERVIEW DE LAURENT PEROTIN

Chef du département
« Laboratoire National d'Hydraulique
et Environnement », EDF R&D



“ Ces développements
ont vocation à être partagés
largement...”

EDF et l'INERIS collaborent au développement d'une station mobile de biosurveillance des impacts environnementaux des rejets industriels sur le milieu naturel (MIRE).

Pouvez-vous nous dire en quoi il est fructueux pour EDF de travailler en recherche partenariale avec l'INERIS sur la station MIRE ?

EDF travaille avec l'INERIS au développement de cette station de biosurveillance dans la logique de la Directive Cadre sur l'Eau (bon état biologique des masses d'eau). L'objectif est pour nous d'évaluer avec le plus de réalisme possible les impacts éventuels de nos rejets, élément déterminant pour le choix de nos stratégies industrielles, au-delà du strict respect des réglementations.

Une telle station de biosurveillance, dont il n'existe pas d'équivalent à l'heure actuelle, pourrait être largement utilisée au-delà d'EDF et de l'INERIS, par d'autres industriels et instituts scientifiques et techniques, notamment : ces développements ont vocation, selon nous, à être partagés le plus largement possible avec les différents acteurs.

Nous avons souhaité travailler sur ce projet avec l'INERIS, compte tenu de ses compétences scientifiques et techniques en écotoxicologie, reconnues au niveau national et international, et compte tenu des outils à la pointe (laboratoires, méso-cosmes...) dont dispose l'Institut dans ce domaine.

L'accompagnement du développement des nouvelles technologies et filières sur le plan de la sécurité et de la maîtrise des impacts est un axe stratégique majeur de l'INERIS. Des programmes de recherche partenariale ont été engagés avec les acteurs économiques pour que l'innovation soit directement sûre et propre. La plateforme STEEVE (STockage d'Énergie Electrochimique pour Véhicules Électriques), en partenariat avec EDF, le CEA et le CNRS, s'inscrit dans ce contexte avec pour objectif la mise en commun de compétences et de moyens pour développer une filière de stockage électrochimique sûre.

Suite à l'appel à projets coordonné par l'ADEME fin 2008, l'INERIS a participé au montage de propositions relatives aux démonstrateurs pour le captage et le stockage du CO₂, avec des volets spécifiques sur la sécurité des installations et procédés, mais aussi sur l'évaluation des risques à moyen et long terme. Dans le domaine des risques sols et sous-sols, on peut rappeler également le suivi de l'ennoyage de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt. Avec cette étude, l'Institut a validé non seulement ses réseaux de surveillance et d'alerte, mais a aussi progressé dans la capacité à détecter des signaux faibles significatifs d'une évolution brutale potentiellement dangereuse. Pour la gestion des situations à risques, ces informations ont été aussi très précieuses pour nos équipes et leurs partenaires (exploitants, administration).

Ce rapport illustre comment la recherche permet d'asseoir et de renouveler notre capacité d'expertise et ce, sur les principaux domaines d'intervention. Ainsi, les résultats de recherche sur la détection des perturbateurs endocriniens et leurs effets sont utilisés pour valider des outils opérationnels pour la biosurveillance, mais aussi pour renforcer la capacité de nos équipes à intervenir sur le terrain.

D'autres thèmes exposés dans ce rapport nécessitent le développement d'approches interdisciplinaires. Ainsi, les recherches menées sur le facteur humain et organisationnel font appel aux sciences humaines et sociales en interaction avec les sciences de l'ingénieur. Elles permettent de proposer des évolutions des approches de management de la sécurité, dans un contexte où il est avéré que les facteurs humains ou organisationnels jouent un rôle prédominant dans la genèse des accidents industriels.

Enfin, l'émergence des questions liées à la malveillance et aux atteintes à la sécurité des installations et infrastructures a généré des questions de recherche, et suscité la mise au point de méthodologies qui sont traitées dans des projets collaboratifs coordonnés par l'INERIS à l'échelle nationale (ANR REALEX) ou européenne (FP7 SECURE SITE).

INTERVIEW DE OLIVIER SALVI

Chargé de mission Développement international à l'INERIS

“ Potentiellement, nous avons plus de deux mille experts en réserve ! ...”



Quelle est l'originalité de l'Institut européen EU-VRI ? Quels sont les succès EU-VRI depuis sa création en 2006 ?

EU-VRI est l'Institut Virtuel Européen pour la Gestion Intégrée des Risques*. C'est un groupement européen d'intérêt économique, donc une entité légale, fondée autour de cinq membres fondateurs : INERIS, Steinbeis, BZF, Université de Stuttgart et Technologica. Il regroupe aujourd'hui une quarantaine de membres associés, représentant plus de vingt pays, et issus de la recherche ou de l'industrie. L'originalité réside dans la capacité à combiner les diverses expertises et expériences des membres de EU-VRI en fonction des besoins. Selon le client et la question posée, nous invitons les experts en sciences du risque les plus pertinents et nous organisons une équipe projet pour la durée de l'étude. C'est en ce sens que l'Institut est virtuel : il y a peu de personnes directement employées par EU-VRI, mais potentiellement, nous avons plus de deux mille experts en réserve ! ... à la fois dans les sciences de l'ingénieur, les sciences économiques, les sciences humaines...

Ces caractéristiques ont été décisives pour l'obtention du contrat avec la Commission européenne pour l'étude F-Seveso sur la mise en œuvre de la directive Seveso II (voir www.f-seveso.eu-vri.eu). Le fait d'être une même entité légale, mais également un réseau organisé derrière des objectifs communs, a joué un rôle déterminant dans l'obtention de la coordination des projets de recherche iNTeg-Risk et Alfa-Bird lors du premier appel du 7^e PCRD. EU-VRI, en tant que secrétariat exécutif de la plateforme ETPIS, a également été invité dans des projets, comme cela a été le cas pour Nanodevice, pour assurer la dissémination et l'exploitation des résultats.

* EU-VRI, European Virtual Institute for Integrated Risk Management. (EEIG)
<http://www.eu-vri.eu>

Accompanying development of new technologies and sectors as regards safety and control of impacts is a major strategic focus for INERIS. Partnership research programs have got under way with economic actors in order that innovation should be safe and clean directly. The STEEVE (Electrochemical energy storage for electric vehicles) project platform in a partnership with EDF, CEA and CNRS, is an integral part of this background with the goal of sharing skills and means in common for developing a safe electrochemical storage sector.

As a result of a call for projects coordinated by ADEME at the end of 2008, INERIS participated in elaborating proposals relating to prototypes for collecting and storing CO₂, with specific sections on the safety of the facilities and methods, but also on the assessment of medium to long term risks. In the field of ground and underground risks, let us recall the follow-up of the flooding of the salt cavity of Cerville Buissoncourt. With this study, the Institute not only validated their monitoring and alert networks, but made progress in their capability of detecting weak signals indicative of potentially dangerous sudden ground movements. For managing risk situations, this information was very valuable for our teams and partners (operators, administration).

This report illustrates how our know-how capability and its renewability are based on our research and this in the different fields where we intervene. Thus, research results on detection of endocrine disrupters and their effects are used for validating operational tools for biomonitoring, but also for reinforcing on-site intervention capability of our teams.

Other themes discussed in this report require the development of interdisciplinary approaches. Investigations on human and organizational factors thus resort to humanities and social sciences interacting with engineering sciences. Changes in approaches by management to safety may thereby be suggested, in a context where it is found that human and organizational factors play a primordial role in the origin of accidents in industry.

Finally, emergence of issues related to malevolence and to breaches in the safety of installations and infrastructures has generated new research topics and has inspired development of methodologies which are handled in collaborative projects coordinated by INERIS on a national level (ANR REALEX) or a European level (FP7 SECURE SITE).

Panorama 2008-2009 des principaux faits marquants

Signature de l'accord avec le CEA sur la Nanotoxicologie

Hervé Bernard, administrateur général adjoint du CEA et Vincent Lafflèche, directeur général de l'INERIS ont signé le 14 novembre 2008 un accord-cadre de collaboration axé, en particulier, sur la connaissance, la prévention et la maîtrise des risques associés aux nanoparticules et aux nanopoudres.



Cet accord entre l'INERIS et le CEA fait suite à un précédent partenariat, signé en juin 2005, qui avait pour principal objet la maîtrise des risques liés au développement de la filière « énergie hydrogène ». Le nouvel accord élargit la collaboration à de nouveaux thèmes. Au-delà des recherches communes sur les nanoparticules et les nanopoudres, les deux organismes prévoient de partager également leurs connaissances dans les domaines suivants :

- les risques associés aux champs magnétiques intenses (mis en œuvre dans les installations d'imagerie médicale, les accélérateurs de particules et le futur réacteur de fusion ITER) ;
- la toxicologie des métaux ;
- les risques liés aux matières explosives chimiques, en état liquide et gazeux, tels que l'hydrogène ;
- la surveillance de l'environnement associant capteurs et protection de l'environnement.

Mise en place d'une équipe mixte INERIS-UPJV : PériTox (périnatalité et risques toxiques)

La DGES (Direction Générale de l'Évaluation Scientifique) a reconnu dans le cadre du contrat quadriennal 2008-2011 entre le ministère de la Recherche et l'Université de Picardie Jules-Verne une équipe mixte INERIS-UPJV intitulée « PériTox : Périnatalité et Risques Toxiques », ayant pour directrice le Professeur Véronique Bach.

Cette première, à l'échelle nationale, concrétise de fait l'entrée en phase opérationnelle du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie. PériTox consacrera ses travaux à l'étude des effets sur le système nerveux, reproducteur et pulmonaire de l'exposition *in utero* ou dans la période néonatale à des toxiques environnementaux.

L'INERIS a une mission de recherche et d'expertise consistant à évaluer l'impact des substances toxiques, biologiques et des nuisances physiques de l'environnement sur la santé afin de prévenir et de réduire les risques pour l'Homme.

Cette reconnaissance d'une équipe mixte UPJV-INERIS fait suite à une collaboration étroite depuis 2000 entre l'équipe universitaire Environnement Toxique Périnatal – Adaptations Physiologiques et Comportementales (Pr J.P. Libert) et l'unité TOXI de l'INERIS (Dr René de Sèze). Cette collaboration est renforcée par une forte complémentarité au sein des enseignements (master d'Ingénierie de la Santé : M. Fréville).

Lancement d'un programme en Toxicologie et Écotoxicologie dans le cadre de la Fondation UTC

Le 25 septembre 2008, a été lancée la Fondation UTC pour l'innovation, comptant parmi ses tous premiers membres fondateurs, l'INERIS. Cette fondation a notamment pour objectif de soutenir le développement en Picardie du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie. L'INERIS et l'UTC lancent, pour la période 2009-2011, un programme d'activités centré sur des objectifs appliqués découlant du règlement REACH et du Grenelle de l'Environnement : développer une toxicologie et une écotoxicologie prédictives, réduisant ainsi le recours à l'expérimentation animale et étant plus efficace dans la détection des risques émergents ; améliorer les outils de biosurveillance pour les espèces végétales, animales et pour l'homme. Ces actions concourent aussi directement aux politiques environnementales comme la directive-cadre sur l'eau (DCE).

L'objectif scientifique commun de ces actions est de combiner des approches *in vitro*, *in vivo* et *in silico* aux différentes échelles du vivant pour proposer de nouveaux outils d'analyse toxicologique et écotoxicologique applicables à la surveillance des milieux et à la prédiction des dangers de substances ou agents physiques. Outre le développement de la recherche et de la formation sur le couplage de modèles *in silico* aux données expérimentales générées *in vitro*, une chaire de modélisation a été mise en place.

Accord-cadre INERIS/ONEMA

L'INERIS a signé le 19 mai 2008 un accord-cadre avec l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), pour engager des actions communes de recherche et d'expertise en matière de lutte contre les pollutions chimiques dans les milieux aquatiques. L'axe de collaboration concerne quatre domaines clés : la fixation des seuils admissibles pour les polluants ; l'établissement d'un système de mesure fiable ; la progression des connaissances pour agir à la source ; la mise au point de biomarqueurs. Un séminaire technique INERIS/ONEMA a réuni, le 16 septembre 2008, une quarantaine de personnes autour des activités que l'INERIS mène dans le domaine de la qualité des eaux en support à la directive-cadre européenne sur l'eau (DCE).

**FLUMilog :
une première mondiale**

L'INERIS a organisé le 26 septembre 2008 un essai d'incendie d'entrepôt logistique à grande échelle. Une plateforme de 860 m², d'une hauteur de 12 mètres, dotée de structures métalliques et contenant 300 tonnes de palettes de bois, a été incendiée devant



quelque 300 personnes (élus, journalistes, industriels, chercheurs) dans le cadre du programme FLUMilog (FLUX éMis par un incendie d'entrepôt logistique). Les flammes ont atteint 15 à 20 mètres de hauteur et une température de 800°C près du point d'allumage. Un dispositif impressionnant de capteurs y a été installé : 200 thermocouples, une cinquantaine de fluxmètres et 20 caméras. Des éléments précieux ont été fournis pour valider la méthode de calcul de référence mise au point par l'Institut et validée par l'ensemble des acteurs concernés par la maîtrise du risque d'incendie des plateformes logistiques. En effet, il n'existe aucune méthode de référence pour évaluer l'impact des flux thermiques lors d'un incendie d'entrepôt, chaque bureau d'études appliquant sa propre formule. Cette première mondiale constitue

le point d'orgue du programme FLUMilog initié par l'INERIS en 2006 et conduit avec deux partenaires principaux : le CNPP et le CTICM. Elle a nécessité deux ans de préparation pour une équipe d'une quarantaine d'ingénieurs. Grâce au modèle, les distances de sécurité en vigueur actuellement autour des entrepôts logistiques pourraient être réduites, un enjeu crucial en termes de foncier.

Colloque Cavités souterraines

On estime aujourd'hui que 500 000 cavités souterraines (mines, carrières, cavités naturelles) présentent un risque d'effondrement. Tous les départements sont concernés par ce risque dit « invisible » et une commune sur deux est potentiellement soumise à cet aléa. Depuis une dizaine d'années, l'INERIS,



en appui technique au MEEDDM, en améliore la connaissance. Il a organisé à l'attention des collectivités locales un colloque, les 8 et 9 octobre 2008, pour comprendre ce phénomène et en saisir les enjeux. Réunis au CNAM (Paris), les quelque 120 participants du colloque « Les collectivités locales face au risque cavités souterraines » ont pu apprécier le panorama d'outils mis à leur disposition par l'INERIS qui permettent de mettre en place une politique de prévention adéquate, notamment le Fonds de prévention des risques naturels majeurs et les Plans de prévention des risques naturels.

L'INERIS, acteur du dispositif NANO-INNOV

Le plan « Nanotechs » Nano-INNOV, présenté le 5 mai 2009 par Valérie Pécresse, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, consacrera 70 millions d'euros en 2009 pour mettre en place une stratégie d'innovation dans les nanotechnologies. Ces moyens viennent s'ajouter aux efforts financiers déjà

consentis ou prévus pour soutenir les actions de recherche dans le cadre notamment de l'Agence Nationale de la Recherche. La répartition des crédits de recherche de Nano-INNOV est placée sous la responsabilité d'un comité de pilotage composé de trois collèges d'égalité représentation (nanosciences, nanotechnologies, industriels). Ce Comité, dans lequel l'INERIS est représenté (collège nanotechnologies), aura également un rôle de proposition dans l'élaboration de projets de recherche collectifs au plan national ou européen ainsi qu'en matière d'amélioration de la connaissance du grand public sur les nanotechnologies, leurs utilisations et leur gouvernance. L'INERIS est engagé depuis plusieurs années dans la dynamique de recherche pour un développement maîtrisé des nanotechnologies. En association avec d'autres organismes publics ou partenaires industriels, il participe à plusieurs programmes concernant la Toxicologie, l'Écotoxicologie ainsi que la mise au point de méthodes de mesures et l'étude des conditions de sécurisation des installations de production. La nanotoxicologie constitue, par ailleurs, la thématique centrale d'un nouvel accord de collaboration signé avec le CEA pour la période 2008-2011.



LES FEMMES ET LA SCIENCE

Soutenue le 28 octobre 2008 à Nancy, la thèse de Cécile Clément sur la stabilité des fronts rocheux a été récompensée par un prix attribué dans le cadre du concours « Les femmes et la science » de L'Oréal et l'UNESCO. L'objectif est d'appréhender, sur le site du versant rocheux de Valabres (Alpes-Maritimes), les variations thermiques en tant que facteurs préparatoires aux éboulements des fronts rocheux, thématique rarement abordée dans la littérature scientifique.

Programmes 190

Liste au 31 décembre 2008 des programmes de recherche en cours

- Plasticité génomique et toxicité des perturbateurs endocriniens.
- Étude des effets des perturbateurs endocriniens sur le développement précoce des poissons.
- Intégration probabiliste pour l'assimilation statistique de données d'observation dans les modèles de qualité de l'air.
- Évaluation de l'impact des perturbateurs endocriniens sur les milieux aquatiques.
- Exposition humaine aux PUF.
- Modélisation du comportement et de l'impact des déchets sur les sols dans le scénario de stockage ou de valorisation.
- Toxicité locale et systémique des nanoparticules (NANOTOX).
- Nouvelles cibles cellulaires et moléculaires des HAP : identification, validation et modélisation du risque cancérigène.
- Libération Accidentelle des produits dangereux transportés par CANalisation (LACAN).
- Réalité virtuelle au service du management des risques et des «Facteurs Humains».
- Knowledge Management pour la Gestion des Risques (KMGR).
- ACCEPTabilité et gouvernance des RISques en gestion préventive (ACCEPTRIS).
- Le cycle de l'eau dans l'incendie industriel (O₂Feu).
- Changement climatique et comportement des sols et des structures.
- Évaluation intégrée (*in vitro*, *in vivo*) de l'écotoxicité des perturbateurs endocriniens.
- Évaluation et évolution des effets suite à une exposition sub-chronique aux radio-fréquences 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 : Sûreté des Structures Urbaines contre le risque technologique et les agressions terroristes.
- QUASSI : QUALification de la Sûreté 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.
- INTEGRISK : outil d'évaluation intégrée des risques émergents, soutien au programme INTEGRISK du 7^e PCRD.
- 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

2005	
STABROCK	Impact des changements climatiques sur la stabilisation des fronts rocheux : observation, expérimentation et modélisation
2006	
V35	Virtual reality for safe SEVESO subcontractors
RespINTox	Effets des nanotubes de carbone sur l'appareil respiratoire. Rôle de leurs caractéristiques physico-chimiques
catTel@CRL	Un laboratoire européen <i>in situ</i> pour une meilleure anticipation des catastrophes telluriques. Le rift de Corinthe (CRL)
HYDROMEL	Évaluation des risques pour le transport d'hydrogène énergie pur ou en mélange avec le gaz naturel
ECLAIR	Évaluation environnementale du comportement d'un laitier LD utilisé en Infrastructure routière
REMPARE	Re-ingénierie des merlons de protection par composants anthropiques recyclés
EGSISTES	Évaluation globale de la sécurité intrinsèque aux systèmes de transports en souterrain
CHARCO	Expérimentation et modélisation de l'échange de gaz dans les charbons en vue d'un stockage du CO ₂
2007	
μHepaReTox	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
PROPSSED	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'éco-quartier : 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

Pour 2009, la liste comprend les programmes retenus à la date du 1^{er} septembre 2009, plusieurs programmes étant encore en cours d'évaluation.

L'INERIS, partenaire de 25 programmes européens

au 1^{er} septembre 2009

INTARESE	Integrated assessment of health risks from environmental stressors in Europe
NORMAN	Network of reference laboratories and related organisations for monitoring and bio-monitoring of emerging environmental pollutants
ERMA	Electronic risk management architecture for small and medium sized communities
VIRTUALIS	Virtual reality and human factors applications for improving safety
SOCOPSE	Source control of priority substances en 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
SUMATECS	Sustainable management of trace element contaminated soils
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
PROMOTE	Promote GMES Service Element Atmosphere
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 are tackled at European Level

Programmes coordonnés par l'INERIS



Sujets de thèses publiés en 2009

Risques accidentels

- ✓ Application de la spectrométrie infrarouge (FT-IR) pour l'identification et la quantification de produits de combustion émis lors d'agression thermique (incendie, décomposition...) de systèmes complexes.
- ✓ Thermodynamique des systèmes nanodispersés : application au cas de l'agglomération de nanoparticules.
- ✓ Modélisation des jets diphasiques de gaz liquéfiés sous pression.

Risques chroniques

- ✓ Étude de l'émission de nanoparticules lors du vieillissement de produits finis.
- ✓ Modélisation et simulation numérique de la dynamique des particules ultrafines appliquée aux atmosphères libres et confinées.
- ✓ Modélisation d'une population d'aérosols multisources et recherche des contributions de chaque source à l'échelle urbaine avec le modèle de dispersion CHIMERE.
- ✓ Évaluation des effets de la contamination androgénique des milieux aquatiques chez le poisson.
- ✓ Transfert de vapeurs de composés organiques volatils chlorés depuis les sols et eaux souterraines vers l'air ambiant de bâtiments.
- ✓ Dynamique des contaminants organiques et inorganiques dans les sédiments de dragage.
- ✓ Développement de méthodes alternatives à l'expérimentation animale pour l'étude de la translocation et la toxicité pulmonaire des nanoparticules.
- ✓ Effets neurobiochimiques des champs électromagnétiques : étude du sujet sain et d'un modèle de la maladie d'Alzheimer.
- ✓ Éléments explicatifs du déclin de populations de poissons d'eau douce : étude des relations entre intégrité du génome des gamètes et succès de la reproduction.

Risques du sol et du sous-sol

- ✓ Évaluation des Risques et définition de critères techniques pour la filière captage – transport – stockage CO₂.
- ✓ Transport réactif au travers des roches argileuses et impact sur les propriétés des roches couvertures.
- ✓ Étude du retour à l'état stationnaire d'un aquifère salin profond perturbé par l'injection de CO₂.
- ✓ Modélisation de l'évolution spatio-temporelle de cavités de dissolution dans le sel.
- ✓ Étude des impacts économiques des mesures de gestion des risques de mouvements de terrain.

Gouvernance scientifique

Le conseil scientifique

NEIL MITCHISON

Président

Représentant à la Commission européenne à Édimbourg

FRANCELYNE MARANO

Vice-Présidente

Professeur des Universités à l'Université Paris VII

VÉRONIQUE BACH

Professeur des Universités à l'Université de Picardie Jules-Verne

CHRISTIAN BLAISE

Écotoxicologue à l'Institut St-Laurent, Canada

ALAIN DESROCHES

Chargé de cours à l'École Centrale de Paris

PATRICK LANDAIS

Directeur Scientifique de l'ANDRA

MARTHA HEITZMANN

Directrice de la Recherche du groupe Air Liquide

3 commissions

- Risques chroniques :

15 membres

- Risques accidentels :

16 membres

- Risques du sol et du sous-sol :

12 membres

(voir détails pages suivantes)

INTERVIEW DE RÉGINE BRÉHIER

Directrice de la recherche et de l'innovation au Commissariat Général au Développement Durable (MEEDDM)

L'INERIS a engagé une démarche d'ouverture à la société. Qu'en pensez-vous ?

Je me réjouis de cette démarche d'ouverture, qui répond aux recommandations formulées par le Comité opérationnel recherche du Grenelle de l'Environnement en matière de consultation et d'association des acteurs sociaux, associations et organisations non gouvernementales, à la définition et au suivi des programmes de recherche. Pour l'INERIS, dont les missions sont centrées autour de la prévention des risques technologiques ou naturels, accidentels ou chroniques, que les activités économiques font peser sur la sécurité des personnes et des biens, voire sur la santé de nos concitoyens, le rapprochement avec la société civile et la mise à la disposition du public à la fois d'une information et d'une expertise de qualité, est un enjeu majeur. Il y a en effet dans ce domaine, du fait de l'ampleur et de la gravité des désastres redoutés, voire constatés dans le passé, comme une nécessité à établir le lien entre deux besoins : le besoin aigu de compréhension et de participation émanant du champ social et le besoin d'une étude et d'une prévention des risques de très haut niveau, propre au champ scientifique et technique.

Qu'attendez-vous de l'évolution de la gouvernance scientifique et technique de l'établissement ?

Pour que ces nouvelles orientations trouvent leur pleine efficacité, un travail préalable d'identification des enjeux et des priorités et de partage des définitions et des problématiques et thématiques de recherche est nécessaire. L'organisation suffisamment en amont de l'interface entre les évolutions et les demandes sociétales d'une part et les perspectives scientifiques et techniques d'une recherche et d'une innovation exigeantes d'autre part, devait s'inscrire dans un renouvellement de la gouvernance scientifique de l'établissement. Au terme d'une longue réflexion, l'Institut propose la création de deux entités distinctes, une commission d'orientation et de prospective et un conseil scientifique. Cette configuration permet de maintenir une instance académique resserrée, garante de la qualité scientifique et technique des travaux dans une perspective nationale et internationale, tandis qu'un espace élargi est dédié au débat, à la confrontation des points de vue et à la formulation des enjeux communs. Il reste à définir le rôle et le fonctionnement de la Commission ainsi instituée et à les traduire dans sa composition. Il convient surtout de préciser les modalités de l'articulation des compétences respectives du Conseil et de la Commission. Il faut, à cet égard, veiller à ce que le conseil scientifique explicite clairement sa stratégie auprès de la commission et l'informe au mieux de ses travaux, de façon que les séances plénières permettent un véritable échange entre orientations scientifiques et attentes sociales, de nature à produire une expression partagée des défis que l'établissement doit relever et des réponses qu'il entend proposer.



L'ÉVOLUTION

DE LA GOUVERNANCE

SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE

La prise en compte de l'angle de vue des ONG et des associations dans la gouvernance et le pilotage scientifique devient une nécessité forte. De nombreux sujets porteurs d'enjeux sociétaux appellent un partage des questionnements scientifiques en amont pour définir des priorités mais aussi en aval pour traduire les résultats des travaux en réponses sociétales. L'INERIS souhaite répondre à cette attente en faisant évoluer sa gouvernance scientifique et technique. Il propose un schéma qui s'appuie sur les instances actuelles d'évaluation de la recherche, existant depuis la création de l'INERIS et dont les modalités de fonctionnement sont définies par l'arrêté du 20 décembre 1999. Les trois commissions scientifiques spécialisées gardent le même périmètre et leur activité d'évaluation opérationnelle des travaux, c'est-à-dire avant le lancement et après la réalisation d'un programme ainsi que l'évaluation des équipes de l'Institut. Une commission d'orientation et de prospective sera créée qui aura pour rôle d'identifier et de proposer les questionnements scientifiques prioritaires en matière d'appui aux politiques publiques et de recherche. Elle accueillera en son sein des représentants des ONG et des associations de consommateurs.

Commission scientifique

Risques chroniques

PATRICK FLAMMARION

Président

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

SCOTT ALTMANN

Vice-président

Chef du service « Transfert des Radionucléides »
Direction Scientifique
ANDRA

ROBERT BAROUKI

Directeur Unité INSERM U747
UFR BIOMÉDICALE

JEAN-YVES BOTTERO

Directeur de Recherche CNRS
Directeur de l'IFR112 - Pôle méditerranéen des
sciences de l'environnement
Université Paul Cézanne
CEREGE UMR 6635 CNRS

MARIE-THÉRÈSE BRONDEAU

Chef du Département « Polluants et Santé »
Institut National de Recherche et de Sécurité
(INRS)

HÉLÈNE BUDZINSKI

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

PIERRE-ANDRÉ CABANES

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

CLAUDE CASELLAS

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

CHRISTIAN COCHET

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

M. L. DE GIMEL

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

ÉRIC PARENT

École Nationale du Génie Rural,
des Eaux et des Forêts (ENGREF)

LAURENT PEROTIN

Chef de département
Laboratoire national d'hydraulique
et environnement
EDF & RD

LAURENT ROSSO

Directeur
École Nationale du Génie Rural des Eaux
et des Forêts
ENGREF

DIMOSTHENIS A. SARIGIANNIS

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

PAULE VASSEUR

Professeur de toxicologie
Université de Metz EBSE
UFR Sciences F.A.

Évaluation scientifique du pôle VIVA

Les 16 et 17 juin 2009, la stratégie scientifique et l'organisation générale du pôle « Dangers et impact sur le vivant » (VIVA) ont été évaluées par la commission scientifique de la direction des risques chroniques. C'est la première fois qu'une évaluation porte sur un pôle entier, auparavant les unités faisaient l'objet d'évaluations séparées.

L'évaluation des unités impliquées dans la recherche a été réalisée selon les critères habituels pour ce type d'activité (publications, contrats interventions dans des congrès, collaborations nationales et internationales...) tandis que l'évaluation de l'expertise a été faite sur des critères de production de rapports et de documents, de réponses à des sollicitations, de participation à des comités nationaux et internationaux et de rôle de leader dans ces comités.

Il ressort de cette évaluation que le pôle VIVA occupe une position bien identifiée dans le paysage technologique français, à l'interface de la recherche appliquée et de l'expertise et que cette position est d'autant plus intéressante qu'elle est complémentaire de celle d'autres instituts ou agences dont le positionnement est soit beaucoup plus académique soit plus orienté vers l'expertise. Par ailleurs, il a été noté que ce positionnement permettait de plus grandes interactions avec les industriels du domaine.

Le comité d'évaluation a également apprécié les initiatives régionales et nationales visant à une organisation de la recherche en toxicologie et en écotoxicologie sous forme de partenariats et de réseaux.

Commissions scientifiques

Risques accidentels

CHRISTIAN DELVOSALLE

Président

Faculté polytechnique de Mons (Belgique)

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 Électriques de Grenoble (ENSIEG)

FRANCK GUARNIERI

Directeur
École des mines de Paris
Pôle cindyniques

ÉRIC ISSARTEL

Responsable sécurité incendie
Direction Générale des Opérations
Groupe L'Oréal

PIERRE-ETIENNE LABEAU

Service de métrologie nucléaire
Faculté des sciences appliquées
Université Libre de Bruxelles

JEAN-PAUL LACOURSIERE

Professeur
Département de génie chimique
Université de Sherbrooke (Canada)

MICHEL LLORY

Institut d'Analyse Organisationnelle (IAO)

YVES MORTUREUX

Union internationale des chemins de fer

FRANÇOIS MURGADELLA

Responsable du programme
« Sécurité globale »
Agence Nationale de la Recherche (ANR)

ABDELHAMID NAZIH

Service sûreté nucléaire
EADS ASTRIUM

LAURENT PERRIN

École Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC)

CHRISTOPHE RENIER

Directeur d'objectifs infrastructures
Gaz de France

ISABELLE SOCHET

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges (ENSIB)

RICHARD TURCOTTE

Natural Resources Canada
Canadian Explosives Research
Laboratory
CANMET

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

FRANÇOIS-HENRI CORNET

Vice-président

Institut de physique du globe de Strasbourg

DOMINIQUE BRUEL

École des mines de Paris
Centre de Géosciences

DIDIER DE BRUYN

Centre d'Étude de l'énergie nucléaire (SCK-CEN)
Chef de la section « MYRRHA-Design »
Département Physique des réacteurs et MYRRHA

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

Dr. VINCENT LABIOUSE

Maître d'enseignement et de recherche
Rock Mechanics Laboratory
School of Architecture, Civil and Environmental
Engineering (ENAC)
Swiss Federal Institute of Technology Lausanne

LAURENT LEVEQUE

Responsable Équipe Géologie
Technique d'essais en géologie,
géotechnique et de génie civil
(TEGG – SGG)

PIERRE POTHERAT

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

JEAN-FRANÇOIS THIMUS

Professeur
Université catholique de Louvain (Belgique)

MAXENCE VERMERSCH

ERM France
Environmental Resources Management

Indicateurs du Contrat d'objectifs 2006-2010

	2005	2006	2007	2008
Nombre total de publications	269	295	318	314
Nombre de publications dans des revues à Comité de lecture	54	68	68	68
Nombre de communications dans les congrès	194	237	285	305
Productivité de la recherche sur fonds publics (nombre de publications pour 100 k€ de fonds publics)	3,2	3,2	3,0	2,7
Financements de la recherche de l'INERIS par des sources publiques autres que le Programme 189 (k€)	2 258	2 399	3 310	3 182
Chiffre d'affaires en recherche partenariale (k€)	6 273 ¹	5 562	3 527	3 192
Nombre de brevets (au 31 décembre 2008)	4	3	4	4
Contribution de l'INERIS à la production scientifique des opérateurs du Programme 189 ²				
- Part française de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,55 ³	0,56 ³	ND	ND
- Part européenne (UE 27) de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,07 ³	0,07 ³	ND	ND
- Part mondiale de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,02 ³	0,02 ³	ND	ND
Contribution de l'INERIS à la reconnaissance scientifique des opérateurs du Programme 189 ²				
- Part mondiale de citations reçues à 2 ans (immédiates) par les publications de l'INERIS et indice d'impact relatif à 2 ans (immédiat), toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,02	ND	ND	ND
• Part mondiale de citations immédiates	0,79	ND	ND	ND
• Indice d'impact relatif immédiat ⁴				

ND : non disponible

	5 ^e PCRDT		6 ^e PCRDT	
	Nombre	Taux ‰	Nombre	Taux ‰
Nombre et taux de participation de l'INERIS aux projets financés par les Programmes-cadres de l'Union européenne (5 ^e et 6 ^e PCRDT) ⁵				
• Participations	21	0,29	21	0,37
• Coordinations	4	0,33	3	0,63

1 - Valeurs indicatives, les outils de mesure n'ayant été mis en place qu'en 2006.

2 - Calcul par l'OST (Observatoire des sciences et techniques).

3 - Valeurs provisoires.

4 - Un indice d'impact de 1 indique que la visibilité des publications de l'INERIS est égale à celle de l'ensemble des publications de la discipline.

5 - Données calculées par l'OST, arrêtées en octobre 2007, issues de la base CORDIS.

Les indicateurs de moyens associés à l'activité de recherche

Évaluation des équipes et des travaux de recherche	2005	2006	2007	2008
Nombre d'équipes évaluées	6	4	5	6
Attractivité des parcours professionnels				
Nombre de HDR (habilitations à diriger des recherches)*	8	8	11	10
Nombre de doctorants et de post-doctorants*	50 5	45 1	47 2	52 2
Nombre de personnes en mission de longue durée à l'étranger*	1	2	3	2
Nombre de personnes ayant un diplôme ou une carrière internationale*	70	64	64	75

* Au 31 décembre 2008.

Éco- Toxicologie

Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie



Stratégie de recherche

Vers un centre de référence sur les méthodes alternatives à l'expérimentation animale

Le règlement européen REACH sur les produits chimiques, les risques émergents (CEM, nanoparticules, perturbateurs endocriniens) et les exigences du bon état écologique de l'environnement, portées en particulier par la directive cadre sur l'eau, nécessitent un effort de recherche et d'innovation. En 2007, le Grenelle de l'Environnement préconisait un renforcement de la toxicologie et de l'écotoxicologie, concrétisé par une allocation à l'INERIS, pour des actions partenariales, dans la LOLF 2009, et par la création du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie, lancé en janvier 2009.

Le Pôle s'ancre sur des partenariats en Picardie avec l'Université de Technologie de Compiègne, l'Université Picardie Jules-Verne (unité commune PERITOX) ou l'Institut polytechnique LaSalle Beauvais, partenaire dans le développement d'une infrastructure expérimentale (ANIMEX). L'INERIS est membre fondateur de la Fondation UTC pour l'innovation qui permet aux industriels de développer des programmes de recherche partenariale. Il s'appuie également sur le réseau scientifique ANTIOPES, qui est un lieu de programmation de la recherche et qui a été créé en 2006 à l'initiative de l'INERIS pour mettre en synergie les moyens publics français de recherche en toxicologie environnementale, et sur des partenariats nationaux (CEA, EDF, ONEMA...).

Deux axes de recherche finalisée se dégagent. D'une part, la toxicologie et l'écotoxicologie prédictive (prédiction des dangers d'une substance ou d'un agent sur l'homme et l'environnement) avec deux objectifs : réduire le recours à l'expérimentation animale et être plus efficace dans la détection des risques émergents. D'autre part, la surveillance du milieu avec le biomonitoring.

Parmi les modèles utilisés, les relations structure activité ou QSARs (Quantitative Structure Activity Relationships) s'annoncent comme l'une des pierres angulaires de l'évaluation des risques. Ces modèles bio-statistiques relient la structure physicochimique et

les propriétés toxicologiques ou écotoxicologiques des molécules, à partir des données disponibles provenant d'expérimentations passées. Une fois validés, les modèles QSARs permettent de prédire rapidement, pour un coût faible, une activité toxicologique ou écotoxicologique donnée (cancérogenèse, toxicité cutanée, reprotoxicité). En attendant que cet objectif ambitieux soit atteint, ils sont déjà utilisés pour optimiser les stratégies de tests (les Intelligent Testing Strategies). D'autres modèles sont également travaillés à l'INERIS, dont les modèles de transport/transformation des polluants dans l'organisme (PBPK¹), et aussi en écotoxicologie les modèles sur les équilibres dans les populations.

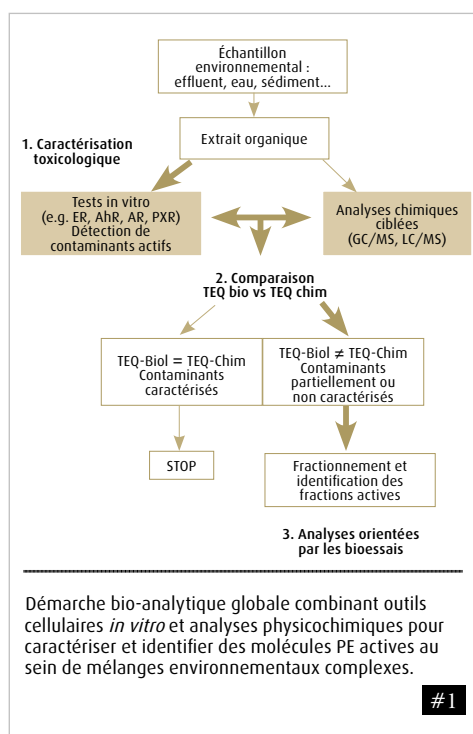
Dans le cadre du Pôle, les collaborations portent aussi sur des alternatives opérationnelles comme les « organes bio-artificiels ». Au sein de l'INERIS, l'amélioration des approches plus « classiques » de l'expérimentation est poursuivie, avec, par exemple, des expositions aux nanoparticules pour en suivre le devenir et les effets dans le corps, par instillation et bientôt par inhalation. L'estimation des impacts sanitaires liés aux champs électromagnétiques constituent également un volet de toxicologie prédictive. Il s'agit de répondre aux questions suivantes : quels effets biologiques ou inflammatoires constituent réellement un risque pathologique, à partir de quelle amplitude et/ou quelle durée ? Quel niveau et quelle durée d'exposition peuvent conduire à telle pathologie ? Dommages physiologiques, mais aussi biomarqueurs d'une réponse précoce sont recherchés.

L'amélioration de la biosurveillance pour les espèces de l'environnement et pour l'homme passe par des travaux sur la mise au point de biomarqueurs. Une spécificité de l'INERIS est la mise au point de biomarqueurs d'exposition intégrée aux perturbateurs endocriniens. L'équipe développe aussi de nouvelles approches bio-analytiques de détection des polluants, à l'interface entre approches analytiques pures et bio-essais classiques d'écotoxicité.

1 - Physiologically Based Pharmaceutical Kinetics.

Recherche et identification de polluants chimiques perturbateurs endocriniens dans les milieux aquatiques : approche bio-analytique

{ S. Aït-Aïssa, N. Creusot, S. Kinani, J.M. Porcher }



De nombreuses études font état de la présence dans l'environnement aquatique de substances toxiques de classes chimiques et d'origines très diverses. En marge des polluants chimiques toxiques persistants dans l'environnement (e.g. dioxines, HAPs, PCBs, métaux, pesticides organochlorés...), pour lesquels des méthodes analytiques sont relativement bien établies, l'émergence de nouveaux types de contaminants, comme les médicaments, les produits cosmétiques ou les composés issus des activités domestiques complexifie l'évaluation de la qualité chimique des milieux aquatiques. La surveillance en routine de ces substances est confrontée à différents problèmes : quelles substances et comment les surveiller ? La Directive européenne sur l'eau (DCE) n'a que partiellement répondu au problème en définissant une liste de 41 substances prioritaires. En effet, au regard des milliers de substances présentes dans le milieu, scientifiques et gestionnaires de l'environnement s'accordent à penser que cela reste insuffisant pour établir une évaluation réaliste du risque pour l'environnement. La multiplicité de ces polluants, présents le plus souvent à de faibles concentrations et pour lesquels peu d'information (éco) toxicologique est disponible, pose clairement la question du risque associé aux expositions chroniques des faibles doses et des mélanges complexes et de l'évaluation de ce risque. À l'interface entre approches analytiques pures et bioessais classiques d'écotoxicité, le développement de nouvel-

les approches bio-analytiques de détection basées sur les mécanismes de toxicité peut avantageusement compléter, voire dans certains cas remplacer les outils existants.

Objectifs

Dans le cas des polluants organiques et des perturbateurs endocriniens (PE) en particulier, l'utilisation des méthodes biologiques *in vitro* basées sur le mécanisme d'action toxique des substances permet une détection rapide, spécifique et quantitative (i.e. par détermination d'équivalents-toxiques ou TEQ) de substances actives au sein de mélanges complexes. Le couplage de ces tests avec des méthodes physicochimiques dans le cadre d'approches intégrées (figure 1) constitue une stratégie nouvelle et très prometteuse pour identifier les substances toxiques présentes dans l'environnement. La méthodologie globale mise en œuvre à l'INERIS, en partenariat avec des laboratoires extérieurs, repose sur le couplage entre outils bio-analytiques (e.g. tests *in vitro*), méthodes de fractionnement physico-chimique (e.g. HPLC semi-préparative) et outils de chimie analytique (e.g. spectrométrie de masse).

Résultats

Détermination d'équivalents-toxiques par les bioessais

Dans le cadre de nos travaux, nous avons montré l'applicabilité des tests *in vitro* pour évaluer la présence de perturbateurs endocriniens à activité œstrogénique et (anti) an-

drogénique et de composés à mode d'action analogue à la dioxine (*dioxin-like*) dans des extraits de sédiments et d'eaux de rivières, dans différents contextes de pollution [David *et al.* soumis ; Louiz *et al.* 2008 ; Michallet-Ferrier *et al.* 2004 ; Pillon *et al.* 2005]. Ces premières études ont permis d'évaluer l'imprégnation des sites étudiés par ces familles de composés en dressant des profils de toxicité, tout en soulevant la nécessité d'aller plus avant dans l'identification des molécules actives détectées par les tests *in vitro*.

Couplage tests *in vitro* et analyses chimiques

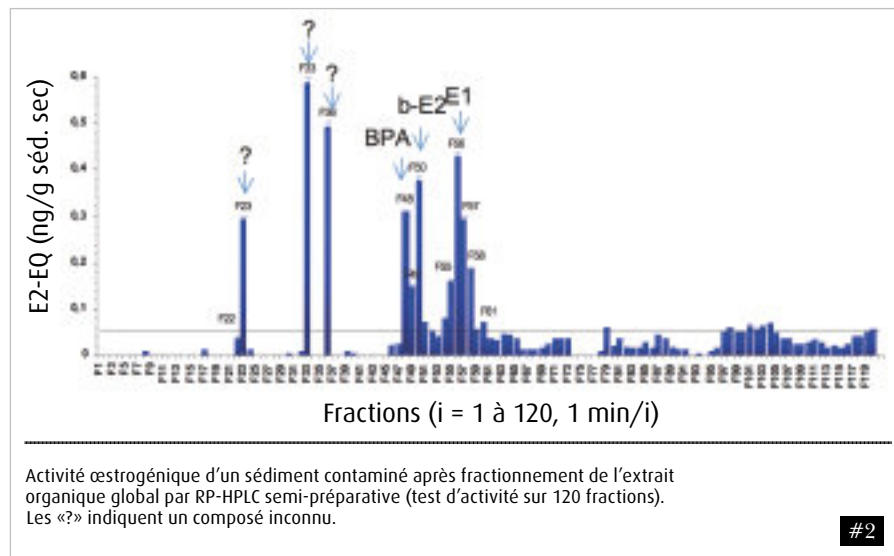
Une approche bio-analytique couplant différents tests *in vitro* et analyses chimiques a été mise en œuvre dans le cadre d'une thèse de doctorat réalisée en collaboration avec le Laboratoire de chimie réactionnelle de l'École polytechnique [Kinani 2009]. Cette démarche a été appliquée à 5 sites du Nord de la France différemment impactés en terme de qualité de l'eau et de réponses de biomarqueurs mesurées chez les poissons autochtones [Sanchez *et al.* 2007].

Du point de vue méthodologique, cette étude a permis le développement et la validation de méthodes d'analyses (GC/MS, LC/MS) de différentes classes de PE (hormones naturelles et synthétiques, mycotoxines, cosmétiques, pesticides, HAPs...) comprenant plus de 50 molécules cibles [Kinani *et al.* 2008a ; Kinani *et al.* 2008b]. Leur application à la détection de ces molécules dans les sédiments a mis en évidence la présence de divers polluants classiques (HAPs, pesticides) et émergents (*e.g.* hormones estrogènes : estradiol, œstrone, Bisphénol A, alkylphénols, parabènes, métabolites de la zéaralénone) sur les sites les plus impactés (Kinani *et al.* sous presse). La comparaison de ces données analytiques avec un panel d'activités PE *in vitro* (*i.e.* œstrogéniques, (anti) androgéniques, HAP-like, dioxin-like et PXR) a montré une bonne complémentarité entre les deux approches. Concernant les activités œstrogéniques par exemple, la quasi-totalité des activités mesurées par le test MELN est expliquée par les hormones naturelles, œstradiol et œstrone, mesurées sur les sites les moins pollués. En revanche sur les deux sites les plus impactés, ces hormones n'expli-

quent que 28 et 35 % de l'activité révélée par le bioessai, suggérant la présence d'autres substances œstrogéniques non initialement ciblées par les analyses. Des observations similaires ont été obtenues avec les activités HAP-like, les concentrations en 16 HAPs prioritaires n'expliquant que 12 à 60 % des activités biologiques mesurées. Enfin, les tests *in vitro* ont permis de détecter et de quantifier des activités androgéniques, anti-androgéniques (test MDA-kb2) et PXR (test HG-hPXR) sur certains sites. Cependant, les molécules initialement ciblées par les analyses, dont certaines sont actives dans ces tests, étaient détectées à des concentrations trop faibles pour expliquer les effets observés [Kinani *et al.*, sous presse].

Isolement des molécules actives par fractionnement HPLC

Pour tenter d'identifier les molécules œstrogéniques détectées sur les sites très impactés, un échantillon correspondant à un site très contaminé a été fractionné par HPLC en phase inverse et chaque fraction a été testée sur cellules MELN. Le résultat (figure 2) confirme la présence d'œstrone (E1), d'œstradiol (E2) et de bisphénol A (BPA) comme contributeurs majoritaires de l'activité œstrogénique globale. De plus, il montre également la présence dans l'échantillon de molécules plus polaires qui présentent une forte activité œstrogénique (fractions 23, 33, 36), confirmant ainsi l'hypothèse de la présence de molécules actives non initialement ciblées par les analyses chimiques.



RÉFÉRENCES

David A., Gomez E., Aït-Aïssa S., Casellas C., Fenet H. (soumis). Impact of urban wastewater discharges on the sediments of a small Mediterranean river and associated coastal environment: assessment of estrogenic and dioxin-like activities.

Kinani S., 2009. Caractérisation et dosage de substances chimiques à activité de perturbation endocrinienne dans des sédiments aquatiques ; développement d'une approche couplant tests biologiques *in vitro* et méthodes physico-chimiques d'analyse. Thèse de Doctorat, École polytechnique, Palaiseau.

Kinani S., Bouchonnet S., Bourcier S., Creusot N., Porcher J.M., Aït-Aïssa S., 2008a. Extraction and purification procedures for simultaneous quantification of phenolic xenoestrogens and steroid estrogens in river sediment by gas chromatography/ion trap mass spectrometry. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 22, 3651-3661.

Kinani S., Bouchonnet S., Bourcier S., Porcher J.-M., Aït-Aïssa S., 2008b. Study of the chemical derivatization of zearalenone and its metabolites for gas chromatography-mass spectrometry analysis of environmental samples. *Journal of Chromatography A* 1190, 307-315.

RÉFÉRENCES

Kinani S., Bouchonnet S., Creusot N., Bourcier S., Balaguer P., Porcher J.-M., Ait-Aïssa S. (Sous presse). Bioanalytical characterisation of multiple endocrine and dioxin-like activities in sediments from reference and impacted small rivers. *Environment Pollution*.

Louiz I., Kinani S., Guze M.E., Ben-Attia M., Menif D., Bouchonnet S., Porcher J.-M., Ben-Hassine O.K., Ait-Aïssa S., 2008. Monitoring of dioxin-like, estrogenic and anti-androgenic activities in sediments of the Bizerta lagoon (Tunisia) by means of *in vitro* cell-based bioassays: contribution of low concentrations of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs). *Sci. Total Environ.* 402, 318-329.

Michallet-Ferrier P., Ait-Aïssa S., Balaguer P., Dominik J., Haffner G.D., Pardos M., 2004. Assessment of estrogen (ER) and aryl hydrocarbon receptor (AhR) mediated activities in organic sediment extracts of the Detroit River, using *in vitro* bioassays based on human MELN and teleost PLHC-1 cell lines. *J. Great Lakes Res.* 30, 82-92.

Pillon A., Boussioux A.M., Escande A., Ait-Aïssa S., Gomez E., Fenet H., Ruff M., Moras D., Vignon F., Duchesne M.J., Casellas C., Nicolas J.C., Balaguer P., 2005. Binding of estrogenic compounds to recombinant estrogen receptor alpha : Application to environmental analysis. *Environ. Health Perspect.* 113, 278-284.

Sanchez W., Ait-Aïssa S., Palluel O., Ditche J.M., Porcher J.-M., 2007. Preliminary investigation of multi-biomarker responses in three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.) sampled in contaminated streams. *Ecotoxicology* 16, 279-287.

Conclusions et perspectives

Les études menées ont vu la mise en place et la validation d'une démarche bio-analytique couplant méthodes physicochimiques et tests *in vitro* pour la caractérisation des PE dans le milieu aquatique. Elles ont apporté des informations nouvelles sur l'occurrence de molécules PE actives dans des sites français avec des premiers éléments de réponses sur l'identité des molécules détectées par les tests biologiques *in vitro* et sur la présence environnementale de molécules (anti)androgéniques et à activité PXR, qui sont actuellement peu ou pas décrites, en comparaison aux substances œstrogéniques et dioxin-like. Ces études ont ainsi montré la nécessité de s'intéresser à d'autres types d'activités PE présentes sur les sites étudiés et jusque-là très peu étudiées dans l'environnement ; il s'agit notamment des activités (anti)an-

drogénique ou PXR. L'identification de la nature des substances détectées par ces tests constitue une des perspectives de recherche.

Une autre perspective de ce travail consiste à améliorer la démarche bio-analytique mise en œuvre en intégrant de nouvelles méthodes de fractionnement et de purification des PE, comme par exemple, l'utilisation de colonnes d'affinités aux récepteurs nucléaires [Pillon *et al.* 2005]. Ce travail fait l'objet d'un projet qui sera mené en collaboration avec des laboratoires extérieurs (INSERM U896, INRA UMR Xenobiotiques, ISM-LPTC) dans le cadre du Pôle national applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie. *In fine*, ces études devraient apporter de nouvelles informations sur le type et la nature de la contamination des milieux aquatiques par les polluants à caractère PE.

ABSTRACT

Bio-analytical approaches that combine *in vitro* biological tools and chemical analyses have been developed and used to identifying endocrine disrupting chemicals (EDCs) and dioxin-like compounds in environmental matrices such as effluents, surface waters or river sediments. By using a panel of *in vitro* bioassays based on cultured reporter cell lines, our study revealed the presence of multiple endocrine active chemicals (i.e. chemicals that interfere with estrogen, androgenic and pregnane X receptors) and dioxin-like compounds in sediments from various French river sites. Chemicals analyses of several EDCs including steroid hormones, mycotoxins, UV-screens, alkylphenols, parabens, pesticides and PAHs confirmed multiple contamination at the most active sites as determined by the bioassays. On the basis of toxic-equivalent concentrations (TEQs), an overall good correlation was noted between biological and chemical approaches. For instance, PAHs were found as major contributors to the dioxin-like activities while the natural steroid estrogens, estradiol and estrone, explained most of the estrogenic activities. However, at the most impacted sites, targeted chemical analyses were only partly explicative of the biological activities measured in the samples suggesting that non analyzed pollutants were also present in the samples. Indeed, fractionation of the samples (RP-HPLC) and testing of the fractions with the bioassays revealed the presence of other unknown estrogenic chemicals that remain to be identified.

La modélisation en écotoxicologie

{ A. Péry }

Pour des raisons pratiques, l'écotoxicologie s'est d'abord centrée sur l'étude de l'effet des polluants sur les organismes via des bioessais réalisés en laboratoire, avec une démarche proche de la toxicologie. En effet, ils sont réalisés avec des populations monospécifiques homogènes, exposées à une gamme de concentrations toxiques, dans des conditions d'environnement standardisées, et l'effet n'est recherché la plupart du temps que sur un unique paramètre. En conséquence, ils ne permettent pas d'appréhender, à eux seuls, la complexité du terrain où ce sont des populations d'organismes de diverses espèces qui sont exposées à des mélanges de contaminants et où les différents effets observés interfèrent, mais pas nécessairement de manière additive.

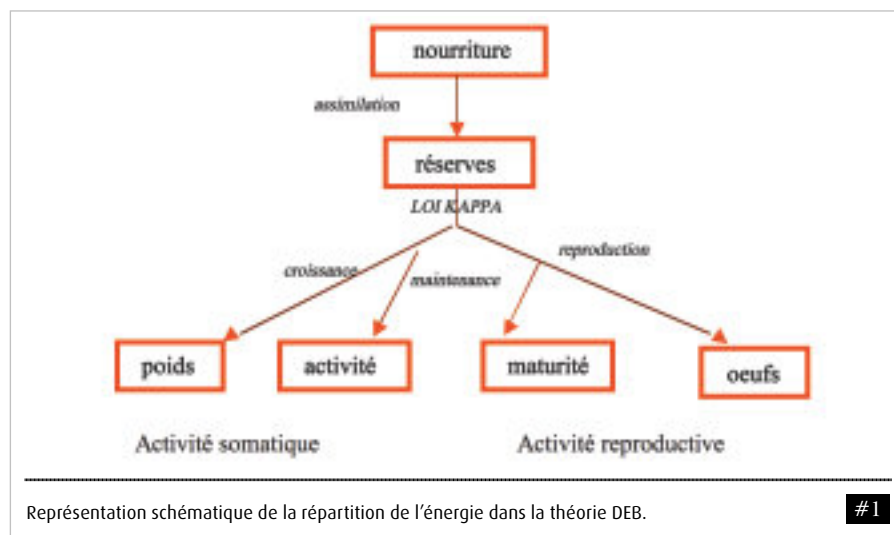
Les connaissances mathématiques, biologiques, écologiques et toxicologiques actuellement disponibles sont maintenant suffisantes pour mettre en place une démarche de modélisation capable d'apporter une plus-value en mettant en relation les effets au niveau de cibles biologiques, les effets au niveau des individus et les conséquences projetées sur des populations, voire des communautés. C'est ce que nous nous sommes efforcés de démontrer.

Dans un premier temps, nous avons développé des modèles mathématiques capables de mettre en relation les effets mesurés sur les individus avec une exposition à un contaminant.

Modèles d'effets sur les individus

Dans un premier module, ces modèles relient l'exposition à l'accumulation dans l'organisme. Pour cela, un modèle toxico-cinétique simple, réaliste du point de vue biologique, est généralement utilisé. L'absorption du composé est supposée proportionnelle à sa concentration en solution, et son élimination proportionnelle à sa concentration interne. La prise en compte de la cinétique des composés présente l'avantage de rendre compte des aspects temporels de l'exposition. Ceci permet de déterminer des paramètres d'effet, comme par exemple des seuils d'effets, indépendants du temps. Par ailleurs, le modèle de cinétique prend en compte des variations de la concentration dans le milieu.

Dans un second module, les effets sur les paramètres du cycle de vie (croissance, reproduction, survie) se déduisent de la concen-



1

RÉFÉRENCES

Billoir E., Delignette-Muller M.-L., Pery A.R.R., Geffard O., Charles S., 2008b. Statistical cautions when estimating DEBtox parameters, *Journal of Theoretical Biology*, 254:55-64.

Billoir E., Delignette-Muller M.-L., Pery A.R.R., Charles S., 2008b. A bayesian approach to analyzing ecotoxicological data, *Environmental Science and Technology*, 42:8978-8984.

Kooijman S.A.L.M., 2000. Dynamic energy and mass budgets in biological systems. Cambridge University Press, 423 pages.

Pery A.R.R., Geffard A., Conrad A., Mons R., Garric J., 2008. Assessing the risk of metal mixtures in contaminated sediments on *Chironomus riparius* based on cytosolic accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 71:869-873.

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & F_3 & F_4 & F_5 & F_6 & F_7 & F_8 & F_9 & F_{10} \\ P_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_9 & G_{10} \end{pmatrix}$$

Exemple de graphe de cycle de vie et matrice de Leslie correspondante. Les F_i correspondent aux fécondités, les P_i aux probabilités de survie d'une classe à la suivante et G_{10} la probabilité de survie dans la dernière classe d'âge.

#2

tration accumulée qui modifie les valeurs de paramètres biologiques fondamentaux, comme le coût énergétique de la croissance ou la vitesse d'assimilation de la nourriture. Les modèles d'effets actuellement disponibles sont relatifs à une perturbation de la gestion de l'énergie par les organismes, et reposent tous sur la théorie DEB (Dynamic Energy Budgets), développée par Kooijman (2000).

Cette théorie a pour objectif de décrire quantitativement, par des modèles mathématiques réalistes, les grandes fonctions biologiques des organismes (nutrition, digestion, croissance, reproduction, maintenance et vieillissement). La représentation schématique de la théorie est présentée par la figure 1. L'énergie de l'organisme provient de la nourriture qui est absorbée à une vitesse proportionnelle à la surface du tube digestif de l'organisme. La théorie DEB suppose ensuite l'existence d'une loi (loi Kappa) qui répartit l'énergie entre la part somatique et la part reproductive. De la part somatique, une portion est allouée à la maintenance des fonctions vitales, le reste étant consacré à la croissance du volume. De la part reproductive, une portion est allouée à l'acquisition puis au maintien de la maturité, le reste étant consacré à la reproduction.

Dans le cadre des modèles d'effets fondés sur le DEB (modèles dits DEBtox), nous supposons l'existence d'une concentration seuil sans effet. Une fois ce seuil dépassé, c'est-à-dire lorsque la concentration est telle que des effets apparaissent, il y a proportionnalité entre l'excès de toxique et l'effet observé, qui est une perturbation des paramètres de la théorie DEB.

Les paramètres des modèles (pour la cinétique et pour les effets) sont estimés à partir de données expérimentales, de préférence mesurées à plusieurs temps au cours du test. La qualité de la description des données peut théoriquement permettre de déterminer le mode d'action des toxiques si celui-ci est inconnu au moment du test. Cette détermination est cependant délicate et réclame généralement la mise en place d'un nouveau test de toxicité. Les modèles DEBtox permettent de traiter les interactions complexes entre substances. Nous avons pu, à partir de données du Cemagref de Lyon,

analyser les interactions entre le cuivre, le zinc et le cadmium, et montré qu'ils ont lieu essentiellement au niveau de la cinétique de contamination, pas au niveau des cibles [Péry *et al.*, 2008].

En collaboration avec l'Université Lyon 1, nous avons en outre amélioré le processus d'estimation de paramètres en introduisant les méthodes bayésiennes [Billoir *et al.*, 2008a ; Billoir *et al.*, 2008b]. Ceci permet de prendre en compte les informations biologiques et toxicologiques déjà disponibles pour réduire l'incertitude sur l'estimation des paramètres.

De l'individu à la population

La pertinence biologique des modèles d'analyse des effets au niveau de l'individu et la prise en compte du temps, ce qui est indispensable pour des prédictions à l'échelle d'un cycle de vie, nous permettent, dans un deuxième temps, de développer des modèles de changement d'échelle de l'individu à la population.

Au niveau de la population, nous étudions à l'INERIS le taux d'accroissement (le plus étudié en général), mais aussi la densité de population. Les notions de perturbation de la densité ont rarement été abordées par la modélisation. Or, il s'agit de concepts pour lesquels l'étude expérimentale est longue (plusieurs générations). La modélisation permet donc de gagner du temps. Nos modèles au niveau individuel sont particulièrement adaptés à ce type d'étude dans la mesure où ils rendent compte de l'utilisation de l'énergie. Ils nous servent de base pour des modèles individus-centrés. Chaque individu évolue conformément au modèle et contribue à la dynamique globale de la ressource. La limitation de cette ressource entraîne l'existence d'une densité de population d'équilibre, qui représente une mesure de la biomasse disponible dans les chaînes trophiques. Le taux d'accroissement de la population se calcule par une approche matricielle à partir du graphe de cycle de vie. Il s'agit de modèles en temps discret, où la population est découpée en classes d'âge (figure 2). Les individus passent d'une classe à une autre à chaque pas de temps selon des taux vitaux (survie, fécondité).

Les méthodes d'étude de la dynamique

de population permettent l'estimation de seuils d'effets significatifs à l'échelle de la population. Ainsi, la résultante au niveau des populations de plusieurs effets non significatifs mais non nuls au niveau des individus peut s'avérer très éloignée des conditions de contrôle. Ces seuils populationnels évitent de surprotéger ou de sous-protéger les populations en pondérant les effets sur les paramètres par leur importance pour cette dynamique.

Nous développons actuellement une approche de modélisation pour analyser les données obtenues en mésocosmes. La variabilité entre cosmes des variables descriptives des populations est importante, estimée autour de 51 %. La puissance statistique de la comparaison entre les populations témoins exposées est faible, et seuls des effets importants sont détectables. Accroître le nombre de réplicats est rarement réaliste dans le contexte des cosmes. Une solution envisageable revient à modéliser le comportement d'une population témoin pour diminuer le nombre de réplicats témoins mis en jeu et accroître le nombre de réplicats pour les populations exposées. Pour y parvenir, un modèle individu-centré de dynamique des populations adapté aux cosmes de l'INERIS est en cours de construction par Rémy Beaudouin, en poste dans l'unité METO, et qui a soutenu sa thèse sur cette thématique à l'INRA.

Conclusions

La relecture de l'écotoxicologie par la modélisation nous a valu plusieurs avancées notables. Nos modèles d'effets ont démontré leur robustesse pour analyser les tests de toxicité et leur capacité à rendre compte d'un mode d'action physiologique. Le changement d'échelle de l'individu à la population s'avère un outil indispensable à l'évaluation du risque, de par ses capacités d'intégration de l'information. Il s'agit à présent d'étendre les modèles d'effet pour prendre en compte d'autres effets que la perturbation énergétique. En particulier, les phénomènes de perturbation endocrinienne réclament le développement de modèles mathématiques qui leur soient spécifiques. Il s'agit aussi de poursuivre nos efforts de modélisation des mésocosmes et d'intégration des approches de changement d'échelle à l'évaluation du risque écotoxicologique.

ABSTRACT

We present a modelling framework to link effects on toxicological targets, effects on individuals and effects on populations in ecotoxicology.

Our models first link exposure and effects on individuals. They couple toxicokinetics, to link exposure and body residues, with toxicodynamics, to assess how chemicals in the organism affect biological processes. They are based on the DEB (Dynamic Energy Budgets) theory by Kooijman (2000), which describes mathematically the assimilation and use of energy. They permit to assess the physiological mode of action of substances, and the effects of complex mixtures. We recently developed a Bayesian approach to estimate their parameters.

The relevance of the analysis at individual level, with incorporation of time and modes of action, guarantees the relevance of the change of scale from individuals to population and of its use in ecotoxicological risk assessment. We studied population dynamics, and could balance the effects on population parameters by the influence of these parameters on the population dynamics.

We also develop a modelling approach adapted to mesocosms to simulate control situations, which should increase the predictive power of these systems.

The perspectives at INERIS are the development of biology-based models for endocrine disruption and the continuation of our works on the use of the change of scale in risk assessment and on mesocosms data analysis.

Neurotoxicité sur le système nerveux central

{ R. de Sèze }

Le rayonnement radiofréquence émis par les téléphones mobiles numériques (GSM) constitue de par sa proximité avec la tête de l'utilisateur une des sources de champs électromagnétiques les plus importantes auxquelles l'homme ait jamais été exposé; il est légitime de s'inquiéter de savoir si ce rayonnement pourrait éventuellement constituer un risque sanitaire, portant notamment sur le système nerveux.

Compte tenu de la progression rapide de l'usage des téléphones mobiles, plusieurs questions ont émergé au sujet de leur éventuel impact sur la santé. La technologie des téléphones mobiles repose, en effet, sur l'émission de champs électromagnétiques, spécifiquement des radiofréquences entre 400 MHz et 2 100 MHz. La majeure partie des ondes reçues est absorbée par les cellules des organes situés à proximité immédiate du récepteur, au niveau de l'oreille. Une partie importante de cette énergie étant absorbée par le cerveau, les études concernant le système nerveux central se sont multipliées. En l'état actuel des connaissances, aucun effet délétère évident n'a été observé sur le système nerveux central suite à l'exposition aux téléphones portables. Mais certains résultats restent à reproduire ou à compléter, surtout suite à des expositions longues et à faible dose.

Bien qu'il n'ait pas été observé d'effet comportemental sur l'apprentissage et la mémorisation après des expositions aiguës ou répétées [Dubreuil *et al.*, 2003 ; Ammari *et al.*, 2008a], des travaux de recherche récents ont montré un effet persistant après exposition répétée pendant 6 mois à des champs électromagnétiques radiofréquences sur un marqueur de neurotoxicité dans le cer-

veau du rat, la GFAP (Glial Fibrillary Acidic Protein) [Ammari *et al.*, 2008b]. Deux voies de recherche permettent d'explorer, d'une part, les conséquences comportementales ou pathologiques possibles, par exemple sur des tests plus sensibles que la mémoire comme l'attention (travaux en cours), d'autre part, rechercher des effets plus précoces qui permettraient d'appréhender les mécanismes impliqués dans l'effet observé ainsi que leur cible initiale. Dans ce travail, nous avons analysé les effets fonctionnels biochimiques d'une exposition *in vivo* à des champs radiofréquences chez des rats par dosage de l'activité enzymatique du métabolisme oxydatif (cytochrome C oxydase).

Etat des connaissances

La cytochrome oxydase a été choisie comme marqueur du niveau d'activité fonctionnelle de la cellule et des neurones pour deux raisons principales :

- d'une part, la cytochrome oxydase (CO) est un composant vital pour la production et la transduction de l'énergie des cellules aérobies (métabolisme oxydatif). Dans l'encéphale, l'activité de la CO est directement associée à l'activité fonctionnelle des neurones [Wong-Riley, 1989, 1998]. Comparée à la consommation du 2-déoxyglucose, l'activité de la CO est plus spécifique du métabolisme oxydatif que du métabolisme glycolytique et reflète l'activité fonctionnelle neuronale globale apparaissant sur des périodes longues, de l'ordre de l'heure et de la semaine, plutôt que de l'ordre de la minute ;
- d'autre part, l'activité de la cytochrome oxydase dans le cerveau correspond principalement à l'activité des neurones et peu ou pas à celle des cellules gliales, puisque

ces dernières dépendent plus de la glycolyse anaérobie que du métabolisme oxydatif [Wong-Riley, 1989].

Objectif

L'objectif de ce travail est d'étudier si une exposition répétée pendant 7 jours à un champ radiofréquence de type GSM à un DAS (Débit d'Absorption Spécifique) de 1,5 et 6 W/kg peut perturber le métabolisme oxydatif dans le cerveau des rats exposés, par la mesure de l'activité de la cytochrome c oxydase, qui est l'enzyme principale de ce processus biologique.

Matériels et méthodes

Système d'exposition

Les champs électromagnétiques émis sont des rayonnements radiofréquences modulés selon la norme GSM déjà utilisée dans les radiocommunications cellulaires. La fréquence porteuse est 900 MHz ; la fréquence de répétition des impulsions est 217 Hz, avec une durée de 576 µs.

Le système d'exposition expérimental consiste en une antenne-boucle, qui a la propriété de permettre une exposition principalement localisée au niveau de la tête des rats. L'antenne est alimentée par l'intermédiaire d'un générateur de radiofréquences couplé à un amplificateur de puissance. Un diviseur permet d'alimenter 4 antennes pour exposer 4 animaux en simultané. Un coupleur permet de mesurer et d'enregistrer la puissance incidente et la puissance réfléchi. Le rapport des deux est un reflet du bon couplage ou non de l'antenne avec la tête du rat, et témoigne de la quantité d'énergie électromagnétique absorbée par l'animal.

Un système de contrôle de l'exposition a été développé et mis au point à l'INERIS, qui permet de régler la puissance incidente et d'enregistrer la qualité du signal fourni sur chaque antenne en début d'étude, et sur une antenne tout au long de l'étude pour garantir la qualité de l'exposition. De plus, des fantômes de rat en gel à base d'acrylamide ont été fabriqués, et une méthodologie de mesure d'échauffement grâce à une thermométrie non perturbable par les champs radiofréquences permet de contrôler la puissance absorbée et d'évaluer le DAS produit par le système.

ÉTUDE D'EXPOMÉTRIE

CHEZ L'HOMME

L'INERIS a été défini comme référent technique par l'AFSSET pour une étude d'expométrie de la population aux champs radiofréquences. Dans ce cadre, nous avons caractérisé et vérifié les mesures effectuées par ces dosimètres dans des conditions de référence. Ils ont en parallèle été utilisés dans le cadre d'une étude en population dans les régions de Lyon et de Besançon pour enregistrer et analyser l'exposition des personnes en fonction de leur localisation et de leurs activités.

Cette étude, conçue comme une étude pilote de population sur 440 personnes, a également constitué une étude de validation des dosimètres. Il a été mis en évidence une fragilité physique des dosimètres, ainsi que la variabilité des mesures recueillies, intrinsèque et en fonction de la méthodologie de référence utilisée. En conséquence, 24 participants ont dû être éliminés de l'analyse.

Deux objectifs de cette étude pilote ont été atteints pour les enregistrements de 24 heures :

- estimer l'exposition aux radiofréquences sur une base populationnelle ;
- déterminer la part des différentes sources d'exposition.

Les pannes survenues sur les dosimètres, associées à des difficultés métrologiques insoupçonnées, ont considérablement retardé l'exploitation statistique des données.

Il n'a pas été possible dans le cadre de cette étude, d'identifier clairement les déterminants principaux de l'exposition ; cependant, les variabilités observées entre les mesures pour un même appareil et entre les villes ou variables font craindre un manque de pouvoir discriminant des variables explicatives.

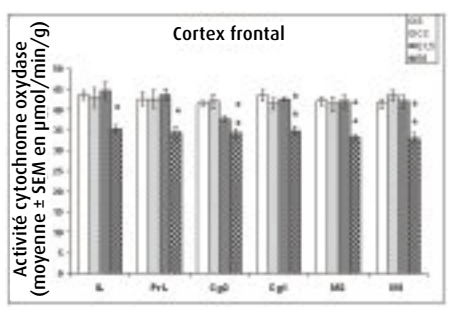
Quelques grands enseignements peuvent être tirés des résultats :

- les pourcentages de mesures supérieures à 1 V/m sont, soit très faibles (GSM Tx, DCSTx, DECT, micro-ondes), soit nuls. Pour information, un champ de 50 V/m pour une exposition sur l'ensemble du corps correspond approximativement à un DAS de 0,1 W/kg, et le DAS varie comme le carré du champ électrique. En-dessous de 1 V/m, le DAS produit est donc inférieur à 1 mW/kg, soit quelques milliers de fois inférieur aux niveaux pour lesquels des effets nocifs ont été observés chez des mammifères (rat et singe) ;
- en ne considérant que les seules émissions détectées (c'est-à-dire supérieures au seuil minimum redressé), les médianes sont proches (aux environs de 0,10 - 0,15 V/m), quelles que soient la radiofréquence, la ville ou la variable considérées ;
- en ce qui concerne les pourcentages de mesures supérieures au seuil minimum corrigé :
 - le contraste entre villes est particulièrement important pour la bande WIFI,
 - un gradient urbain / périurbain / rural est noté à plusieurs reprises (FM, GSM Rx, DCS Rx, WIFI),
 - la localisation « extérieur » est associée à un pourcentage augmenté pour deux radiofréquences (GSM Rx, DCS Rx).

Cette étude pilote a montré la forte variabilité des mesures, et l'influence importante de la région étudiée (Besançon ou Lyon). Elle ne peut donc prétendre à une estimation représentative des expositions de la population française.

Pour ce faire, il serait nécessaire de :

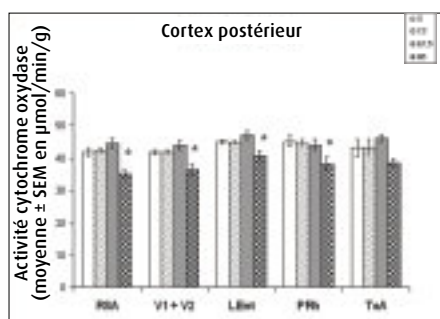
- disposer au préalable d'un dosimètre plus résistant et sans seuil de détection minimum et maximum (empêchant tout calcul de moyenne ou médiane d'exposition) ;
- caractériser à l'avance la variabilité et l'exactitude des mesures enregistrées ;
- conduire une nouvelle étude populationnelle, sur une base géographique large, en planifiant des évaluations régulières de la qualité des mesures.



Activité cytochrome oxydase (moyenne \pm S.E.M.) dans différentes sous-régions du cortex frontal : infralimbique (IL), prélimbique (PrL), motrices 1 et 2 (M1, M2 - plan antérieur + 2,7 mm) et cingulaires 1 et 2 (Cg1, Cg2 - plan antérieur +1,4 mm) des animaux exposés 45 min à 1,5 W/kg (E1.5), 15 min à 6 W/kg (E6), Sham (S) et contrôles cage (CC).

* $p < 0.05$ E6 vs Sham et CC.

#1



Activité cytochrome oxydase (moyenne \pm S.E.M.) dans les sous-régions du cortex postérieur : rétrospléniale antérieure (RSA), visuelles 1 et 2 (V1, V2) (plan postérieur -6 mm) temporale antérieure (TeA), périrhinale (PRh), subiculum (S) et entorhinale latérale (LEnt) (plan postérieur -6,9 mm) des animaux exposés 45 min à 1,5 W/kg (E1.5), 15 min à 6 W/kg (E6), Sham (S) et contrôles cage (CC).

* $p < 0.05$ E6 vs Sham et CC.

#2

Pour rappel, la quantification du niveau d'exposition se fait en mesurant le DAS, représentant la densité de puissance dissipée par unité de masse de tissus. L'efficacité de l'antenne-boucle a ainsi été caractérisée [Lévêque *et al.*, 2004].

Les puissances d'exposition ont été choisies par rapport à des puissances absorbées dans les tissus superficiels lors de l'utilisation d'un téléphone mobile : 6 W/kg : valeur seuil pour laquelle un effet sur la GFAP a été observé après 15 min d'exposition ; 2 W/kg : valeur limite d'exposition recommandée par la Commission européenne ; 0,5 à 1 W/kg : valeurs auxquelles sont soumis les utilisateurs de radiotéléphones dans les tissus les plus exposés (moyenne entre la peau, le crâne et le cerveau) ; la valeur dans le cerveau lui-même est environ moitié moindre. En conséquence, les valeurs utilisées pour notre étude ont été choisies principalement à 1,5 et 6 W/kg. Le modèle animal utilisé est le rat Sprague Dawley, déjà très étudié en neurosciences et dont la cartographie cérébrale est bien identifiée.

Protocole histochimique

L'activité de la CO a été mesurée sur des coupes de cerveau suivant la technique de Wong-Riley (1979) et le protocole de Hess (1953), modifiés par Strazielle (1998). Des coupes de référence dont l'activité CO est connue, appelées « standards », ont été préparées en parallèle. L'activité de la CO mesurée par spectrophotométrie est exprimée en $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{g}$ de tissu et reste constante pendant plusieurs mois à -80°C .

Analyse d'image

La densité des échantillons a été mesurée par analyse d'images (Visilog 6.2) permettant la conversion des densités optiques mesurées en activité de CO exprimée en $\mu\text{mol}/\text{min}/\text{g}$ de tissu. Toutes les régions du cerveau peuvent être observées sur une série de 4 lames, deux coupes successives étant séparées de 0,4 mm.

Les régions anatomiques ont été définies suivant l'atlas stéréotaxique de Paxinos et Watson (1998). Trois niveaux de coupes ont été sélectionnés : antérieur (cortex), moyen (hippocampe), postérieur (cervelet) ; avec plusieurs sous-régions décrites dans les

légendes des figures ci-après. La valeur d'activité enregistrée de la CO correspond à une activité moyenne de la structure étudiée. La zone d'analyse est choisie de façon à couvrir la totalité de la structure en tenant compte de son hétérogénéité.

Résultats

L'exposition répétée 7 jours de suite à un signal GSM 900 MHz a induit une diminution du métabolisme oxydatif (activité de la cytochrome C oxydase) au niveau des structures corticales et de l'hippocampe à un DAS de 6 W/kg, 15 min/jour, mais pas à un DAS de 1,5 W/kg, 45 min/jour. Les résultats pour le cortex antérieur et le cortex postérieur sont représentés sur la figure 1 et la figure 2.

Discussion et conclusions

Ces résultats traduisent une diminution de l'activité neuronale chez les rats exposés aux radiofréquences à un DAS de 6 W/kg, tandis que l'exposition à 1,5 W/kg n'altère pas cette activité. L'effet produit par l'exposition à 6 W/kg concerne les zones les plus proches du site d'exposition (cortex frontal) mais aussi des zones plus profondes (septum, hippocampe et cortex postérieur), suggérant une propagation de l'effet par des voies biologiques. Cet effet peut être expliqué par différents mécanismes.

- L'échauffement, mais l'étude de Brillaud *et al.* (2007) n'a pas montré d'augmentation de température entre les animaux exposés à 6 W/kg et les animaux témoins. Par ailleurs, on s'attendrait plutôt à ce qu'un effet thermique augmente l'activité neuronale plutôt que de la diminuer.

- Un autre marqueur d'activation neuronale après stimulation centrale ou périphérique [Bullitt, 1990] est le gène précoce *c-fos*, qui peut être transitoirement induit dans les neurones après exposition à des stimuli très divers [Herrera and Robertson, 1996]. Finnie (2005) a trouvé que l'exposition de souris à un rayonnement GSM 900 MHz pendant une heure à un DAS corps entier de 4 W/kg n'avait pas d'effet sur le nombre de noyaux positifs *c-fos* dans le cerveau. D'Andrea *et al.* (2003) ont indiqué qu'il n'y avait pas d'effet net à des DAS inférieurs à la valeur seuil définie de risque sanitaire de 4 W/kg, et que ceux parfois obtenus à des valeurs inférieu-

res étaient réversibles, comme c'est le cas pour le c-fos.

- D'autres études ont montré une relation entre l'émission RF et le stress oxydant. Ilhan *et al.* (2004) ont exposé des rats aux champs RF 1 h par jour à 2 W/kg pendant 7 jours. Ils ont trouvé une augmentation de MalonDiAldéhyde (MDA) et d'oxyde nitrique (NO) dans le cerveau. NO est un radical libre et peut avoir des effets toxiques: le NO endogène inhibe la cytochrome c oxydase dans les mitochondries cérébrales [Schweizer and Richter, 1994 ; Brorson *et al.*, 1999] et dans les astrocytes en culture [Bolanos *et al.*, 1994] ; il a également été constaté une déplétion des stocks d'énergie cellulaire [Zhang *et al.*, 1994], qui peut être en relation avec le phénomène précédent. Une hypothèse à explorer est donc que l'inhibition de l'activité CO dans le cerveau de rat soit un effet indirect, consécutif à une augmentation de NO induite par les champs radiofréquences ; cette augmentation peut découler d'une activité accrue d'une enzyme de synthèse, la NO-synthase, ou d'un ralentissement de l'élimination du NO.
- Les micro-ondes GSM peuvent aussi induire une inhibition de l'affinité de récepteurs N-methyl-d-aspartate (NMDA) et glutamate pour leurs ligands [Mausset-Bonnefont *et al.*, 2004] ; [Xu *et al.*, 2006]. Des travaux com-

plémentaires sont nécessaires pour étudier s'il existe un lien entre ces effets observés précocement et l'effet observé dans cette étude sur la GFAP.

Le DAS utilisé dans notre travail 1,5 ou 6 W/kg n'est pas directement transposable à l'homme, car le calcul de DAS n'est pas effectué sur les mêmes tissus. Il y a un facteur 4 entre le DAS moyen chez le rat et le DAS chez l'homme. Un DAS de 6 W/kg moyenné sur le cerveau de rat correspond à un DAS de 24 W/kg tel que calculé par les normes chez l'homme. De même, un DAS moyen de 1,5 W/kg chez le rat correspond à un DAS de 6 W/kg dans 10 g de tissus superficiels chez l'homme.

En conclusion, il n'y a pas d'effet chez le rat à 1,5 W/kg, ce qui correspond à une absence de risque envisageable chez l'homme à 6 W/kg. Une diminution du métabolisme oxydatif est observée à 6 W/kg chez le rat ; si cet effet est transposable d'un point de vue biologique, il pourrait se produire chez l'homme à un DAS de 24 W/kg. Il reste donc à vérifier si cela constitue un risque : quelle pathologie cela pourrait entraîner ou quels symptômes cela pourrait produire ou expliquer ? Et si c'est le cas, il restera à définir le seuil d'apparition de ces dangers éventuels entre 6 et 24 W/kg.

ABSTRACT

The world-wide and rapidly growing use of mobile phones has raised serious concerns about the biological and health-related effects of radio frequency (RF) radiation, particularly concerns about the effects of RFs upon the nervous system. The goal of this study was to measure cytochrome oxidase (CO) levels using histochemical methods in order to evaluate regional brain metabolic activity in rat brain after exposure to a GSM 900 MHz signal for 45 min/day at a brain-averaged specific absorption rate (SAR) of 1.5 W/kg or for 15 min/day at a SAR of 6 W/kg over seven days. Compared to the sham and control cage groups, rats exposed to a GSM signal at 6 W/kg showed a 10% decreased CO activity in some areas of the prefrontal and frontal cortex, the septum, the hippocampus and the posterior cortex. However, the exposure to GSM at 1.5 W/kg did not affect brain activity. Our results indicate that 6 W/kg GSM 900 MHz microwaves may affect brain metabolism and neuronal activity in rats. Due to differences in anatomy and scale factors, such an effect could be produced in man at SAR 4 times higher, i.e. of 24 W/kg, well above the recommended maximum level of 2 W/kg.

RÉFÉRENCES

Ammari M., Jacquet A., Lecomte A., Sakly M., Abdelmelek H., de Sèze R. Effect of head-only sub-chronic and chronic exposure to 900-MHz GSM electromagnetic fields on spatial memory in rats. *Brain Injury* (2008a) vol. 22, n° 13-14, p. 1021-1029.

Ammari M., Brillaud E., Gamez C., Lecomte A., Sakly M., Abdelmelek H., de Sèze R. Effect of a chronic GSM 900 MHz exposure on glia in the rat brain. *Biomedecine & Pharmacotherapy* (2008b) vol 62/4, p. 273-281.

Viel J.-F., Cardis E., Moissonnier M., de Sèze R., Hours M., 2009. Radiofrequency exposure in the French general population: band, time, location and activity variability. *Environment International*, 35 (2009) 1150-1154.

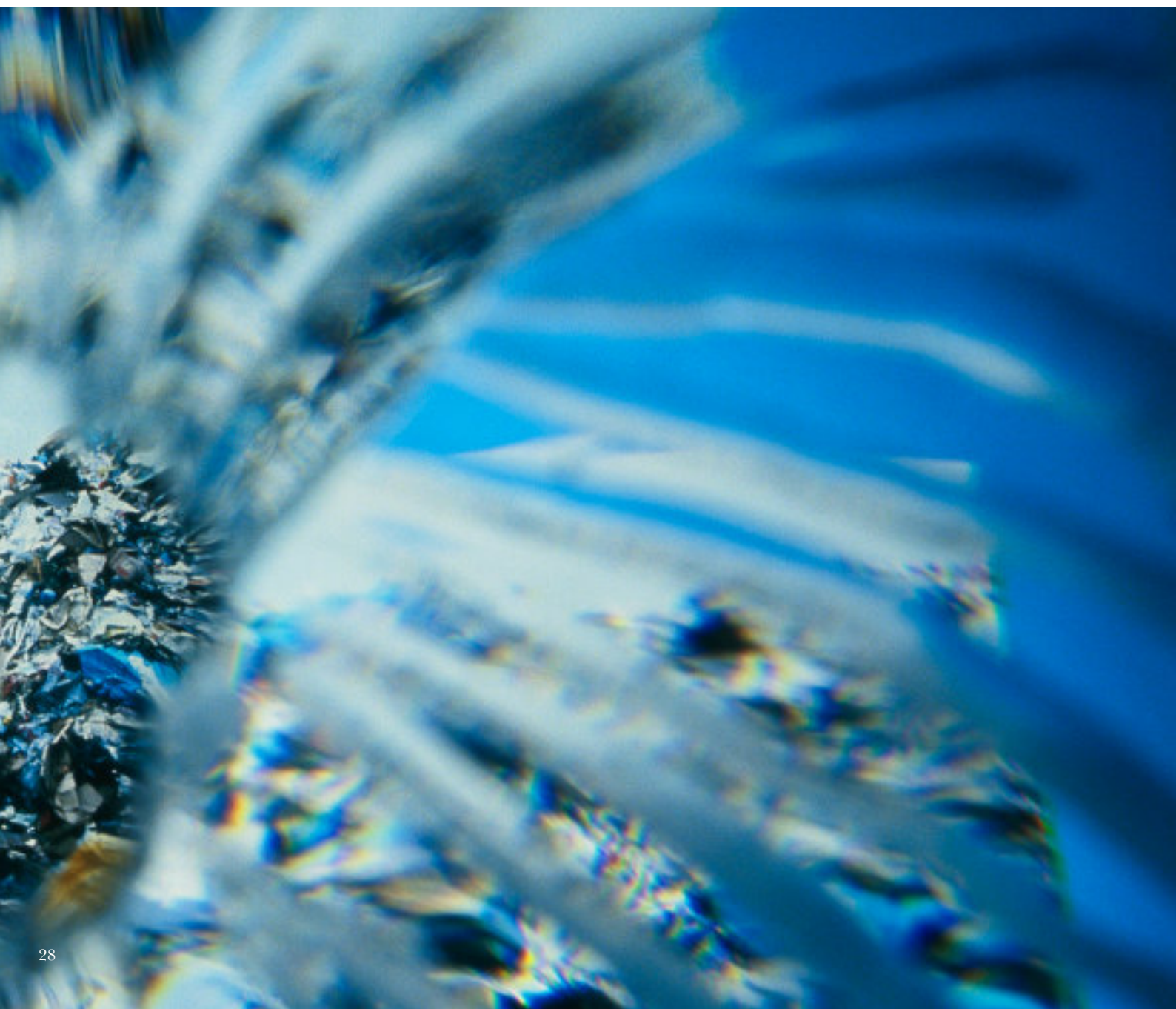
Rapport DRC-07-62798-11735A du 12/10/2007. Rapport intermédiaire sur les travaux Expométrie Radiofréquences.

Viel J.F., Hours M., Cardis E., de Sèze R. Évaluation de l'exposition aux RF dans la population générale : une étude pilote. 1^{ères} Journées Scientifiques de la Fondation Santé et Radiofréquences (FSRF), 25 oct 07.

Viel J.F., Hours M., Cardis E., de Sèze R. Évaluation de l'exposition aux radiofréquences dans la population générale : une étude pilote. Recueil des résumés des rencontres scientifiques de l'AFFSET, 5 octobre 2007, Paris, p. 22.

de Sèze R., Hours M., Cardis E., Cagnon P., Charpentier D., Viel J.F. French FR-expometry study. Abstract book of the 8th Congress of the European BioElectromagnetics Association, 10-13 april 2007, Bordeaux, p. 49.

L'air



Stratégie de recherche

Des projets définitivement internationaux

Malgré la diminution constante des niveaux d'émissions et de concentrations de certains polluants, la pollution de l'air reste un enjeu majeur de santé publique. Acteur reconnu de la prévention des risques sanitaires et environnementaux liés à la pollution atmosphérique, l'INERIS intervient sur tous les aspects de la surveillance et de l'amélioration de la qualité de l'air, de l'échelle locale à l'échelle globale : caractérisation des polluants gazeux et particulaires, développements méthodologiques d'identification et de quantification des polluants, élaboration et validation des stratégies de surveillance, développements d'outils prévisionnels de qualité de l'air, évaluation de l'impact des politiques de réduction des émissions. Cette expertise repose sur une importante activité de recherche en métrologie et modélisation, et contribue à une meilleure appréciation des interactions pollution atmosphérique/santé.

Les travaux de métrologie ont pour objectif l'amélioration des outils instrumentaux et la mise au point de méthodes et techniques de mesures innovantes. Ces travaux portent sur les polluants dits émergents : Composés Organiques Volatils (COV), dérivés polaires des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), particules ultrafines et nanoparticules. Ce rapport scientifique présente un outil adapté à la mesure de la concentration, de la taille et de la spéciation chimique des nanoparticules. Cet outil, qui repose sur l'analyse spectrale d'un plasma généré par une impulsion laser intense (Technique LIBS) répond à une double nécessité : surveiller l'ambiance autour d'un procédé de fabrication et garantir une qualité constante de nanoparticules (taille, composition chimique) par un contrôle continu de la production. Par ailleurs, la caractérisation de l'exposition personnelle et des micro-environnements aux Composés Organiques Semi-Volatils (COSV) constitue un autre sujet de préoccupation, plusieurs de ces composés étant suspectés ou ayant été identifiés comme des perturbateurs endocriniens ou des cancérigènes. Afin de permettre une évaluation plus précise de l'exposition, l'INERIS a mis au point une nouvelle méthode de prélèvement pour l'analyse

des COSV présentée dans ce rapport. D'autres travaux de recherche ciblés sur une meilleure connaissance des pollutions intérieures et de leurs processus de formation, portent sur la caractérisation spatio-temporelle et chimique des particules ultrafines produites dans l'environnement résidentiel et sur l'identification des principales sources contributrices. La formation des particules secondaires, à partir des COV susceptibles de réagir avec des espèces oxydantes telle l'ozone, sera également étudiée pour évaluer l'importance de ces phénomènes, encore peu documentés, en termes d'enjeux pour la qualité de l'air intérieur.

La compréhension de l'origine des polluants atmosphériques et la modélisation de leur formation et de leur devenir dans l'atmosphère constitue une priorité scientifique de niveau international, et un enjeu opérationnel pour la mise en œuvre des stratégies de contrôle. Outre les travaux dédiés à l'amélioration des capacités prévisionnelles de la plate-forme nationale de modélisation de la qualité de l'air PREV'AIR, des études spécifiques s'attachent à faire progresser l'état des connaissances afin d'optimiser les performances de la modélisation particulaire. L'objectif des travaux de l'INERIS est de mieux comprendre les processus de formation de la pollution particulaire, les phénomènes d'érosion et de remise en suspension de particules comme ceux liés à la production d'aérosols organiques secondaires (AOS) qui contribuent à augmenter les concentrations totales de particules. Les possibilités d'utilisation accrue des données d'observation de tous types (*in situ*, radio-sondages, mesures aéroportées et satellites) pour évaluer et améliorer la qualité des résultats de modélisation a fait l'objet d'un programme de recherche spécifique présenté dans ce document.

L'INERIS mène des recherches sur les interactions entre pollution atmosphérique et changement climatique. Ces études s'appuient sur des travaux de modélisation qui abordent l'impact du climat sur la qualité de l'air, notamment la concentration d'ozone et de particules, ainsi que la réciproque, les effets des polluants, en particulier les aérosols, sur le réchauffement de la planète.

Modélisation et surveillance de la qualité de l'air : de nouvelles données d'observation pour l'amélioration des modèles

{ F. Meleux, A. Ung, L. Rouil }

RÉFÉRENCES

Rapport INERIS : prise en compte d'observations tridimensionnelles pour l'évaluation et l'amélioration de modèles de chimie transport atmosphérique, DRC-08-94312-15144A (2009).

Ung A., Jonson E., Meleux F., Valdebenito A., Rouil L., Tarrason L. *Chimere and Emeq model calculations focusing on the mediterranean area* - IGAC, 8-12/09/2008, Annecy, France (2008).

Ung A., Meleux F., Rouil L., Kacnelengen M., Leon J.F., Chiapello I., Lifermann A. The use of polder satellite data for CHIMERE chemistry transport model - EGU general assembly, 15-20 avril 2007, Vienne, Autriche. + Geophysical Research Abstracts, 2007, vol. 9, 01033, (2007).

NOTE

(1) Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) et Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA).

Ces dernières années, des progrès considérables ont été réalisés dans le développement et la mise en œuvre de modèles de Chimie-Transport (CTM) simulant la formation et le comportement de polluants atmosphériques primaires et secondaires.

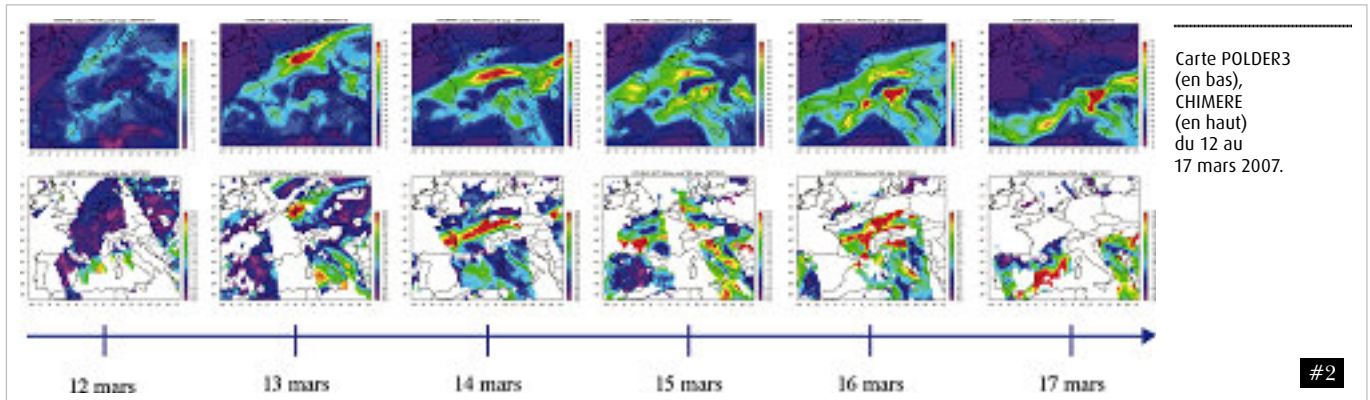
De ce fait, les exemples de mise en œuvre opérationnelle de ces modèles se sont multipliés, en appui aux donneurs d'ordre, et dans l'optique de mieux informer/sensibiliser le public aux questions de pollution atmosphérique. L'INERIS est toujours fortement impliqué dans ces applications et poursuit, en collaboration avec les équipes du CNRS⁽¹⁾, le développement du modèle de Chimie-Transport CHIMERE. CHIMERE simule l'évolution des concentrations atmosphériques de polluants tels que l'ozone, les oxydes d'azotes et les particules à court terme (voir le système opérationnel de prévision et de cartographie PREV'AIR, www.prevoir.org), ou à moyen terme sous différentes hypothèses d'évolution des émissions et de la météorologie. Tout système opérationnel repose sur l'amélioration continue de la qualité des résultats fournis par les modèles et sur le contrôle de leur fiabilité.

À cette fin, au-delà des réseaux de stations d'observation au sol, fournissant des données de base exploitées par la communauté, d'autres observations de la composition chimique de l'atmosphère, tridimensionnelles, sont disponibles et peuvent compléter utilement un dispositif de surveillance. Outre l'exploitation brute de ces informations, elles

peuvent être utilisées pour l'évaluation des modèles ou être assimilées dans les calculs pour améliorer les prévisions ou les analyses cartographiques. Ces données proviennent de réseaux de systèmes de mesures optiques (LIDAR), de radiosondages, de systèmes embarqués sur des vols réguliers ou encore de satellites. L'enjeu lié à l'utilisation de ces nouvelles sources d'information a paru suffisamment important à l'INERIS pour qu'il développe des travaux de recherche sur ce sujet. Il s'agissait aussi de qualifier les bases de données pouvant être mises à profit quotidiennement en routine dans le système PREV'AIR.

Outils et méthodes

Plusieurs bases de données ont été sondées à la fois pour l'ozone et les particules. Une attention particulière a été portée aux données satellite avec notamment l'étude des observations issues des missions POLDER, MODIS et CALIPSO. Ce projet fut l'occasion de développer de nouvelles collaborations : avec le CNES pour l'exploitation des données POLDER, avec le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (CNRS/LOA) pour l'étude des données POLDER, CALIPSO et de celles issues du réseau mondial de photomètres, AERONET, avec le Laboratoire d'Aérodynamique (CNRS/LA) pour les données aéroportées MOZAIC. À noter que l'utilisation de ces données requiert un traitement préalable qui permet de reconstituer des indicateurs communs à l'observation et à la modélisa-



tion. C'est un point particulièrement sensible pour les polluants particulaires. Généralement, les instruments optiques mis en œuvre dans les réseaux de LIDAR, de photomètres, ou embarqués dans des missions spatiales ne mesurent pas de concentrations proprement dites mais des coefficients de rétrodiffusion ou des épaisseurs optiques d'aérosols (AOT).

Une fois ces questions de conversion réglées, il est possible de procéder à une évaluation tridimensionnelle des concentrations simulées par le modèle CHIMERE par rapport à ces données d'observation et réciproquement d'assimiler ces informations dans le modèle pour en corriger les biais. Dans ce programme de recherche le processus d'assimilation a été conçu en vue de corriger les données d'initialisation de la prévision CHIMERE pour une échéance donnée. Sa pertinence a donc été évaluée en vue d'une mise en œuvre opérationnelle dans PREV'AIR. Cette démarche bilatérale a été considérée pour l'ensemble des bases de données tridimensionnelles disponibles en Europe.

Résultats et perspectives

À cause de la non-périodicité des mesures, on ne peut envisager l'usage en assimilation de données issues de vols équipés, dans le contexte opérationnel de prévision de la qualité de l'air. Néanmoins c'est une donnée intéressante en évaluation. La comparaison des profils verticaux de concentration d'ozone simulés par CHIMERE par rapport aux données mesurées lors de vols réguliers instrumentés dans le cadre du programme MOZAIK a permis de mettre en évidence les limites du modèle dans la troposphère libre (figure 1). Dans les basses couches de l'atmosphère les résultats

sont plus cohérents, même si parfois la variabilité n'est pas bien reproduite. L'analyse réalisée a pointé comme source d'amélioration la qualité des conditions aux limites supérieures et latérales du domaine d'étude, plutôt que la nécessité de raffiner la résolution verticale.

Une grande partie des travaux réalisés a été ciblée sur les particules. La comparaison d'indicateurs d'opacité ou de coefficients de rétrodiffusion mesurés par les satellites et les photomètres avec les simulations de concentrations de particules fines (PM2.5) fournies par CHIMERE a permis de mettre en évidence, sur plusieurs périodes s'étendant de 2003 à 2007 le bon comportement du modèle (figure 2). La donnée de mesure satellite s'avère particulièrement précieuse pour identifier des épisodes de pollution d'origine anthropique ou naturelle (poussières désertiques).

Enfin, une méthodologie pour intégrer les données satellitaires dans le modèle CHIMERE a été développée et appliquée sur les données PARASOL de la mission POLDER3. Elle repose sur la possibilité d'initialiser correctement le modèle de Chimie-Transport avant la prévision et se décline en trois étapes.

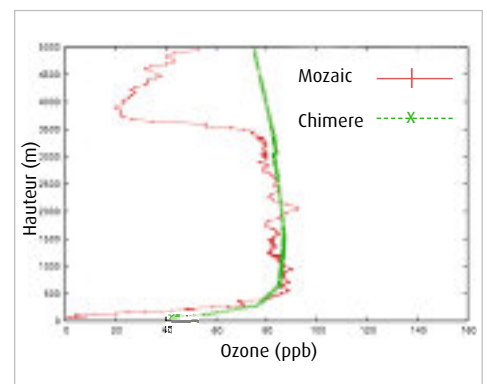
1) Conversion des concentrations simulées d'aérosol en épaisseurs optiques atmosphériques (AOT). Une loi de conversion des AOT en masse d'aérosol permet d'estimer une concentration massique observée par le satellite. Elle permet aussi de définir une carte analysée de colonnes de concentrations d'aérosol qui combine l'information issue du modèle et la mesure satellitaire. En première approximation, la loi de conversion utilisée peut être une régression linéaire et empirique entre deux ensembles de données à définir.

Cette méthode constitue une première étape

NOTES

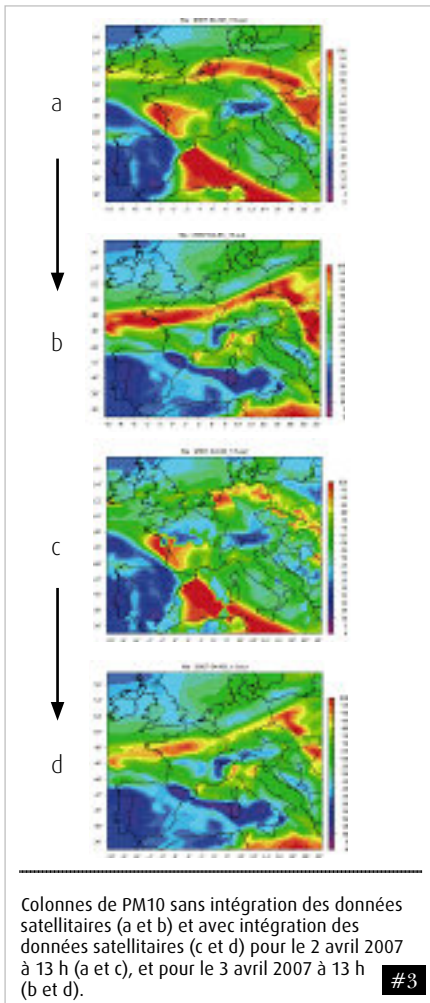
(2) Global Monitoring for Environment Security (www.gmes.info).

(3) Monitoring Atmospheric Chemistry and Climate.



Écart entre profil MOZAIK et profil CHIMERE au niveau de la troposphère libre pour le 13 août 2003 à 3 h.

#1



dans le cycle de travail qui doit nous amener à réaliser des comparaisons systématiques modèle - observation satellite. Ensuite il conviendra d'utiliser un module radiatif, en cours de développement (Thèse INERIS), pour directement calculer des AOT à partir de la constitution de l'atmosphère simulée par CHIMERE.

2) Initialisation de CHIMERE avec la carte analysée. La simulation CHIMERE est stoppée lorsqu'une donnée PARASOL et la carte analysée correspondante sont disponibles. Cette carte analysée est utilisée pour redistribuer spatialement les concentrations massiques. C'est à ce niveau qu'il convient de définir les zones géographiques et les espèces affectées par l'apport de l'information satellitaire. Lorsqu'une information sur la répartition verticale des aérosols est connue, il est possible de la répercuter dans le modèle. Dans le cas contraire, le profil vertical reste identique à celui simulé.

3) Analyse des simulations avec les mesures disponibles. Il s'agit dans cette étape d'évaluer l'apport d'une initialisation utilisant les données satellitaires. Les effets de cette initialisation sur la simulation et comment l'information satellitaire évolue dans le modèle sont des questions avec des enjeux importants pour définir le nombre des observations satellitaires nécessaires pour contraindre le modèle CHIMERE.

Cette approche est contrainte par la qualité

des données disponibles (selon la couverture nuageuse par exemple) et la fréquence de revisite du domaine d'étude. En effet, la période, relativement courte, quelques heures, durant laquelle l'assimilation est active a été mise en évidence par les tests opérés par l'INERIS. Au-delà, le modèle assimilé « perd la mémoire » et se superpose au modèle de base. Ainsi l'initialisation par des cartes assimilant des observations en vue d'une prévision à un ou deux jours perd de son intérêt, si des données ne sont pas régulièrement disponibles. Cependant lorsque les données sont accessibles la correction des prévisions peut s'avérer significative et pertinente (figure 3 pour les particules PM10).

Ce programme de recherche avait pour objet de recenser et d'évaluer l'apport des données d'observation 3D disponibles en Europe, dans l'optique de réaliser des prévisions et des cartographies opérationnelles de la qualité de l'air. Si pour l'heure une grande partie des données d'observation tridimensionnelles accessibles ne paraissent pas répondre aux nécessités requises par PREV'AIR pour une utilisation opérationnelle, il a été démontré leur intérêt pour des analyses ponctuelles afin de comprendre et même d'anticiper des épisodes de pollution particuliers.

De plus, ce programme de recherche a permis de mettre en place au sein de PREV'AIR des structures logicielles permettant de traiter l'ensemble des données dont nous avons prospecté le potentiel, et de développer des liens avec la communauté satellite.

Les travaux entrepris vont être poursuivis avec nos partenaires français (LISA, LMD, LOA, Météo France, CNES) mais aussi dans un plus vaste contexte européen avec le développement des services de surveillance de l'atmosphère du programme GMES⁽²⁾. Le projet MACC⁽³⁾, coordonné par le Centre européen de prévision et auquel le consortium français PREV'AIR participe activement, a pour vocation de développer à l'échelle de l'Europe des systèmes intégrés de surveillance et de prévision de la qualité de l'air basés sur les observations *in situ* et satellite et les modèles. Dans ce cadre, l'INERIS, le CNRS et Météo France seront amenés à poursuivre les développements de techniques d'assimilation de données de tout ordre dans leurs modèles de Chimie-Transport et à participer à la spécification des besoins et des contraintes pour développer des systèmes et réseaux de mesure *in situ* et satellites *ad hoc*. À partir de ce programme l'INERIS est prêt à monter en puissance sur ces sujets.

ABSTRACT

Improvement of the forecasting and mapping skills of the models implemented in the PREV'AIR system (French operational air quality forecasting platform) goes through a wider use of observation data, whatever their type (ground level or 3D *in situ*, satellite retrievals). With this research program held from 2006 to 2008, INERIS processed and analyzed a large set of observational 3-Dimensional data issued from networks of radiosondes, LIDARS, photometers, aircrafts and satellites. It had been focused on ozone and Particulate Matter (PM) issues. The CHIMERE chemistry-transport model developed by INERIS and CNRS, which provides the PREV'AIR system with forecasts and analyzed maps, has been evaluated against these data. Special care had been accorded to the vertical variability of the simulated pollutant concentrations which are highly dependent from the model boundary conditions. Assimilation of 3D *in situ* and satellite data in models for correcting the initialization fields of the forecasting process had also been investigated. Operational implementation of such approaches is still constrained by the availability of the data: satellite information is cloud-cover dependant and its temporal resolution is still too sparse. However it has been demonstrated that when the data are available, the approach can improve significantly the results, but this positive effect collapses few hours after the assimilation.

Mise au point d'une nouvelle méthode de prélèvement pour l'analyse des composés organiques semi-volatils

{ Y. Fagault, E. Leoz-Garziandia }

Il est maintenant reconnu que l'air intérieur contribue à l'exposition individuelle aux polluants atmosphériques de façon très significative. Le temps passé dans les environnements intérieurs est largement supérieur à celui passé à l'extérieur, de plus, certaines sources de pollution y sont spécifiques. Parmi les nombreux composés identifiés dans les environnements intérieurs plusieurs sont considérés comme toxiques voire cancérigènes.

Parmi les sources de polluants spécifiques aux environnements intérieurs on peut citer : la combustion (fioul, gaz, charbon, bois, tabac), les matériaux de construction et de décoration (peintures, bois aggloméré, colle), les détergents, les produits d'entretien. À ces sources se rajoutent bien évidemment les sources de pollution extérieure.

Les différentes substances organiques ainsi présentes peuvent être classées dans quatre catégories distinctes, afin de faciliter leur identification et leur caractérisation :

- les composés organiques très volatils,
- les composés organiques volatils (COV),
- les composés organiques semi-volatils (COSV),
- les composés organiques particulaires (adsorbés sur les particules présentes dans l'air).

Par ailleurs, l'utilisation des appareils de mesure portatifs se développe pour caractériser l'exposition individuelle de manière globale, en intégrant les différents lieux de vie et les déplacements. Cependant, si des appareils portatifs de mesure pertinents sont

disponibles sur le marché, d'une part pour les polluants gazeux, et d'autre part pour les particules, les appareils disponibles pour la mesure de COSV ne permettent pas d'atteindre les limites de détection suffisantes pour appréhender les expositions individuelles, alors qu'il s'agit parfois de substances représentant des potentiels de risques sanitaires préoccupants.

Dans ce contexte, l'objectif de la présente étude était de s'intéresser à la mesure des COSV, qui se trouvent, par définition, à la fois en phase gazeuse ou en phase particulaire (tension de vapeur de 10^{-2} à 10^{-8} kPa).

Objectifs de l'étude

L'objectif de la présente étude était de développer un appareil de mesure individuel portatif pour la mesure de différents COSV d'intérêt en termes d'enjeux sanitaires dans les environnements intérieurs [Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), phtalates, pesticides, organophosphates, phénols], appareil qui soit compatible avec la désorption thermique, technique permettant d'analyser la totalité de l'échantillon prélevé et, d'atteindre ainsi des limites de détection faibles et représentatives des concentrations de ces composés dans l'air intérieur [Fagault, 2007]. Pour ce faire, cette étude comprenait les étapes suivantes :

- 1) développement d'un générateur de vapeurs ;
- 2) étude des performances de la méthode développée ;
- 3) étude sur le terrain.

RÉFÉRENCES

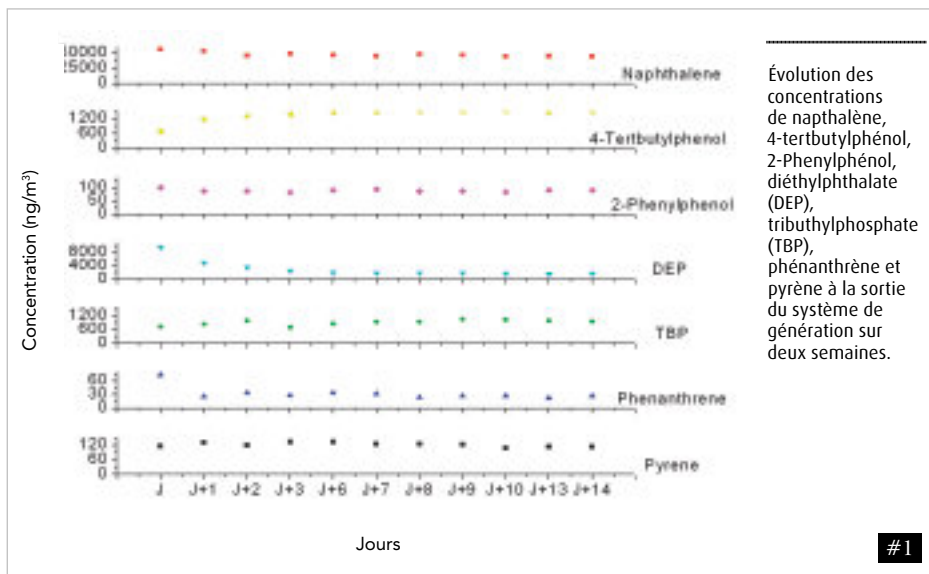
NRC, 1981. Indoor Pollutants. Committee on Indoor Pollutants, Board on Toxicology and Environmental Health Hazards, National Research Council.

Fagault Y., Leoz-Garziandia E., Sokhi R.S., 2003. Development of a vapour generation system for PAHs and other volatils semivolatile compounds, 19th international symposium on PAC, Amsterdam, Poster.

Fagault Y., 2007. Thermal desorption method for determining atmospheric semivolatile organic compound concentrations. University of Hertfordshire.

Directive Européenne, 2004 : directive 2004/107/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant.

Norme CEN 2008 : NF EN 15549. Qualité de l'air : méthode normalisée pour le mesurage de la concentration du benzo[a]pyrène dans l'air ambiant, juillet 2008.



Résultats

Développement d'un générateur de vapeurs

Dans un premier temps, un générateur de vapeurs a été développé pour déterminer l'adsorbant le plus adapté à la mesure de COSV en étudiant le volume de rupture⁽¹⁾ de différents adsorbants disponibles sur le marché (Tenax TA, Carbo-pack C, Carbo-pack B, Tenax GR). La méthode de génération choisie a été basée sur la technique de diffusion à travers un capillaire. Cette méthode permet de générer un flux de vapeur à concentration constante pour différentes familles de composés pouvant varier de quelques ng/m³ à quelques µg/m³.

La figure 1 présente l'évolution des concentrations générées pour différents composés (HAP, phénols, phthalates, organophosphates) sur une période de deux semaines.

Une fois des concentrations stables sur des durées suffisamment longues atteintes, le volume de rupture a été calculé en faisant traverser de l'air contenant les composés choisis aux concentrations générées au travers des différents adsorbants sur des durées différentes.

Suite aux résultats obtenus, le Tenax TA a donné des résultats satisfaisants pour toutes les familles de composés étudiés sur des prélèvements de 24 heures à un débit de prélèvement de 0,5 l/min [Fagault *et al.*, 2003].

Étude des performances de la méthode développée

La méthode développée suite aux travaux précédents était la suivante. On réalise simultanément des prélèvements d'une part de la phase particulaire (PM 2.5) sur un filtre de 37 mm en fibre de quartz, et d'autre part de la phase gazeuse sur adsorbant Tenax TA, sur 24 heures à un débit de 0,5 l/min. On réalise des analyses séparées d'une part du filtre par désorption thermique, et d'autre part de l'adsorbant par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse. Les limites de détection pour les 38 composés étudiés appartenant aux familles citées précédemment étaient comprises entre 0,01 et 0,5 ng/m³.

La validation de cette méthode a été réalisée pour les HAP, composés réglementés dans l'air extérieur (Directive européenne 2004/107/CE). Pour ce faire, l'efficacité de désorption a été évaluée au moyen de particules de référence certifiées, et par comparaison de la méthode de désorption thermique développée, avec la méthode d'extraction par solvants normalisée par le CEN en application de la Directive (Norme CEN, EN 15549). Les résultats montrent que la méthode développée est efficace pour analyser des HAP avec un poids moléculaire inférieur ou égal au benzo[a]pyrène (B[a]P) (coefficient de corrélation $r^2 = 0.98$). L'efficacité pour les HAP plus lourds étant comprise entre 40 et 50 % en raison d'une désorption incomplète.

Une validation complémentaire a été réalisée en comparant l'appareil portatif développé avec un appareil de prélèvement couramment utilisé par les associations de surveillance de la qualité de l'air extérieur sur leurs stations de mesure. Les résultats obtenus ont confirmé ceux obtenus précédemment (coefficients de corrélations $r^2 = 0.98$ pour la phase particulaire et $r^2 = 0.95$ pour la phase gazeuse).

Étude sur le terrain

L'utilisation de cette méthode pour l'évaluation de l'exposition individuelle a été étudiée, sur site réel, sur une période de 6 jours. Des prélèvements en air extérieur, et intérieur (salon et cuisine et chambre dans un appartement) ont ainsi été réalisés à Paris.

NOTE

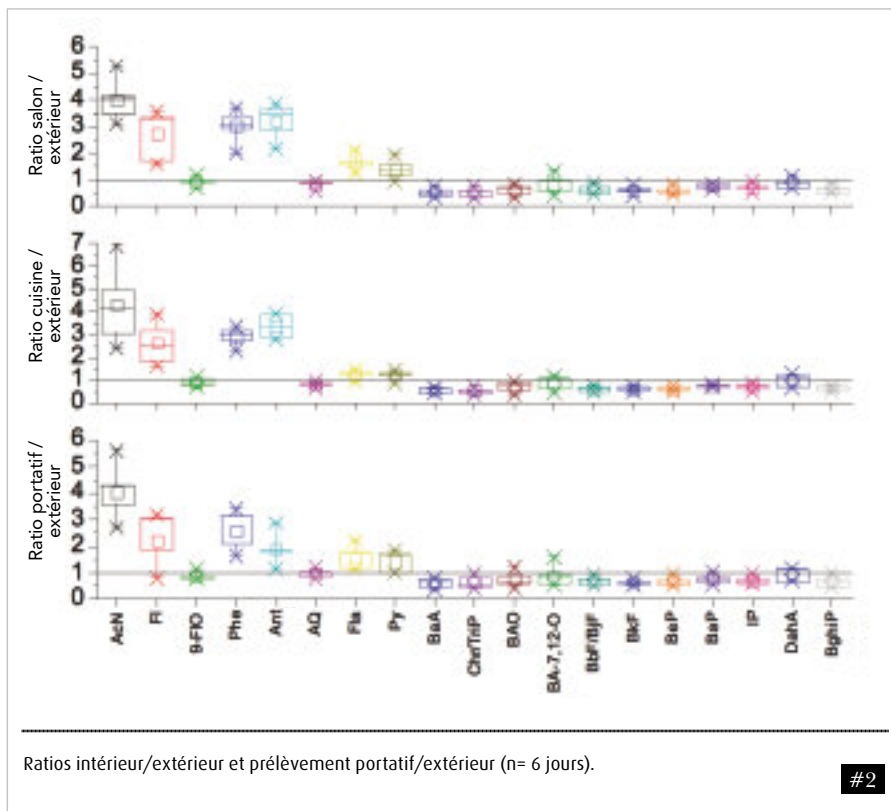
(1) Volume d'air maximum pouvant traverser l'adsorbant afin de réaliser un prélèvement quantitatif du composé ciblé.

Les résultats ont montré la présence de HAP, phtalates et d'organophosphates dans tous les prélèvements effectués. Les sources intérieures étant majoritaires pour les phtalates et les organophosphates.

En ce qui concerne les HAP, cette étude a confirmé que les concentrations de HAP volatils sont plus importantes en air intérieur qu'en air extérieur avec des ratios supérieurs à 2 (figure 2). Une influence non négligeable des activités dans les appartements voisins a également été mise en évidence.

Les appareils portatifs couplés à la désorption thermique permettent le déploiement d'un grand nombre de préleveurs, du fait de leur coût relativement réduit, et d'une analyse rapide et suffisamment sensible pour une utilisation pertinente dans l'air intérieur.

La méthode développée dans le cadre de cette étude, très novatrice, permet de mesurer des familles de substances de grand intérêt sur le plan sanitaire, présentes aussi bien en phase gazeuse qu'en phase particulaire. Elle est adaptée à l'évaluation de l'exposition personnelle d'un grand nombre de composés dont le benzo[a]pyrène bien qu'elle ne soit pas complètement optimisée pour les composés les plus lourds.



#2

ABSTRACT

It is now recognised that indoor environments contribute significantly to human exposure to airborne pollutants. Among the chemicals released in indoor environments, some of them have been identified as hormonally active or carcinogens. The objective of this study has been to develop an analytical method based on thermal desorption (TD) for the measurement of semivolatile organic compounds (SVOCs) to be used for indoor and personal measurements. The sampler consists of a small PM_{2.5} impactor upstream of a sample tube filled with the adsorbent Tenax TA to collect the particulate and gaseous phases respectively. The experimental work focused on the development of a vapour generation system, the development of the analytical method for the analysis of both the gaseous and particulate phases and the evaluation of the performance of the developed method. The analytical method was developed for 16 PAHs, 6 OPAHs, 5 phthalates, 2 organophosphate esters, 3 alkylphenols and 5 pesticides. Its applicability for PAHs measurements was verified with a standard reference material and by comparison of indoor air filter strips analysed by the TD method and a conventional solvent extraction method. The TD method was shown to be quantifiable for PAHs up to benzo[a]pyrene but less effective for less volatile PAHs. A small demonstration study consisting of twenty four hours indoor and personal measurements was carried during six days. The results obtained in this demonstration study were in agreement with most previous studies reporting indoor heavy PAHs concentrations lower or similar than outdoor PAHs concentrations and light PAHs concentrations higher indoors than in outdoor environments. This demonstration study also confirmed that phthalates and organophosphate esters are ubiquitous in indoor environment.

Détection en temps réel de nanoparticules par spectroscopie de plasma induit par laser

{ C. Dutouquet, T. Amodeo, O. Le Bihan, E. Fréjafon }

RÉFÉRENCES

Hahn D.W., Lunden M.M., 2000. Detection and analysis of aerosol particles by laser induced breakdown spectroscopy. *Aerosol Science and Technology*, 33, 30-48.

Cheng, 1999. Real time measurement of trace metals on fine particles by laser-induced plasma techniques. *Fuel processing technology*, 65-66, 219-229.

Carranza J.E., Ficher B.T., Yoder G.D., Hahn D.W., 2001. On line analysis of ambient air aerosols using laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B : Atomic spectroscopy*, 56, 851-864.

Carranza J.E., Hahn D.W., 2002. Assessment of the upper particle size limit for quantitative analysis of aerosols using laser induced breakdown spectroscopy. *Analytical Chemistry*, 74, 5450-5454.

Hahn D.W., Flower W.L., Henken K.R., 1997. Discrete particle detection and metal emissions monitoring using laser-induced breakdown spectroscopy. *Applied spectroscopy*, 51(12), 1836-1844.

Mukherjee D., Rai A., Zachariah M.R., 2005. Quantitative laser-induced breakdown spectroscopy for aerosols via internal calibration: Application to the oxidative coating of aluminum nanoparticles. *Journal of aerosol science*, 37(6), 677-695.

Dutouquet C., Amodeo T., Le Bihan O., Fréjafon E. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS): A possible tool for on-line monitoring and surveillance of nanoparticle production processes* NANOSAFE2 Dissemination Report, September 2009, DR-N°1312 200909-8.

Le début du XXI^e siècle est marqué par l'avènement d'une nouvelle industrie : celle des nanotechnologies. En effet les matériaux structurés à l'échelle nanométrique présentent des propriétés nouvelles et leurs applications sont très variées dans des domaines tels que la chimie, la pharmacie, l'électronique, etc. L'accroissement de ce marché est exponentiel et a doublé ces six dernières années en Europe pour atteindre un montant de 900 millions de dollars en 2005. Le projet européen Nanosafe (www.nanosafe.org) s'inscrit dans ce cadre. Il regroupe de nombreux organismes de recherche et des entreprises productrices de nanomatériaux et a pour objectif l'étude des risques liés à la production de nanoparticules. Ces risques peuvent être de nature toxicologique mais ces particules qui sont susceptibles de s'oxyder très rapidement accentuent aussi les risques d'explosion inhérents à toute poudre en suspension. Il apparaît indispensable de développer un outil capable de connaître l'évolution de la composition physico-chimique des aérosols sur les chaînes de production. Un tel dispositif doit pouvoir mesurer en temps réel la composition chimique et la taille de l'aérosol pour repérer, dans le cas d'un suivi de procédés industriels, les particules manufacturées dans un fond ambiant et d'en suivre l'évolution.

La solution retenue est basée sur le couplage de deux méthodes de mesure : l'analyse chimique par technique LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy), et une autre qui caractérise la mobilité électrique de l'aérosol grâce à un DMA (Differential Mobility Analyser). La technique LIBS est une méthode d'analyse basée sur la spectroscopie d'émission de plasma dans les gammes de longueur d'onde visible (200-800 nm). Elle

permet une analyse rapide, à distance, de tous types d'éléments qu'ils soient gazeux, solides ou liquides. Cette méthode connaît un succès croissant depuis quelques années avec l'avènement de lasers et de spectroscopes de plus en plus puissants. Plusieurs études [Hahn & Lunden, 2000 ; Cheng, 1999 ; Radziemski, Loree, Cremers & Hoffman, 1983] ont montré la faisabilité d'une analyse chimique en ligne des aérosols à l'aide de la technique LIBS, que ce soit pour de la surveillance de l'air ambiant [Carranza, Ficher, Yoder & Hahn, 2001] ou le contrôle d'émissions industrielles [Hahn, Flower & Henken, 1997]. Cette technique peut également être quantitative [Mukherjee, Rai & Zachariah, 2005]. Le couplage du LIBS avec un analyseur de mobilité électrique permet d'obtenir, en plus d'une caractérisation chimique, la composante dimensionnelle des aérosols. Les DMA couplés avec des compteurs de particules (CNC) permettent de connaître la distribution en taille et en nombre des aérosols dans l'air avec une haute résolution jusqu'au nanomètre [Rosser & De La Mora, 2005]. Les potentialités du système LIBS ont été évaluées en termes de détection de nanoparticules au voisinage des procédés de production. Pour optimiser l'enregistrement du signal LIBS des expériences d'imagerie ont été réalisées. Puis l'évolution temporelle du signal LIBS a été étudié en fonction de divers paramètres expérimentaux, tels que la nature du gaz ambiant, la longueur d'onde et l'énergie laser afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu dans le plasma et d'optimiser les paramètres d'enregistrement temporels du signal. Suite à ces optimisations, les premières limites de détection du système LIBS ont été évaluées et comparées aux valeurs limites d'exposition des travailleurs.

Descriptif expérimental

La génération d'aérosols

Deux systèmes de génération d'aérosols ont été utilisés : un atomiseur (tsi model 3076) ainsi qu'un générateur à décharge ou « spark generator ». Ces deux systèmes produisent des aérosols polydispersés. Le diamètre des particules générées par l'atomiseur varie en fonction de la concentration de la solution mère. Les composés de base sont dilués dans l'eau distillée, et le diamètre médian des particules produites se situe autour de 50 nm. En ce qui concerne le générateur à décharge, une haute tension initie un arc électrique entre deux électrodes conductrices. De la vapeur est créée puis se condense pour former des aérosols de taille inférieure à 300 nm. Pour les expériences avec le chlorure de sodium, un flux de particules monodispersé a pu être obtenu en plaçant Le DMA (analyseur de mobilité électrique) en aval de l'atomiseur.

Dispositif expérimental pour l'imagerie spectrale et l'analyse LIBS

Les particules générées sont introduites dans une cellule d'analyse à l'intérieur de laquelle un plasma est créé par un laser délivrant des impulsions d'énergie 150 mJ et d'une durée de 5 ns à une longueur d'onde de 1064 nm. Le faisceau est focalisé à l'aide d'une lentille plan convexe en silice fondue de 35 mm montée sur une face de la cellule d'analyse (dite face d'entrée). La partie du faisceau laser non absorbée par le plasma traverse la cellule jusqu'au hublot de sortie avant d'être arrêtée par un dispositif stoppeur de faisceau. Un troisième hublot monté sur une face perpendiculaire aux deux autres permet de collecter la lumière émise par le plasma pour les expériences d'imagerie et l'analyse LIBS dans une direction perpendiculaire à l'axe du faisceau laser. Une caméra CCD intensifiée équipée d'un objectif Nikon (50 cm de focale) monté sur anneaux d'extension a permis d'enregistrer les images du plasma avec un grandissement de 3/2. Un filtre interférentiel centré sur la raie du doublet du sodium (588.9 nm) a été utilisé pour l'imagerie spectrale. Le signal LIBS a été collecté avec une lentille de 50 mm de focale. L'image du plasma sur l'entrée de la fibre optique a été réalisée avec un agrandissement de 1/3. La fibre est reliée à un spectromètre équipé d'une caméra identique à celle utilisée pour l'imagerie.

Résultats

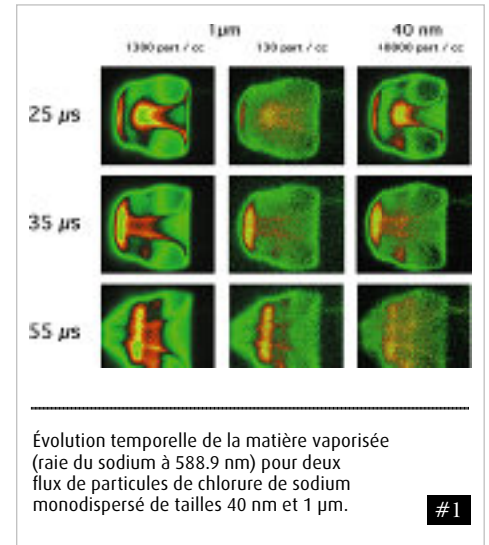
Imagerie spectrale

Des expériences d'imagerie spectrale résolue en temps ont été réalisées afin de détecter d'éventuels effets de tailles lors de la vaporisation de particules dans un plasma induit par laser.

La première série a été obtenue lors de la vaporisation de particules de 40 nm avec des concentrations en nombre et en masse de 50 000 particules/cm³ et 3,7 µg/m³ respectivement. Les deux autres séries ont été enregistrées pour des flux de particules de 1 µm de diamètre avec des concentrations en masse de 150 et 1 500 µg/m³ correspondant à des concentrations en nombre de 130 et 1 300 particules/cm³ respectivement.

Afin d'obtenir un meilleur rapport signal sur bruit, ces images ont été obtenues en accumulant le signal à partir de plusieurs claquages plasma soit 100 et 200 respectivement lors de la vaporisation de particules de 1 µm et 40 nm. Une série d'images supplémentaire obtenue lors des claquages lasers, sans présence de particules, a été enregistrée avec les mêmes paramètres expérimentaux.

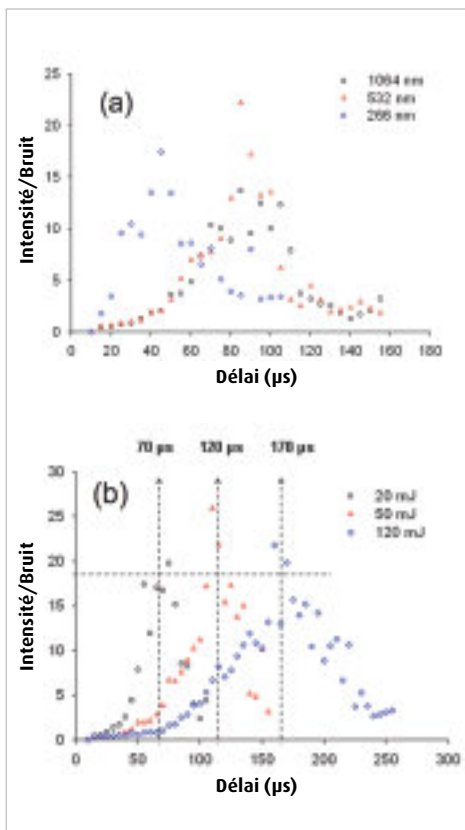
Les images spectrales représentant l'évolution de la matière vaporisée dans le plasma induit par laser en fonction du temps ont été obtenues en soustrayant les images enregistrées sans particules des images enregistrées avec particules (figure 1). Un premier examen de ces images permet de remarquer que la répartition spatio-temporelle de la matière vaporisée est quasiment identique quelles que soient les tailles des particules. Elles révèlent également que l'émergence de la matière vaporisée survient à un délai relativement long (15 µs) comparé à d'autres applications LIBS (où le signal apparaît pour des délais de 1 µs), le délai étant identique quelle que soit la taille des particules. L'analyse des images a également révélé que le plasma est très stable aux énergies utilisées, point très important pour les mesures analytiques. Enfin, ces images montrent que la matière vaporisée se répartit essentiellement le long de l'axe de symétrie du plasma. C'est sur cette zone que la fibre optique a été pointée. Une analyse plus poussée de la collection par fibre (basée sur les résultats d'imagerie) a été réalisée [Amodeo, 2008].



Conditions expérimentales (figure 1)

Milieu	air à pression atmosphérique	
Délais *	< 20 µs	> 20 µs
Temps d'exposition	1µs	3µs

* Délais : temps écoulé entre le début du tir laser et le déclenchement de l'enregistrement par la caméra ICCD en microsecondes.



Évolution temporelle du signal LIBS (raie du cuivre à 324 nm) (a) pour trois longueurs d'onde laser différentes, $E_{\text{laser}} = 120 \text{ mJ}$, et (b) pour trois énergies laser différentes, gaz ambiant argon et $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Chaque point correspond à un spectre enregistré à un délai donné avec un temps d'exposition de 500 ns, chaque spectre étant le résultat de l'enregistrement de 800 tirs laser.

#2

Conditions expérimentales (figure 2)	
Nature des flux de particules	aluminium
Tailles	inférieures à 200 nm
Concentrations	1,5 mg/m ³ milieu air, argon ou azote
Énergie laser	20, 50 ou 120 mJ
Longueur d'onde laser	266, 532 ou 1064 nm
Temps d'exposition	500 ns

Étude paramétrique du plasma

Des études précédentes ont montré l'indépendance du signal LIBS avec la taille, la concentration en nombre et la concentration en masse des particules analysées pour des tailles s'échelonnant de 40 à 500 nm, des concentrations en nombre et en masse jusqu'à au moins 10 000 particules/cm³ et 1,5 mg/m³ respectivement. Pour optimiser les résultats LIBS, d'autres expériences ont été réalisées afin d'étudier la réponse en fonction du gaz ambiant, de la longueur d'onde et de l'énergie du faisceau laser.

Un flux polydispersé de particules d'aluminium a été produit à l'aide du générateur à étincelles. Les courbes présentées sur la figure 2 mettent en évidence que les délais correspondant au maximum des intensités LIBS se décalent vers des valeurs plus hautes lorsque la longueur d'onde passe de 266 à 1064 nm et lorsque l'énergie laser augmente. Le même phénomène a été observé en changeant le gaz vecteur et en passant de l'air à l'argon. Afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu, la température du plasma correspondant aux maxima d'intensité LIBS, pour les trois différents délais a été calculée à partir des raies d'argon lorsque l'énergie laser a été augmentée. La température trouvée pour les trois différents délais s'est avérée identique, un effet déjà souligné par Carranza et Hahn. L'évolution temporelle du signal LIBS a été étudiée aussi en fonction de la nature de l'élément chimique qui compose les nanoparticules.

Les maxima d'intensité LIBS apparaissent ici encore pour des délais distincts. Une simulation de la cinétique du plasma, reposant sur une modélisation à l'équilibre Thermodynamique Local (ETL) a été réalisée pour ces mêmes éléments. Il est apparu une très bonne concordance entre les évolutions expérimentales et simulées. De plus, les courbes ont mis en évidence que chaque élément rayonne à une température préférentielle. Statistiquement, les particules sont vaporisées en majorité par le plasma et non pas directement par le laser. Ainsi, le changement de paramètres tel que le gaz ambiant, la longueur d'onde ou l'énergie du laser influencent l'évolution de la température du plasma. Par exemple, lorsque l'énergie du laser augmente, le volume du plasma augmente. La vitesse de

refroidissement du plasma est donc plus lente et la température du plasma correspondant à la température préférentielle d'émission de l'élément composant les particules vaporisées est donc plus longue à atteindre. Le délai correspondant au maximum d'intensité LIBS s'en trouve donc rallongé.

Le plasma induit par laser est un phénomène transitoire et la fenêtre temporelle d'enregistrement du signal LIBS doit être convenablement choisie. Ces évolutions sont donc très importantes à prendre en compte pour choisir les délais et temps d'exposition adéquats lors de l'analyse LIBS de particules dans un gaz. L'enregistrement se fera avec un meilleur rapport signal sur fond et les meilleures limites de détection seront obtenues.

Résultats analytiques

À partir des résultats obtenus précédemment, l'enregistrement des spectres a pu être optimisé spatialement et temporellement pour des nanoparticules de différentes natures chimiques. Les résultats présentés dans le tableau 1 ont été obtenus avec des flux de nanoparticules, en mode polydispersé, de diamètre médian d'environ 50 nm et de natures chimiques diverses. À une longueur d'onde laser de 1064 nm et une énergie de 120 mJ, le délai a été adapté en fonction de l'élément chimique, pour un temps d'exposition de 100 µs. Les valeurs limites d'exposition ont été obtenues à partir de valeurs recommandées par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) et HSL (Health and Safety Laboratory, Grande-Bretagne). Les limites de détection obtenues sont inférieures à celles préconisées par l'INRS ou HSL.

Il n'existe pas de valeurs limites d'exposition correspondant aux nanoparticules. Bien que ces résultats soient encourageants, les limites d'exposition vont probablement être révisées à la baisse dans les années à venir. Les limites de détection du dispositif LIBS et la répétabilité (RSD) inférieure à 25 % de ces expériences pourraient encore être améliorées.

Conclusion et perspectives

Les expériences réalisées ici ont permis d'étudier les potentialités de la technique LIBS pour la surveillance des procédés de production et la dépendance du signal LIBS en fonction de paramètres tels que la nature du gaz ambiant,

la longueur d'onde et l'énergie laser. Des expériences d'imagerie spectrale ont permis d'optimiser l'analyse de la distribution de la matière vaporisée à l'intérieur du plasma induit par laser. La vitesse de refroidissement du plasma est influencée par un changement de ces paramètres. Dès lors, comme les éléments qui constituent les nanoparticules vaporisées dans le plasma ont un maximum d'émission LIBS pour une température donnée, le maximum d'intensité sera d'autant plus long à atteindre que le plasma se refroidira lentement. La cinétique du signal LIBS et donc le délai correspondant au maximum d'intensité peuvent être différents selon les paramètres étudiés. Le plasma induit par laser ayant un caractère transitoire, la détermination des paramètres d'enregistrement temporels est très important pour obtenir le meilleur rapport signal sur bruit. Enfin, suite à ces optimisations, les premières limites de détection ont été évaluées. Elles sont inférieures dans bien des cas aux valeurs limites d'exposition couramment trouvées (Amodeo, 2008). Cependant, le caractère ultrafin des particules n'étant pas pris en compte dans ces limites d'exposition, ces

Nature des flux de particules	Concentration minimum détectée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Limite d'exposition ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (durée de 8 h)	Substances
Al	560	4 000	poussière
Cu	80	200	vapeurs, fumées
		1 000	poussières
Ti	430	4 000	respirable, TiO_2
Ca	10	4 000	respirable
Mg	10	4 000	fumées et poussières
Na	2	-	-
Cd	500	30	poussières
Cr	50	500	-
Fe	310	5 000	fumées
Ni	250	100	-
Si	100	4 000	poussières

Tableau 1 : Limites de détection LIBS (Amodeo, 2008).

dernières seront donc probablement révisées à la baisse dans les années à venir. Les limites de détection pourraient encore être améliorées en optimisant la collection ou en affinant le traitement de données. Il pourrait également être envisagé de collecter les nanoparticules sur un substrat et de les analyser à intervalle de temps régulier. Cette méthode, semi-temps réel, adéquate dans le cadre du risque chronique pourrait permettre d'améliorer grandement les limites de détection.

ABSTRACT

Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) has been employed to detect sodium chloride and metallic particles with sizes ranging from 40 nm up to 1 μm produced by two different particle generators. The LIBS technique combined with a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) was evaluated as a potential candidate for workplace surveillance in industries producing nanoparticle-based materials. Though research is still currently underway to secure nanoparticle production processes, the risk of accidental release is not to be neglected. Consequently, there is an urgent need for the manufacturers to have at their command a tool enabling leak detection *in situ* and in real time so as to protect workers from potential exposure.

In this context, experiments dedicated to laser-induced plasma particle interaction were performed. To begin with, spectral images of the laser-induced plasma vaporizing particles were recorded to visualize the spatio-temporal evolution of the atomized matter and to infer the best configuration for plasma light collection, taking into account our experimental set-up specificity. Then, on this basis, time-resolved spectroscopic measurements were performed to make a first assumption of the LIBS potentialities. The influence on the LIBS signal of parameters such as chemical nature of particles, their concentrations, laser wavelength, laser energy, kind of background gas was investigated and temporal optimization of the LIBS signal recording settings was achieved. Eventually, repeatability and limits of detection were assessed and discussed.

RÉFÉRENCES

- Rosser S., De la Mora J., 2005. Vienna-Type DMA of High Resolution and High Flow Rate. *Aerosol Science and Technology*, 39, 1191-1200.
- Carranza J.E., Hahn D.W. Sampling statistics and considerations for single-shot analysis using laser-induced breakdown spectroscopy, *Spectrochim. Acta*, Part B 57 (2002) 779-790.
- Amodeo T. Caractérisation de l'interaction d'aérosols avec un plasma induit par laser : application à la métrologie de nanoparticules manufacturées. Thèse de doctorat en physique soutenue sur invitation le 8 octobre 2008.
- Amodeo T., Dutouquet C., Tenegal F., Guizard B., Maskrot H., Le Bihan O., Fréjafon E. On-line monitoring of composite nanoparticles synthesized in a pre-industrial laser pyrolysis reactor using LIBS, *Spectrochimica Acta Part B* vol 63, N°10, p1183 (2008).
- Fréjafon E., Amodeo T., Dutouquet C., Dépôt de Brevet LIBS : N° 08 57147 *Procédé de mesure en ligne de la composition de nanoparticules* Réf. : 1H186130 0001FR BN/BED/IB.
- Amodeo T., Dutouquet C., Le Bihan O., Fréjafon 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*, accepted 30 July 2009, available online. doi:10.1016/j.sab.2009.07.031

Sols pollués

et risques autour des installations classées



Stratégie de recherche

L'évaluation du risque pour la santé des populations, formalisée dès les années 80 par l'académie des sciences des États-Unis a été intégrée aux procédures administratives françaises pour les installations classées (ERS) comme pour les sites pollués (EDR). Pour autant, certaines questions de nature scientifique ne sont pas maîtrisées. Leur résolution prend une importance particulière en raison des préoccupations de plus en plus marquées manifestées par les parties prenantes autour des sites concernés, et largement généralisées par le Grenelle de l'Environnement. De nombreux résultats manquent, d'autres sont soumis à controverses, parfois vives.

La recherche s'oriente ici dans trois directions : tester les hypothèses sur le plan des phénomènes physiques ou biologiques ; développer une démarche intégrée plus crédible et mieux insérée dans la décision ; élargir le domaine d'application des évaluations. En particulier depuis le Grenelle de l'Environnement, la dynamique d'innovation ajoute le besoin de développer et qualifier en termes d'impact environnemental des technologies propres.

Sur les mécanismes à maîtriser, l'effort de l'INERIS s'est porté sur des maillons faibles de la chaîne d'évaluation des risques qui va d'un rejet à l'effet sur le vivant. Ainsi la biodisponibilité a été examinée afin de comprendre – et si possible prédire – pourquoi des polluants en apparence similaires sont moins absorbés par les organismes vivants. En parallèle, les transferts de polluants dans des milieux particuliers sont étudiés, tels les solvants chlorés dans les eaux souterraines.

Sur la démarche globale, les questions non résolues sont nombreuses, et l'on a pu noter la coupure entre calculs prédictifs figurant dans les dossiers d'évaluation et données issues de la surveillance du terrain ; de même, la difficulté de maîtriser la façon dont les incertitudes interfèrent les unes avec les autres constitue un axe

d'amélioration des évaluations autour de sites évoqué ici et sur lequel l'INERIS travaille à long terme. Ces questions viennent d'ailleurs d'être relancées par l'Académie des sciences des États-Unis qui, après plus de vingt ans de recul, a préconisé l'an dernier une amélioration sur ces points.

Ce sont les élargissements du domaine qui posent les questions les plus variées. Au-delà des investigations en matière sanitaire, c'est toute la question de l'évaluation de l'impact sur l'environnement lui-même qui est maintenant développée et dont il est fait mention ici. Après le Grenelle, d'autres situations doivent être désormais examinées ; la question des situations postaccidentelles, et celle des « points noirs environnementaux » pour lesquels les méthodes sont à développer, émergent avec force parmi les préoccupations sociétales du moment. Ce sont aussi les « substances dans l'environnement », sur lesquelles il faut prioriser les efforts avec l'évaluation sur dossiers « à la manière de REACH » des substances, et le regard de terrain sur les situations réelles qui doivent désormais être mis en perspective, et en synergie ; ce sont autant de sujets sur lesquels l'INERIS travaille.

Enfin, la prise en compte des approches de gestion durable ne sont pas en reste. La validation de telles approches, à travers la valorisation des sous-produits comme les mâchefers, la gestion aidée par les plantes (phytorémédiation) de sols pollués, ou le développement concomitant des technologies propres et du cortège d'innovations et d'évolutions techniques doivent permettre une amélioration de la réduction à la source (maîtrise des rejets) et un progrès sensible des techniques de dépollution, y compris celles qui nécessitent un investissement énergétique faible. Tous ces travaux auxquels participe activement l'INERIS, impliquent l'évaluation des risques sanitaires et environnementaux, et s'inscrivent dans une démarche éclairée et cohérente de gestion intégrée des milieux environnementaux dégradés.

Évaluation de l'impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères utilisés en technique routière

{ R. Badreddine, D. Dabo, L. De Windt }

L'évaluation du devenir des déchets à moyen et à long terme a été longtemps basée principalement sur la caractérisation des déchets par des essais de lixiviation. Le couplage entre la diffusion, la dissolution et la précipitation de phases solides, mais aussi de la sorption dans certains cas, des polluants inorganiques en compliquent souvent l'interprétation et donc l'extrapolation aux conditions réelles de sites. L'extrapolation des résultats de laboratoire aux conditions de sites – conditions caractérisées par des rapports solution sur solide bien plus bas, des géométries spécifiques et complexes, des schémas d'infiltration cycliques, etc. – nécessite une démarche intégrant la modélisation géochimique couplée au transport.

La présente étude concerne le comportement de mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) dans le scénario de valorisation en sous-couche routière, l'objectif est d'en évaluer l'impact environnemental sur le sol sous-jacent et les eaux souterraines. La démarche mise en œuvre associe des appro-

ches de caractérisation physicochimique et minéralogique, d'expérimentation à différentes échelles (lixiviation au laboratoire et suivi sur sites réels) en intégrant la modélisation hydro-géochimique.

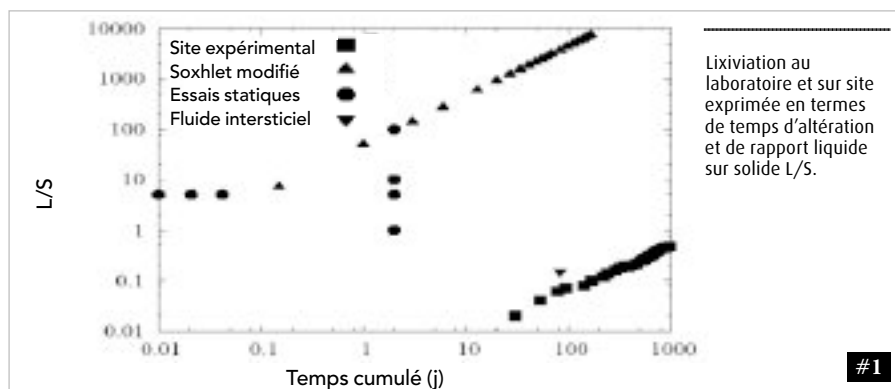
Caractérisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

La caractérisation des MIOM a été effectuée par des essais de lixiviation statique et dynamique (figure 1) et par des méthodes physiques telles que la diffraction des rayons X, la microscopie électronique, la microfluorescence X et L'EXAFS (Extended X-Ray Absorption Fine Structure).

L'essai de lixiviation dynamique en Soxhlet modifié a montré que l'hydrodynamique et l'état de saturation hydrique du MIOM sont des éléments clés vis-à-vis des mécanismes de relargage des éléments. L'essai dynamique par Soxhlet modifié indique que les fractions lixiviées sont faibles à très faibles par rapport au temps de lixiviation et par rapport à la quantité d'eau ayant transité dans le Soxhlet, excepté pour les ions chlorures et sulfates qui présentent un taux de relargage supérieur. Les éléments traces sont bien stabilisés au sein du MIOM. Le plomb, le zinc et, dans une moindre mesure, le cuivre sont ainsi peu lixiviés.

Suivi d'une route expérimentale

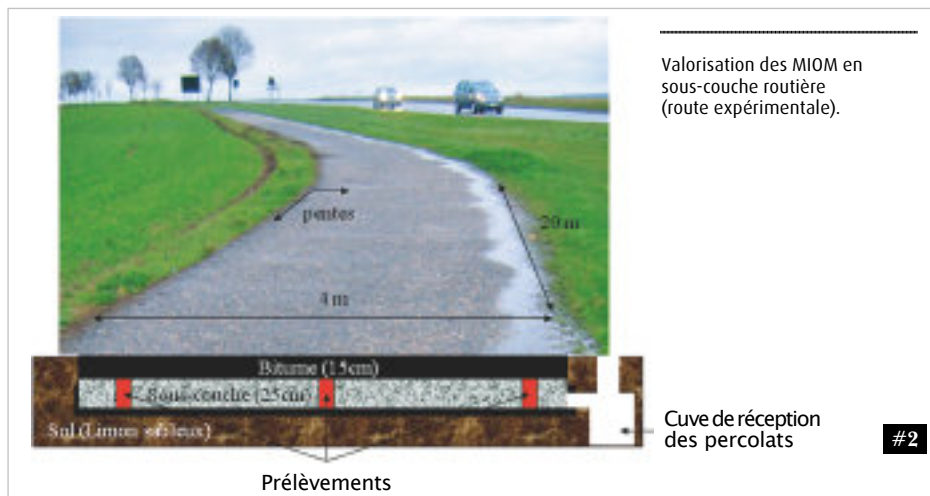
Une route expérimentale (figure 2) étudiée entre 1997 et 2000 par l'INERIS et EUROVIA a fait l'objet d'un nouveau suivi en 2007-2008. Ce suivi a consisté en l'analyse périodique des percolats issus des MIOM valorisés en sous-couche routière et en des prélèvements



des MIOM après dix ans de valorisation et leur comparaison avec les mâchefers similaires aux MIOM initiaux.

Le retour d'expérience de la valorisation des MIOM en sous-couche routière après une durée de dix ans a montré un relargage en décroissance nette des différents éléments (Pb, Cd, Zn, Cu...) (figure 3) avec des concentrations proches de celles rencontrées sur la route de référence construite avec du matériau conventionnel, sauf en ce qui concerne les sulfates dont les concentrations demeurent du même ordre de grandeur que celles mesurées en début d'expérimentation. La couverture bitumineuse joue un rôle prépondérant en protégeant la sous-couche routière à travers laquelle ne transite qu'une faible partie de l'eau de pluie.

En l'absence de modifications majeures de texture, les modifications minéralogiques observées sont principalement la disparition de l'étringite (sulfate de calcium). Du point de vue de la construction du modèle opérationnel, les résultats obtenus soulignent la nécessité de prendre en compte les passages préférentiels dans la construction du modèle de route pour décrire la stabilité minéralogique des MIOM au sein de la sous-couche routière.



Valorisation des MIOM en sous-couche routière (route expérimentale).

#2

Modélisation couplée géochimie-transport

L'élaboration du modèle géochimique de base est fondée principalement sur les mécanismes observés lors de la caractérisation et de l'expérimentation tant au niveau du laboratoire qu'à l'échelle de la route. Les résultats issus de la route ont été modélisés par le code couplé géochimie-transport (*Chess-Hytech*) et la validation du modèle a été possible en utilisant les résultats des expériences menées en laboratoire.

Les résultats de simulation sont en accord avec les essais statiques et ce, pour la majorité des éléments étudiés (figure 4).

RÉFÉRENCES

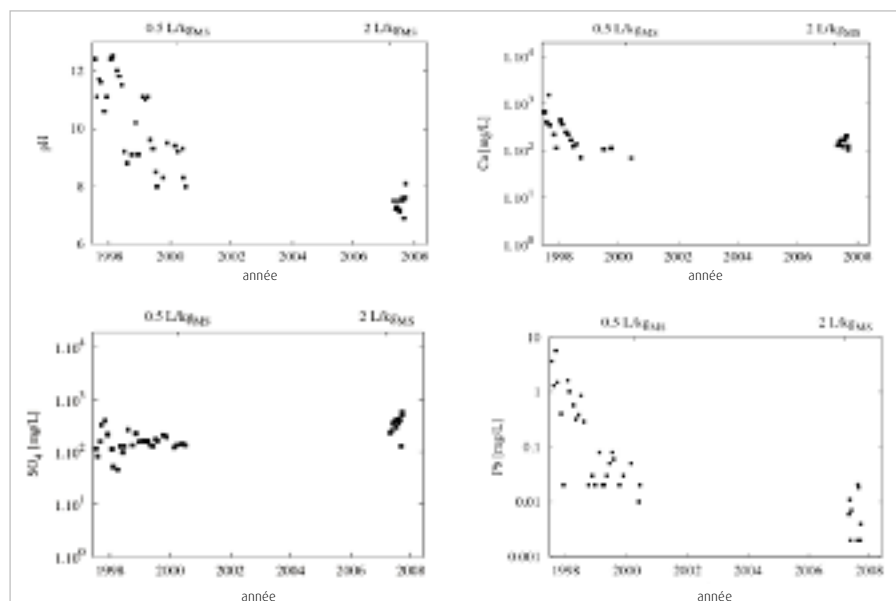
Thèse : David Dabo (2008). Impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) valorisés en technique routière : caractérisation expérimentations multi-échelles et modélisation hydro-géochimique (INERIS-École des mines).

De Windt L., Dabo D., Badreddine R. *Reactive transport modeling of cement-based waste and MSWI bottom ash evolution subjected to dynamic leaching test*. Présentation orale International workshop on modeling Reactive Transport in Porous Media, 21-24 January, 2008, Strasbourg.

Dabo D., Badreddine R., De Windt L., Drouadaine I. Evaluation of the environmental impact of MSWI bottom ash used in road construction: ten year field experimentation. Présentation orale 2nd international Conference on Engineering for Waste Valorisation 3-5 June 2008 en Grèce.

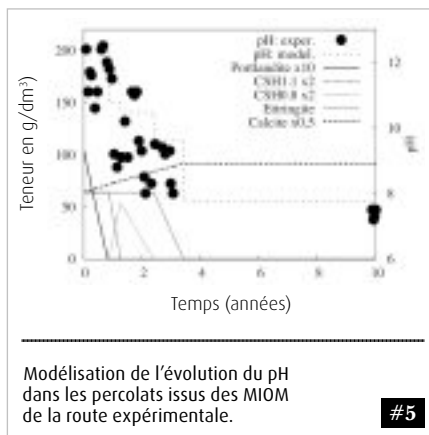
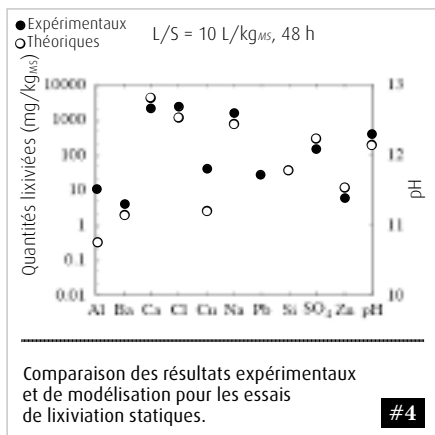
Dabo D., Raimbault L., Badreddine R., Chaurand P., Rose J., De Windt L. SIMS and EXAFS study of glassy phases and complex metal/mineral associations of MSWI bottom ash. Présentation orale 9th international congress for applied mineralogy 8-10 September Brisbane, 2008, Australie.

De Windt L., Dabo D., Lidelöv S., Badreddine R., Lagerkvist A. Reactive transport modeling of leachate evolution of MSWI bottom ash used as road base, Hérouville (France) and Däva (Sweden) sites. Présentation orale Wascon 2009 Sustainable Management of Waste and Recycled Materials in construction 3-5 June, Lyon.



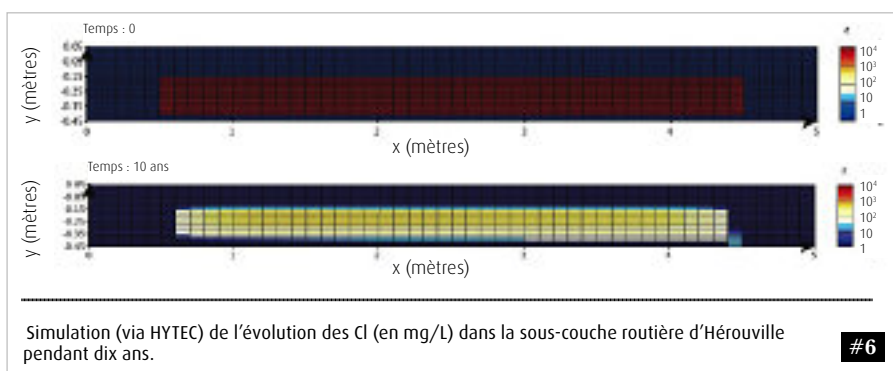
Évolution de la qualité des percolats routiers issus de la route expérimentale, utilisant les MIOM en sous-couche routière (10 ans de suivi).

#3



L'apport de données issues de la bibliographie, concernant notamment la complexation du cuivre par la matière organique ou encore la dissolution des verres primaires, reste essentiel dans l'élaboration de modèle. Le modèle élaboré à l'aide de Hytec-Chess peut être adapté sans autre modification que des modifications d'ordre "géométrique" à différentes configurations. Un exemple de simulation de l'évolution du pH et des chlorures est donné (figure 5 et figure 6).

Cette étude s'est orientée sur l'élaboration d'un modèle opérationnel des MIOM, qui soit basé sur l'observation des mécanismes de rétention et de relargage des éléments inorganiques. Elle a permis d'apporter des éléments de réponse à la spéciation de Pb, de contribuer à l'élaboration d'un retour d'expérience à moyen terme sur l'utilisation des MIOM en technique routière. Enfin, il a permis de montrer l'apport d'une approche couplant modélisation géochimique et acquisition-validation expérimentale, appliquée à l'étude des matériaux recyclés et de leur impact environnemental dans le cas de scénario de valorisation.



RÉFÉRENCES

- Dabo D., Badreddine R., Drouadaine I., De Windt L., 2008. Evaluation of the environmental impact of MSWI bottom ash reused in road construction: a ten-year field experimentation. Accepted par la revue *Journal of Hazardous Material* (doi:10.1016/j.jhazmat.2009.07.083).
- Dabo D., Raimbault L., Badreddine R., Chaurand P., Rose J., De Windt L., 2008. Characterisation of glassy and heterogeneous cementing phases of municipal solid waste of incineration (MSWI) bottom ash. Proceeding du 9th International Congress for Applied Mineralogy, ICAM, Brisbane (Australia), p. 95-100. (en preparation pour "Canadian Mineralogist").
- Dabo D., De Windt L., Lidelow S., Badreddine R., Lagerkvist A. Reactive transport modeling of MSWI bottom ash evolution in road basement, Hérouville (France) and Dava (Sweden) sites. Proceeding Wascon 2009 Sustainable Management of Waste and Recycled Materials in construction 3-5 June, Lyon' en preparation pour publication dans la revue *Waste Management*.

ABSTRACT

The present study copes with the environmental impact assessment of municipal solid waste incineration bottom ash reused as aggregates in road construction.

The methodology involves the following steps: characterization of bottom ashes (physical properties, chemistry and mineralogy), experiments at laboratory scale, field study and geochemical modeling.

Quantitative data for trace elements in primary glasses obtained by Secondary Ions Mass Spectrometry (SIMS) microanalysis show that these glasses are likely a main sink for Zn, in the cemented calcite admixture, lead seems to be mainly sorbed on iron oxy-hydroxides according to SMS imaging and Extended X-ray Absorption Fines Structure analysis (EXAFS).

Except for SO₄, low concentrations and alkalinity were measured in leachates from a 10 year-old road built with MSWI BA (fast attenuation during the first years). No significant transformation of bottom ashes (such as an advanced carbonation state) was observed after 10 years of utilization. Lateral preferential flowpaths are probably responsible for the difference between alkaline pore water and diluted leachates.

Based on characterization and experimental data, common model was built to simulate leaching and mineralogical evolutions using the transport reactive code CHES-HYTEC. Simulations of batch and dynamic leaching tests, as well as of two roads (French and Swedish) built with bottom ashes show fair agreement with respect to the experimental data.

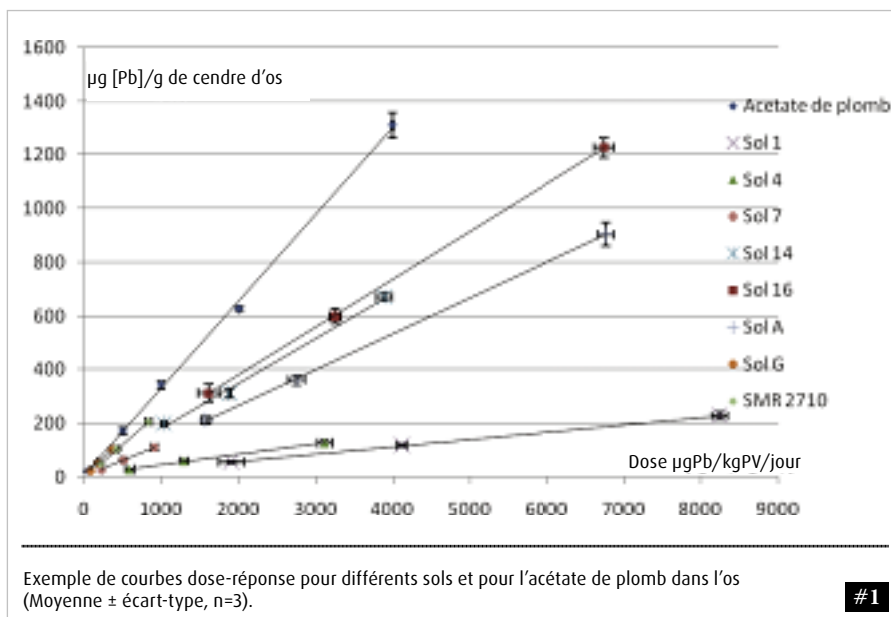
Validation d'un test de mesure de la bioaccessibilité des éléments traces métalliques dans les sols pollués

{ S. Denys, K. Tack, J. Caboche }

Les activités industrielles ont généré une accumulation des éléments traces métalliques (ETM) dans les sols qui, pour certains d'entre eux, sont toxiques pour l'homme. La gestion des sites et sols pollués repose sur l'évaluation des expositions à ces éléments. Le retour d'expérience montre que les voies d'exposition directe et notamment l'ingestion de terre pour les enfants engendrent les niveaux de risque les plus élevés. Toutefois, la pratique courante du calcul d'exposition et du risque se fonde sur la concentration totale d'un polluant dans un sol. Il a cependant été démontré que seule la fraction biodisponible de ce contaminant est susceptible d'induire un effet toxique. Cette fraction correspond à la dose de contaminant ingérée qui traverse l'épithélium intestinal et peut être distribuée aux tissus et organes cibles. Ainsi la pratique actuelle tend à surestimer la dose à laquelle les cibles sont exposées. Divers protocoles *in vitro* permettant d'approcher de façon simplifiée la biodisponibilité ont été développés ces dernières années. Ces derniers proposent une estimation de la fraction de contaminant extraite par les fluides digestifs (fraction bioaccessible). Au vu des nombreux protocoles publiés, le groupe BARGE (« Bioaccessibility Research Group Europe ») fédération d'instituts et de laboratoires impliqués en évaluation de risque a proposé un protocole unique. Toutefois, en vue d'une application large et en routine de ce protocole, il est nécessaire de le valider.

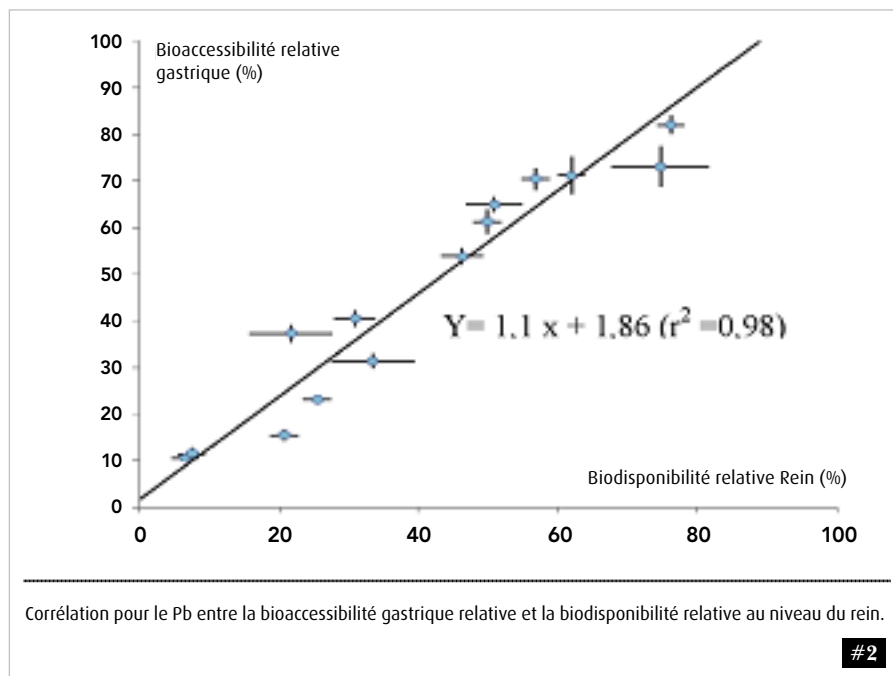
Objectif de l'étude

Nos travaux ont eu pour objet de démontrer la pertinence d'utiliser le test *in vitro* UBM (Unified Barge Method) pour affiner la connaissance de l'exposition. Pour cela, il a été proposé de valider la méthode de mesure de bioaccessibilité par des données de biodisponibilité.



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

#1



Matériels et méthodes

La démarche développée pour atteindre cet objectif a été d'échantillonner des sols présentant des historiques de contamination différents et des caractéristiques physico-chimiques les plus contrastées possibles afin d'avoir une large variation des valeurs de biodisponibilité pour chacun des ETM. Seize sols en provenance de trois sites ont été échantillonnés à la surface du sol. Sur deux sites, des apports anthropiques, liés à des activités d'extraction et de traitement de minerais, se superposaient à une anomalie géochimique. Les sols du troisième site ont été contaminés par des dépôts de particules en provenance d'une fonderie.

La biodisponibilité des ETM dans les sols a été évaluée sur des porcelets dont les caractéristiques du système digestif sont proches de celui de l'homme. Pour chaque sol, trois doses (0,5 ; 1 et 2 g) ont été administrées par voie orale aux porcelets, à jeun, quotidiennement et pendant 14 jours. En parallèle et selon le même protocole, les porcelets ont été exposés à des formes de référence (totalement soluble) de chaque ETM. Finalement, les concentrations en ETM ont été mesurées par ICP-MS dans les urines, les reins, le foie

et l'os. La biodisponibilité relative de chaque ETM, pour chaque sol, est calculée comme étant le ratio des pentes des courbes dose-réponse obtenues (figure 1), pour un sol donné et la forme de référence au sein du même compartiment.

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

Résultats et discussions

Les résultats montrent que la biodisponibilité relative est très variable en fonction des sols pour le plomb (8 % à 82 %), le cadmium (12 % à 91 %) et l'arsenic (3 % à 78 %). Pour l'antimoine, les valeurs de biodisponibilité relative et de bioaccessibilité relative sont très faibles indépendamment des caractéristiques variées des sols utilisés (valeurs < 20 %) et ainsi ne permettent pas d'obtenir une corréla-

tion linéaire robuste sur une large gamme de valeurs. Pour les trois autres contaminants, les comparaisons entre les données *in vivo* et *in vitro* ont démontré que la biodisponibilité relative et la bioaccessibilité relative dans les deux phases du test étaient linéairement corrélées pour des gammes de valeurs très étendues. De plus, les résultats montrent que les corrélations obtenues sont hautement significatives ($r^2 > 0,9$) et pour chaque corrélation une pente non significativement différente de 1 est obtenue ce qui valide le postulat initial de l'effet limitant de la bioaccessibilité dans l'exposition aux ETM du sol (figure 2). Les différences de biodisponibilité entre un contaminant présent dans la matrice sol et un contaminant présent sous une forme soluble peuvent être estimées par les différences de bioaccessibilité de l'élément au sein de ces matrices. Ainsi, l'étude confirme que la bioaccessibilité permet une bonne estimation de la biodisponibilité. Actuellement, le test UBM est le seul test *in vitro* validé par des données *in vivo* pour plusieurs ETM.

Conclusions et perspectives

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

RÉFÉRENCES

- Denys S., Tack K., Caboche J., Delalain P., 2009. Bioaccessibility, Solid Phase Distribution, and Speciation of Sb in Soils and in Digestive Fluids. *Chemosphere*, 74(5) 711-716.
- Caboche J., Jondreville C., Tack K., Denys S., Rychen G., Feidt C., 2009. Tissue distribution of antimony (Sb) orally given graded levels of Sb (V). *Toxicological and Environmental Chemistry*; 91(2) 267-278.
- Denys S., Caboche J., Tack K., Delalain P., 2007. Bioaccessibility of lead in high carbonate soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 42, 1331-1339.

ABSTRACT

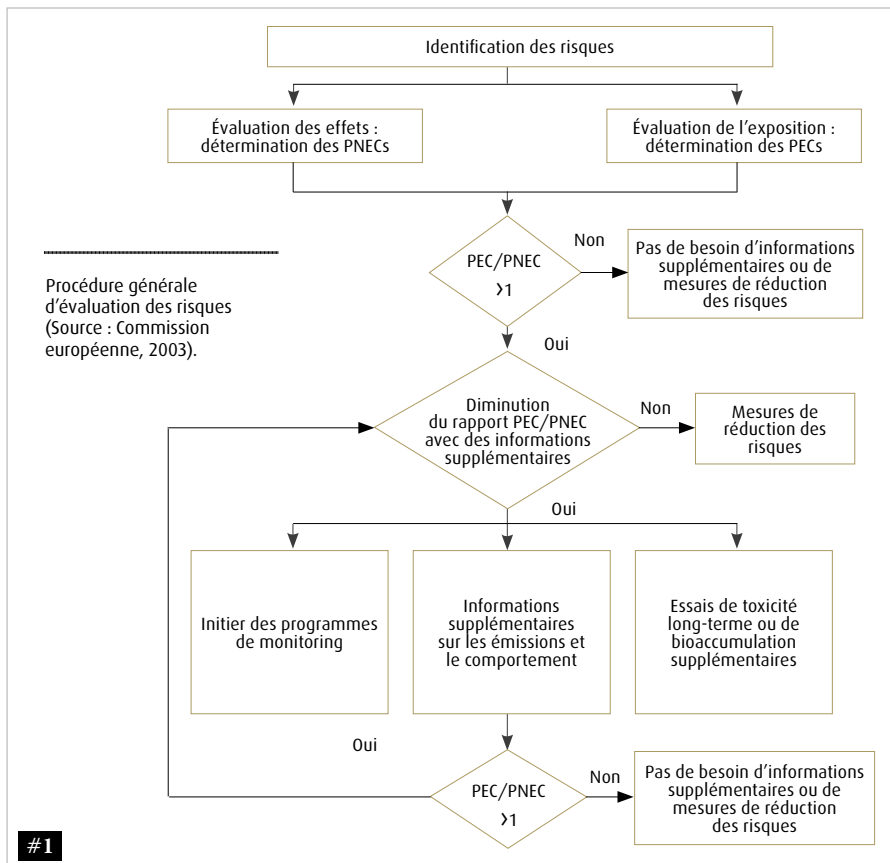
Industrial activities lead to contaminate environmental media such as soils. These later accumulate the pollutants such as heavy metal. Management of contaminated sites is based on the estimation of the Human exposure to these elements through either direct or indirect routes. In this context, soil ingestion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

Évaluation des risques environnementaux : analyse critique de l'approche méthodologique européenne (TGD) à partir d'un exemple d'application *in situ*

{ A. James, É. Thybaud }

Un certain nombre de textes législatifs et de mesures ont été mis en place par les États membres de l'Union européenne depuis quelques dizaines d'années dans le but d'évaluer et gérer les impacts poten-

tiels résultant de la dispersion de molécules chimiques dans les écosystèmes aquatiques. Tandis que certains de ces textes et leurs mesures associées touchent à l'évaluation rétrospective des risques chimiques, comme la Directive Cadre sur l'Eau (2000/60/CE) ou la Directive relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution (2008/1/CE), d'autres textes législatifs sont directement en lien avec une évaluation des risques prospective, tels que les Directives pour la mise sur le marché des produits de protection des plantes (Directive 91/414 CE), des produits biocides (Directive 98/8/CE) ou le Règlement pour l'Enregistrement, l'Évaluation et l'Autorisation des Substances Chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH, Règlement CE/1907/2006). Ces évaluations des risques chimiques à titre prospectif sont menées – à l'exception de la Directive pesticides – en application de guides techniques européens d'évaluation des risques chimiques, comme le « Technical Guidance Document » (CE, 2003), ou « TGD », ou les guides pour l'application du règlement REACH (« Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment »). Ces documents sont des guides techniques permettant d'aiguiller les acteurs de l'évaluation des risques chimiques dans leur démarche scientifique. Si, dans le cas de l'évaluation *a priori*, les approches reposent sur une évaluation des risques, en revanche, dans le cas de l'éva-



luation *a posteriori* (cas de la Directive Cadre sur l'Eau par exemple), la méthodologie repose plus souvent sur une comparaison de concentrations mesurées dans l'environnement à des seuils de qualité définis. Le travail présenté ici et issu d'une étude de Guérit *et al.* (2008) a consisté en l'évaluation de l'applicabilité du TGD *in situ*, c'est-à-dire dans une démarche rétrospective, ou *a posteriori*.

Zone et substance d'étude

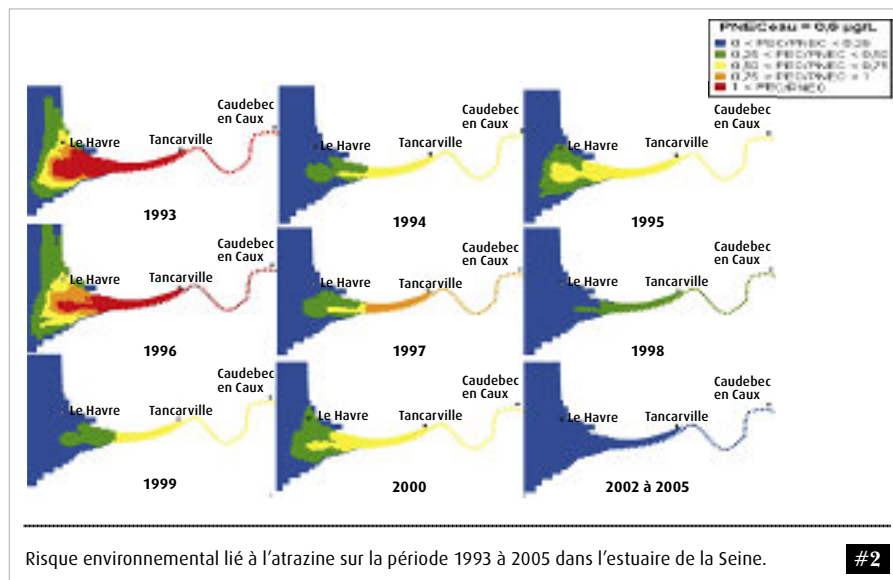
La Seine est un fleuve dans lequel les influences anthropiques sont considérables du fait qu'il draine un bassin versant de taille non négligeable (79 000 km²) qui reçoit les eaux usées de la ville de Paris dont la population avoisine les 17 millions d'habitants, mais qui cumule aussi sur son territoire 40 % de l'industrie et des activités agricoles françaises (Lafite et Romana, 2001), ce qui résulte en une contamination particulièrement élevée de la Seine notamment en pesticides [Tronczynski *et al.*, 1999]. C'est en raison de cette contamination particulièrement élevée en pesticides qu'il a été choisi d'étudier l'atrazine. Cette substance active a longtemps été utilisée dans des formulations à usage herbicide en agriculture. L'atrazine est relativement soluble dans l'eau, peu sujette aux processus de transfert vers la phase atmosphérique et assez peu dégradable dans le milieu, ce qui en fait une substance relativement conservatrice dans la phase aqueuse.

Méthodes

Les principes de l'évaluation des risques chimiques décrits dans le TGD (Commission européenne, 2003) se basent sur l'évaluation de l'exposition de l'environnement à une substance, d'une part, et l'évaluation des effets potentiels de cette substance sur les organismes, d'autre part, afin de procéder en dernier lieu à l'étape de caractérisation des risques qui permettra de conclure sur la présence ou non d'un risque pour ou *via* l'environnement (figure 1).

Taxon	Espèces	Effets	NOEC (µg.l ⁻¹)
Algae	<i>Scenedesmus subspicatus</i>	Croissance	2
Crustaceans	<i>Eurytemora affinis</i>	Mortalité	4 200
Vertebrates	<i>Cyprinodon variegatus</i>	Mortalité	1 900

Tableau 1 : Principales concentrations observées sans effets (NOEC) d'atrazine (en µg.l⁻¹) pour une chaîne trophique simple.



Risque environnemental lié à l'atrazine sur la période 1993 à 2005 dans l'estuaire de la Seine.

#2

Dans le cas de l'étude menée sur l'estuaire de Seine, il a été choisi d'utiliser pour la partie évaluation de l'exposition un modèle hydrodynamique à trois dimensions mis au point et validé en estuaire de Seine par des agents de l'Ifremer [Cugier et Le Hir, 2002]. Afin d'évaluer les risques chimiques selon un scénario de « pire cas », les données d'entrée du modèle choisies sont les concentrations maximales annuelles d'atrazine mesurées par le Service de Navigation de la Seine.

Pour la partie évaluation des effets, la Concentration Prédite Sans Effet pour le compartiment aquatique, ou PNEC (« Predicted No Effect Concentration »), choisie pour l'atrazine est une valeur de référence écotoxicologique déjà définie par la Commission européenne (2005) dans le cadre de ces travaux sur les substances prioritaires dont cet herbicide fait partie (tableau 1).

Résultats

Les résultats de l'évaluation des risques de l'atrazine sont présentés sur la figure 2. Entre juin 1993 et octobre 1996, les concentrations mesurées et calculées en atrazine ont excédé la PNEC (0,6 µg.l⁻¹) sur l'estuaire amont

RÉFÉRENCES

Commission européenne, 2003. Technical guidance document in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk assessment for new notified substances and Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk assessment for existing substances and Commission Directive (EC) 98/8 on biocides, second ed. European Commission, Luxembourg, Part 1, 2 and 3, 760p.

Commission européenne, 2005. Common implementation strategy for the water framework directive. Environmental quality standards substance data sheet for atrazine, Brussels, 17p.
http://circa.europa.eu/Public/irc/env/wfd/library?l=/framework_directive/i-priority_substances/supporting_background/substance_sheets&vm=detailed&sb=Title.

Cugier P., Le Hir P., 2002. Development of a 3D hydrodynamic model for coastal ecosystem modelling. Application to the plume of the Seine River (France). *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 55 (5), 673-695.

Guérit I., Bocquené G., James A., Thybaud E., Minier C., 2008. Environmental risk assessment: A critical approach of the European TGD in an *in situ* application. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 71 (2008) 291-300.

Lafite R., Romaña L.-A., 2001. A man-altered macrotidal estuary: the Seine estuary (France): introduction to the special issue. *Estuaries* 24 (6B), 939.

Tronczynski J., Munsch C., Moisan K., 1999. Organic Contaminants that Leave Traces: Sources, Transport and Fate. Ifremer, Plouzané, 40p.

et l'estuaire moyen, ce qui a conduit à un ratio de risque supérieur à 1 pour toutes ces années. Une partie seulement de l'estuaire aval a en revanche subi un niveau de risque comparable à ces dates. Après l'application des mesures de restriction d'usage de l'atrazine en 1997, les concentrations d'atrazine dans le milieu ont diminué à des niveaux inférieurs à la PNEC (concentrations de 0,45 à 0,6 µg.l⁻¹) dans toutes les zones de l'estuaire. En conséquence de ces mesures de restriction, le risque a diminué de 1997 à 2005, avec des concentrations s'amenuisant en deçà de 0,15 µg.l⁻¹ à partir de 2000.

Discussion et perspectives

L'exercice réalisé dans cette étude prend volontairement le contre-pied de ce pourquoi le TGD a été conçu : il ne s'agit pas ici d'évaluer un risque qui, si sa potentialité était démontrée, devrait être réduit par l'apport de données supplémentaires, mais bien d'utiliser une méthodologie à but rétrospectif pour démontrer un éventuel risque lié à la présence d'une substance dans le milieu. En effet, la procédure d'évaluation des risques recommandée dans le TGD est itérative, prévoyant que la fourniture de données supplémentaires par l'industrie puisse éventuellement abaisser les facteurs d'extrapolation (dits encore « facteurs de sécurité ») qui, en plusieurs étapes de la méthodologie, maximisent le risque en cas de manque de données fiables.

ABSTRACT

The aim of this study was to test field relevance of the prospective methodology for the assessment of environmental risk described in the EU technical guidance document (TGD) [European Commission 2003. Technical guidance document in support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk assessment for new notified substances and Commission Regulation (EC) No 1488/94 on Risk assessment for existing substances and Commission Directive (EC) 98/8 on biocides, second edition European Commission, Luxembourg, Part 1, 2 and 3, 760pp.]. To achieve this goal, an environmental risk assessment was performed according to the TGD for a major contaminant, atrazine, that is present in the Seine River estuary (France). Results showed that atrazine presented a source of risk in the upper- and mid-estuary throughout the 1993 and 1996 spring seasons. Results are discussed and some suggestions for a more realistic *in situ* risk assessment are given. For the computation of a more relevant PNEC for pesticides, their specific mode of action should be taken into consideration as well as ecotoxicological data on species endemic to the area considered.

Améliorer les méthodes d'estimation prospective de l'exposition aux polluants des populations autour d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

{ R. Bonnard }

En France, les études d'impact réalisées dans le cadre des procédures d'autorisation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) doivent prendre en compte l'impact sur la santé des populations (loi sur l'Air de 1996 et son article 19, circulaire de la DPPR du 19 juin 2000). La démarche d'évaluation des risques sanitaires (ERS) est la méthode préconisée pour caractériser le risque encouru par une population vivant dans la zone d'influence d'une ICPE. Dans ces études prospectives, l'étape d'évaluation des expositions repose fréquemment, hors situation de pollution avérée, sur une approche de modélisation, car ce sont les risques futurs qui sont évalués. Il est donc important d'acquérir des éléments d'information sur la qualité (précision et justesse) des estimations de l'exposition obtenus par modélisation.

Methodologies utilisées

En s'appuyant sur l'exemple du plomb, deux approches ont été utilisées pour répondre à ce besoin :

- la première consiste à comparer et analyser, sur un cas type, les résultats fournis par plusieurs chaînes de modélisation allant des émissions à la cheminée à l'estimation du niveau de plombémie, en analysant leurs incertitudes ;
- dans la seconde approche, les niveaux de concentrations et d'exposition mesurés autour d'un site émetteur de plomb ont été comparés aux niveaux modélisés.

Comparaison et analyse des résultats fournis par plusieurs chaînes de modélisation.

Pour cet exercice, quatre chaînes de modélisation ont été construites. Ces chaînes comportent le même modèle de dispersion atmosphérique ADMS [Atmospheric Dispersion Modelling System, CERC, 2001] et le même modèle de dose interne IEUBK (Integrated Exposure Uptake Biokinetic model for lead in children, US EPA, 1994 a, b), mais se distinguent par leur maillon central, à savoir le modèle multimédia utilisé.

Différents modèles multimédia ont été sélectionnés : la méthode HHRAP (Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities), le modèle INERIS et les versions 2.3 et 4 du logiciel CalTOX.

Des valeurs ponctuelles déterministes et des distributions statistiques pour chacun des paramètres d'entrée des modèles multimédia et de IEUBK ont été définies, afin de pouvoir comparer les résultats déterministes classiquement obtenus dans une ERS avec ceux obtenus lors de la propagation des incertitudes paramétriques. Les calculs probabilistes ont été menés à l'aide du logiciel Crystal Ball [Decisioneering, 2000, 2007].

Afin de pouvoir attribuer aux données d'entrée de IEUBK, les distributions souhaitées, et pouvoir coupler ce modèle avec les modèles multimédia, le modèle IEUBK a été recodé sous Excel.

Pour les paramètres environnementaux, les paramètres d'exposition et les taux d'absorption, les valeurs déterministes et les distributions utilisées ont été définies, en confrontant les données proposées dans différentes sources bibliographiques.

Les coefficients de transfert du plomb dans l'environnement ont fait l'objet d'un travail spécifique, basé sur une analyse approfondie de la littérature scientifique. Pour chaque donnée identifiée, les conditions d'obtention ont été recherchées. Un ensemble de critères de notation a ensuite été établi, afin de définir pour chaque donnée une note représentative de sa qualité intrinsèque et de sa pertinence par rapport aux conditions d'exposition étudiées. Une distribution de probabilité a alors été ajustée à cet ensemble de valeurs notées.

Comparaison des données modélisées avec les données mesurées sur un site

Le site de Métal-Blanc, entreprise de seconde fusion de plomb, installé dans le village de Bourg-Fidèle (Ardennes) a été retenu. Ce site est toujours en activité.

Les résultats de mesure disponibles sur ce site ont été collectés et analysés (flux canalisés émis à la cheminée, concentrations de plomb dans l'air, dépôts de plomb au sol, concentrations dans les sols, concentrations dans les végétaux). En outre, une campagne de mesure des dépôts de plomb au sol a été réalisée dans le village pendant deux mois et deux campagnes de mesure de

plomb dans les sols ont été menées, l'une par prélèvement d'échantillons et analyse par spectrométrie d'émission optique, l'autre par mesure *in situ* à l'aide d'un analyseur de terrain à fluorescence X. Les résultats de la campagne de dépistage de plombémie de 2002, rendues anonymes, et les informations recueillies par la DDASS sur les conditions d'exposition de chaque enfant ont aussi été collectées.

Pour cet exercice de confrontation mesures/modèles, deux chaînes de modélisation ont été utilisées : l'une basée sur CalTOX 4 (appelée par la suite modèle A) et permettant de représenter la distribution des concentrations de plomb dans les milieux sur l'ensemble du village et pour l'ensemble des enfants y habitant, l'autre (appelée modèle B) construite à partir du modèle INERIS et donnant la plombémie en un lieu précis, en prenant en compte les conditions d'exposition d'un enfant donné.

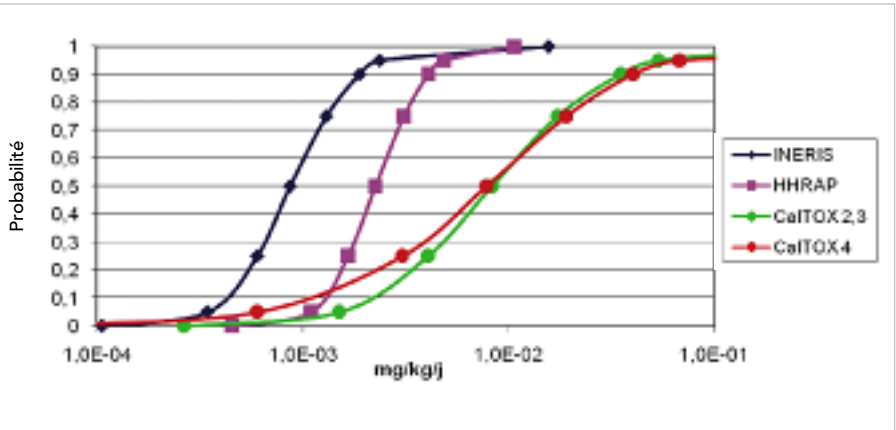
Résultats et discussion

Comparaison des chaînes de modélisation sur le cas type

Cette étude a apporté les enseignements suivants.

- Les résultats obtenus peuvent être sensiblement différents en valeur absolue (jusqu'à un ordre de grandeur sur la valeur médiane de la dose totale d'exposition), mais surtout le degré de précision des variables de sortie est très différent selon le modèle multimédia utilisé (voir figure 1). L'incertitude paramétrique (variabilité et incertitude « vraie ») des résultats obtenus avec les différentes versions de CalTOX est ainsi beaucoup plus grande que celle entourant les résultats fournis par le modèle INERIS et le modèle HHRAP.

Dans ces conditions, la probabilité de dépasser une valeur limite donnée est très variable selon le modèle multimédia utilisé. Dans certains cas, un travail de définition plus précis des paramètres contribuant le plus à la variance (identifiés par l'analyse de sensibilité) permet de réduire cette incertitude. Pour CalTOX 4, il paraît difficile de réduire cette dernière de manière significative, le paramètre ayant l'impact le plus sensible étant, ici, la vitesse de dépôt des particules au sol. Au-delà des limites de connaissance, ce paramètre varie beaucoup en fonction du diamètre des particules. Or, des résultats avec une



Distribution cumulée de la dose d'exposition externe chez les enfants de 1-3 ans selon les différentes chaînes de modélisation.

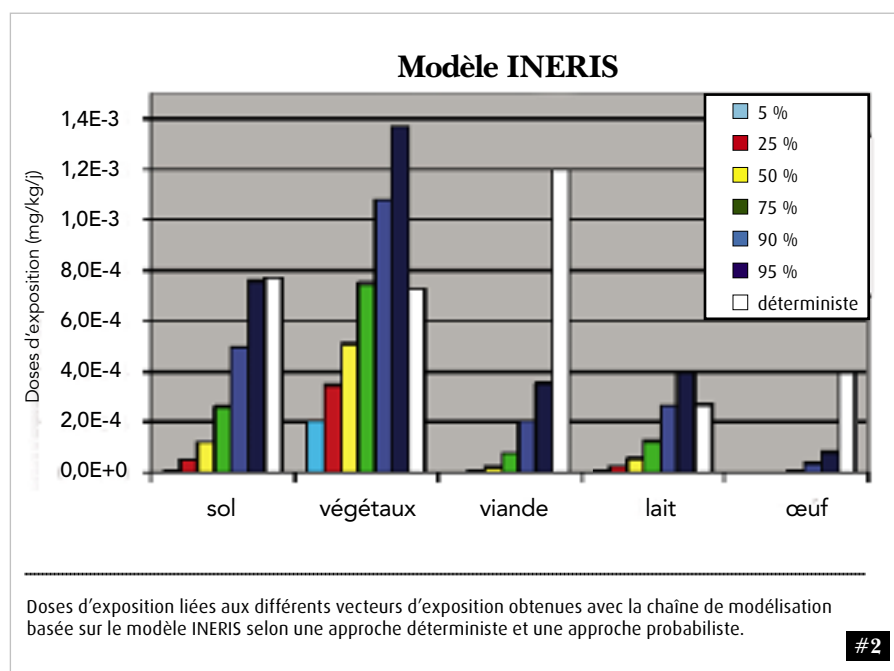
#1

forte incertitude présentent un intérêt limité pour la prise de décision. En l'absence d'autres éléments scientifiques permettant de privilégier un modèle plutôt qu'un autre (reconnaissance des bases scientifiques sur lequel repose le modèle, acquisition d'éléments permettant de juger de la qualité d'approximation du modèle), il est préférable d'utiliser un modèle, qui, renseigné avec des valeurs adaptées au cas à traiter, présente une incertitude paramétrique plus faible.

- Des différences importantes ont également été mises en évidence dans la définition des voies et des milieux environnementaux contribuant le plus à l'exposition en approche probabiliste par rapport à l'approche déterministe (voir figure 2).

Le fait d'utiliser une approche dite « raisonnablement majorante », avec les valeurs maximales relevées pour les coefficients de transfert, crée des distorsions de résultats et des erreurs d'interprétation dans les voies d'exposition prépondérantes. Cette pratique est pourtant habituelle. Elle est classiquement utilisée à l'INERIS dans le cadre des ERS pour les ICPE et des évaluations détaillées des risques (EDR) pour les sols pollués. Elle est aussi appliquée par les bureaux d'études et recommandée lors des tierces-expertises. En l'absence d'un travail de fond sur les valeurs de ces paramètres qui peuvent être très variables et incertains, et d'éléments sur les facteurs pouvant influencer la valeur du paramètre (nature du sol, pH), cette approche vise à éviter de sous-estimer l'exposition et donc le risque. Cette approche volontairement majorante permet de vérifier que la situation étudiée ne présente pas de risque inacceptable, en revanche elle n'est pas adaptée à l'élaboration d'un plan de surveillance des milieux environnementaux autour d'une ICPE ou de mesures de gestion pour un site pollué. Ce dernier repose davantage sur l'appréciation des voies d'exposition et des modes de transfert préférentiels de la pollution. Pour une interprétation correcte des parts relatives des différentes voies et des différents modes de transfert dans l'exposition, il est alors préférable de s'appuyer sur les valeurs de paramètres les plus probables (c'est-à-dire sur les valeurs modales). En fonction de l'objectif recherché, faute d'utiliser une approche probabiliste, plusieurs estimations ponctuelles peuvent être nécessaires.

- Par ailleurs, il est apparu que si les estimations déterministes obtenues pour les niveaux d'exposition correspondent souvent à des *percentiles* élevés des distributions de la variable de sortie obtenue avec l'approche probabiliste, dans certains cas, l'estimation déterministe peut correspondre à un *percentile* sensiblement plus faible. En effet, même si certains, voire de nombreux paramètres utilisés pour la modélisation sont affectés d'une valeur majorante, il suffit qu'un paramètre ayant un effet particulièrement sensible sur la variable de sortie soit défini par une valeur ponctuelle décalée vers la gauche de sa distribution, pour que le résultat déterministe se trouve lui aussi décalé vers la gauche de la courbe de distribution obtenue par calcul probabiliste et qu'il ne puisse plus être considéré comme protecteur. Sans connaissance des paramètres les plus sensibles, la réalisation de calculs en mode déterministe selon l'approche actuelle consiste à utiliser des valeurs majorantes pour certains paramètres et des valeurs plus « réalistes » pour d'autres. Le degré de prudence ou le « caractère protecteur » affectant les résultats ainsi obtenus est en fait inconnu et variable d'une étude à une autre, ce qui entraîne une hétérogénéité et un manque de comparabilité entre ces études. Pour y remédier, il faut connaître la sensibilité du modèle aux différents paramètres, pour



RÉFÉRENCES

Bonnard R., 2006. Common errors in the use of the CalTOX model to assess the human health risks linked to industrial emissions of pollutants, *Human and Ecological Risk Assessment*, Vol. 12, n°5.

Bonnard R., 2003. Origines des différences de résultats fournis par un modèle multimédia simple et le modèle CALTOX : cas de l'estimation des risques par ingestion liés aux émissions de dioxines des grandes installations de combustion, *Environnement, Risques & Santé*, Vol. 2, n°5.

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* (accepté).

Bonnard R., Bour O. Comparison of lead concentration in surface soil by Induced Coupled Plasma/Optical Emission Spectrometry and X-Ray Fluorescence, CONSOIL 2008, ITALY.

Bonnard R., 2008. Améliorer les méthodes d'estimation prospective de l'exposition aux polluants des populations autour d'une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement, BCRD03-DRC06, Autorisation de programme 2003, N° DRC-08-57041-14967A, INERIS, Verneuil-en-Halatte.

focaliser l'effort de définition des valeurs sur les paramètres sensibles et attribuer à ceux-ci des valeurs adaptées en fonction de l'objectif recherché (résultat majorant et protecteur ou le plus réaliste possible). La difficulté réside alors dans l'identification de ces paramètres sensibles qui peuvent varier selon les scénarios et les substances traitées. La réalisation d'analyses de sensibilité à partir d'une série de cas peut être une solution pour constituer des listes de référence de paramètres sensibles en fonction du type de scénario et du comportement des substances (polluants volatils, semi-volatils, persistant, lipophiles...) et ainsi favoriser la réalisation d'évaluations de risques déterministes plus cohérentes et informatives sur le degré de prudence associé à l'estimation.

Comparaison des données modélisées avec les données mesurées sur un site

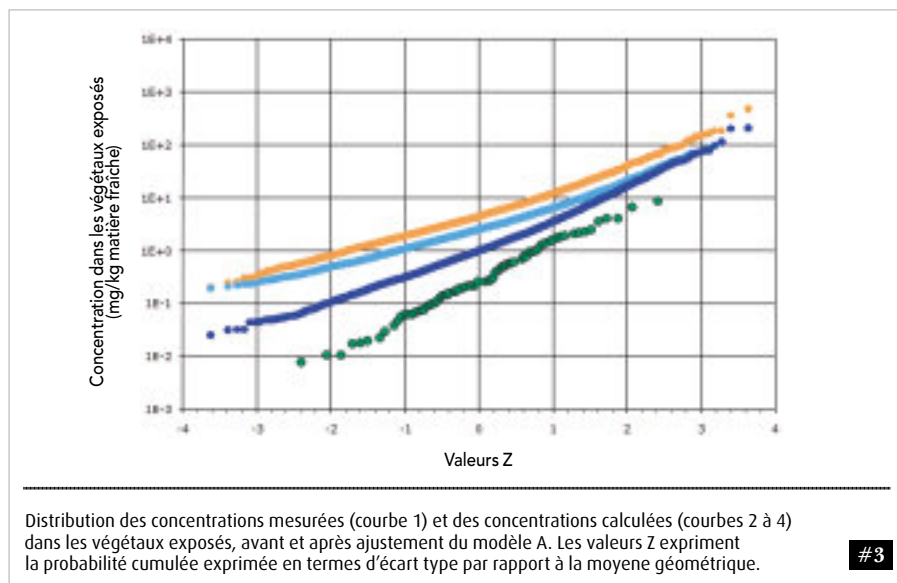
La comparaison des données de mesure dans l'air et des dépôts au sol avec les valeurs modélisées par ADMS a d'abord montré le rôle important joué par les émissions diffuses dans la contamination.

Faute de mesure pour caractériser cette source diffuse et l'utiliser comme terme source dans ADMS, pour la suite du travail de comparaison, un modèle de régression a été élaboré pour estimer le dépôt total mensuel de plomb au sol en un point, en fonction de la fréquence du vent soufflant de l'usine vers ce point, de la distance des bâtiments de l'usine à ce point et de la quan-

tité mensuelle de plomb émis aux cheminées. Les ratios des concentrations médianes calculées avec le modèle intégré A (basé sur CalTOX) sur les concentrations médianes mesurées dans l'air, le sol racinaire, les végétaux protégés des retombées atmosphériques et le sang des enfants sont compris entre 0,5 et 1,8. Pour les végétaux exposés, la comparaison des distributions des concentrations modélisées avec celles mesurées montrent en revanche une surestimation systématique des concentrations dans ces matrices (voir figure 3), entraînant également une surestimation des derniers percentiles de la distribution de plombémie, l'ingestion de végétaux exposés étant alors la voie d'exposition prépondérante. Une analyse de sensibilité sur la concentration des végétaux exposés a permis de mettre en évidence un paramètre de CalTOX (la masse volumique des feuilles des végétaux) dont la valeur n'était pas cohérente avec les données du site et d'améliorer l'accord des résultats de mesure avec ceux de la modélisation. Néanmoins, pour ce cas d'étude, il apparaît que les concentrations estimées dans les végétaux exposés restent supérieures à celles mesurées.

Le fait que le lavage des végétaux avant analyse ne soit pas pris en compte par le modèle peut expliquer cette surestimation. Malheureusement, peu de données permettent de quantifier l'impact du lavage des végétaux. Mais un calcul consistant à diviser arbitrairement les contributions du dépôt atmosphérique et du sol montre que sa prise en compte contribuerait à rapprocher la partie inférieure de la distribution des concentrations modélisées dans les végétaux exposés et celle des concentrations mesurées.

Le modèle B (basé sur le modèle INERIS) tend également à surestimer les concentrations dans les végétaux. Les rapports des concentrations mesurées sur les concentrations médianes modélisées sont dans 90 % des cas compris entre 0,1 et 10 et la moyenne géométrique de ces rapports est égale à 0,5. Là aussi, l'absence de prise en compte du lavage des végétaux avant analyse pourrait être un élément explicatif de cette surestimation. Le modèle B, qui permet d'estimer les plombémies en un lieu pour un type d'enfant présentant des caractéristiques d'exposition données, à partir des concentrations de plomb dans le sol en ce lieu n'a



#3

pu être testé que sur un sous-ensemble limité d'enfants, faute d'avoir l'information sur le lieu de résidence de chaque enfant. En croisant plusieurs éléments d'informations, il a été possible de faire des hypothèses de localisation pour 9 enfants, présentant des conditions d'exposition contrastées. Pour 8 de ces enfants, la plombémie mesurée est comprise dans l'intervalle de variation à 90% modélisé et le rapport de la plombémie mesurée sur la plombémie médiane modélisée est compris entre 0,7 et 1,7. Pour le dernier enfant, la sous-estimation de la plombémie par le modèle pourrait s'expliquer par le fait que cet enfant vit dans une habitation construite avant l'interdiction des peintures au plomb et la présence de peintures abimées dans le logement, ce type d'exposition n'ayant pas été pris en compte dans le modèle. Le modèle A et le modèle B répondent à des objectifs différents. Le premier permet de caractériser les distributions des concentrations de plomb dans les milieux et la distribution des expositions à une échelle locale. Le second cherche à estimer les concentrations en des lieux précis, pour des scénarios d'exposition spécifiques. Il permet ainsi d'apporter des éléments de réponse à des questions souvent formulées pour la réhabilitation de sols pollués, comme « dans quelles zones ou à partir de quelles distances, la consommation

de légumes autoproduits peut-elle poser un problème sanitaire ? »

Mais, les deux modèles fournissent bien des résultats concordants, puisque d'après le modèle A, les plombémies les plus élevées sont liées à l'ingestion de fruits et légumes autoproduits sur Bourg-Fidèle, tandis que le modèle B montre que les gros consommateurs de fruits et légumes sont parmi ceux ayant les plombémies les plus élevées. Il convient toutefois de remarquer que le modèle B, par sa capacité à distinguer différentes conditions d'exposition à une échelle locale, permet d'obtenir des résultats avec une variance plus faible que le modèle A. Ce point constitue une caractéristique importante pour discriminer les situations requérant des mesures de gestion, de celles où elles sont inutiles, en particulier dans un contexte où le critère sanitaire, retenu comme seuil d'intervention, est relativement faible.

Bien qu'il soit nécessaire de tester le modèle B sur un nombre de cas plus important pour conclure sur ses performances, cette confrontation mesure/modèle nous a permis d'améliorer notre connaissance de ces modèles. Enfin, le travail de comparaison des chaînes de modélisation et celui de comparaison avec les mesures a permis d'identifier la modélisation de la contamination des végétaux comme un axe d'étude prioritaire.

ABSTRACT

Models' predictions for human exposure to lead emissions of facilities were assessed through: 1) comparing the results given by several models (from stacks' emissions to human blood concentrations) ; 2) comparing predicted concentrations to observed ones. 1) The results obtained depend on the models used. Calculations made with a deterministic approach can also be completely different from those obtained with the probabilistic approach. With a «reasonably conservative» approach, the level of conservatism is unknown and variable from a study to another one. According to the objective of the risk assessment study carried out (to check the absence of unacceptable risks, to achieve a surveillance program for example), if a probabilistic approach is not conducted, several point estimations can be required. 2) Two models were used for the comparison of the predicted concentrations with measurements. The first one (A) provides the distribution of the media-specific lead concentrations (air, soil, fruit, vegetables and blood) in the whole area investigated, whereas the second (B) estimates the concentration of exposure of individuals living in the study area. Model A tended to overestimate the exposure due to exposed vegetables in the case study. Model B was tested for 9 children with contrasting exposure conditions. It managed to capture the blood levels for 8 of them. The interest of model B is to provide outputs with lower variance than model A, but further tests are necessary to conclude about its accuracy.

RÉFÉRENCES

- CERC (Cambridge Environmental Research Consultants), ADMS 3. User Guide. Sept 2001.
- Decisonering, Crystal Ball 2000, Standard edition.
- Decisonering, Crystal Ball 7.2, Professional Edition, 2005.
- INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), Bonnard R., Le logiciel de calcul CalTOX 4.0, DRC-07-86835-16788A, 2007.
- LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory), CalTOX, A multimedia total exposure model spreadsheet user'guide, McKone, Enoch, 2002.
- McKone T., Bennett D. Chemical-specific representation of air-soil exchange and soil penetration in regional multimedia models, *Environmental Science and Technology*, vol. 37, 2003.
- University of California, CALTOX, a multimedia total exposure model for hazardous-waste sites: The Department of Toxic Substances control (DTSC), 1993.
- University of California, CALTOX version 2.3, Description of modifications and revisions. Berkeley: The Department of Toxic Substances control (DTSC), 1997.
- US EPA (US Environmental Protection Agency), Office of Solid Waste and Emergency Response, Guidance manual for the IEUBK model for lead in children, report PB93-963510, 1994 a.
- US EPA (US Environmental Protection Agency), Office of Solid Waste and Emergency Response, Technical support document: Parameters and equations used in the integrated exposure uptake biokinetic model for lead in children (v0.99d), report pB94-963505, 1994 b.
- US EPA (US Environmental Protection Agency), Office of Solid Waste, Human Health Risk Assessment Protocol for hazardous waste combustion facilities (HHRAP), report EPA/530/R-05-006, 2005.

Explosions



Stratégie de recherche

La maîtrise du risque d'explosion est un thème traditionnel pour l'INERIS, l'Institut lui doit son origine, en 1907, dans la « Station d'Essais de Liévin » édifée suite à l'explosion meurtrière de Courrières (1 200 morts...). Ce sujet n'appartient cependant pas qu'à l'histoire. On répertorie toujours chaque année de 50 à 100 explosions déclarées dans l'industrie (Source MEEDDM, BARPI, 2009) pour les seules installations classées pour la protection de l'environnement. Si on tient compte de l'ensemble des installations, (au-delà des installations classées), certains experts estiment que la fréquence avoisine une explosion par jour dans les pays industrialisés. Tous redoutent les conséquences d'une explosion, pas uniquement en raison des effets produits, mais aussi à cause de l'extrême rapidité des événements qui ne laisse aucune chance de s'enfuir. C'est sans doute ce qui a motivé l'effort de R&D dans ce domaine. Évidemment, de réels progrès dans la connaissance des mécanismes des explosions ont été faits et des efforts réglementaires ont été consentis, auxquels l'INERIS a participé, mais, régulièrement, une explosion fait la une de l'actualité, l'explosion des installations de stockage de grain de Blaye en 1997, l'explosion de l'usine AZF en 2001. Cela ne veut pas dire que ces efforts ont été vains mais traduit sans doute le fait que le risque d'explosion concernant tous les domaines de l'industrie évolue avec les mutations industrielles, mis en exergue avec les développements des nanotechnologies et des produits nanomanufacturés.

Il est donc nécessaire de remettre en question et d'adapter les connaissances acquises aux nouveaux produits et procédés. Ainsi, on s'intéresse depuis quelques années aux technologies de l'hydrogène, alternative possible à l'utilisation des hydrocarbures pour le transport notamment. Mais d'autres technologies émergentes ont retenu l'attention et ont fait l'objet de projets comme BIOSAFUEL et NANORIS. BIOSAFUEL concerne l'industrie des biocarburants qui fait apparaître des produits dont les propriétés ont été évaluées et des filières de production pour lesquelles une méthode d'évaluation des risques a été mise au point. NANORIS concerne les

nanoparticules et tout particulièrement celles qui peuvent exploser et les travaux réalisés suggèrent que des explosions très violentes sont possibles et que les technologies expérimentales disponibles ne permettraient pas d'obtenir des paramètres d'explosivité fiables.

Il faut également se préoccuper de l'intégration des nouvelles connaissances dans un corpus qui finit par devenir très complexe et rend difficile la consolidation d'une expertise. Se pose la question de la place des outils « complexes » de modélisation mathématique : quelle confiance peut-on leur accorder ? On pense notamment aux codes de calculs dits « CFD » (« computational fluid dynamics »), développés depuis une vingtaine d'années. Un chantier a été ouvert à travers le projet EXPRES qui a permis d'explorer plusieurs pistes de modélisation alternatives qui se sont révélées plus adaptées à certaines configurations que l'approche CFD.

À l'avenir, l'effort continuera à porter sur l'évolution des connaissances et des moyens de modélisation avec pour objectif notamment la prise en compte des effets d'obstacles et de tout phénomène capable d'accélérer la flamme. Il semblerait en effet que les impulsions de pression induites par les accélérations de flamme puissent être de grande amplitude et justifier des dégâts aussi importants que ceux constatés lors de l'explosion de Buncefield alors que les méthodes traditionnelles, qui ne tiennent pas compte des accélérations de flamme, conduisent à des niveaux de surpression d'un ordre de grandeur plus petit. L'enjeu est important par rapport à l'application de la réglementation relative aux PPRT¹. En parallèle, nous faisons progresser nos moyens de prédiction du comportement des structures aux effets des explosions, et des structures industrielles et des bâtiments. Des techniques de protection peuvent éventuellement être envisagées, comme par exemple l'usage d'écrans, qui limitent les impulsions de pression. Évaluer les performances de ces dispositifs et le comportement des structures implique de bien connaître les lois de propagation des ondes à grande distance dans un environnement éventuellement complexe.

1 - Plans de Prévention des Risques Technologiques.

Développement des biocarburants et enjeux de sécurité liés aux procédés de production et à la distribution

{ G. Marlair, C. Rivière }

RÉFÉRENCES

[1] Rivière C., Marlair G., *BIOSAFUEL®*, a pre-diagnosis tool of risks pertaining to biofuels chains. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 22 (2009) 228-236.

[2] Marlair G., Rotureau P., Breulet H., Brohez S. *Booming Development of Biofuels for transport : is fire safety of concern?*, *Fire and Materials*, 2009; 33:1-19.

[3] Marlair G., Demissy M., Brignon J.-M. *Un nouveau challenge : offrir une alternative au kérosène*, *La lettre Technique de l'Ingénieur - Énergie*, décembre 2007, n°11, p. 10-11.

[4] Marlair G. *Typologie du risque d'incendie et d'explosion associée au cycle de vie des biocarburants*, *RAS INERIS 2006-2007* (p. 70-73).

[5] Marlair G., Rotureau P., FèvreA-L. *La maîtrise des risques technologiques comme indicateur de développement durable des nouvelles filières énergétiques : une réflexion assise sur le cas des biocarburants*, *Actes du 1^{er} congrès sur l'Ingénierie des Risques industriels*, 17-19 décembre 2007, Montréal, Canada, pp 433-455.

NOTE

* École nationale supérieure des ingénieurs de Bourges.

Lancé en 2006, le programme BIOSAFUEL® est l'un des tous premiers programmes de recherche dédié à l'analyse des questions de sécurité relatives au développement des biocarburants (carburants moteurs élaborés à partir de biomasse) pour lequel on assiste à un véritable effet de mondialisation. On peut rappeler que ce secteur d'activité connaît en effet un essor extrêmement important depuis 2003 en Europe, année de publication de la directive européenne (30/2003/CE) fixant de premiers objectifs d'utilisation en termes de taux d'incorporation (5.75 % à l'horizon 2010). Depuis lors, le soutien de ce secteur par les politiques publiques ne s'est pas démenti (lancement de l'E10 en France en avril 2009, adoption de la nouvelle directive sur les énergies renouvelables par Bruxelles fin 2008), et ce, malgré des interrogations récurrentes (à partir de l'été 2007) sur la durabilité de certaines filières de production. Les objectifs du programme BIOSAFUEL® comportaient notamment une première évaluation globale des enjeux de sécurité en s'appuyant sur l'examen des risques produits et procédés associés aux principales technologies de production de biocarburants (bibliographie, échange avec industriels, participation à des conférences...), mais aussi sur l'analyse de l'accidentologie récente et la réalisation d'expérimentations dédiées. En outre, le produit de sortie majeur escompté était le développement d'un premier outil simplifié de pré diagnostic du niveau de risque encouru dans les différentes filières de production ou pour un projet donné.

Nous avons dans le rapport scientifique de 2007 rendu compte des premiers résultats de notre analyse, en rappelant notamment la typologie des risques spécifiques présentés par l'éthanol et les premiers enseignements du retour d'expérience.

Des challenges techniques pour les utilisations avancées ou les techniques innovantes

Ce projet a été réalisé en pleine période de transition des filières de production dites de première génération, relativement matures (à partir de plantes sucrières, plantes amy-lacées, sources lipidiques, huiles de colza, de palme, de soja... graisses animales) et des filières de seconde génération, filières en devenir, reposant sur des transformations de diverses ressources de biomasse terrestre et marine dont la valorisation énergétique n'entre plus en compétition avec l'usage alimentaire (cultures dédiées et résidus lignocellulosiques divers, algues...) (figure 1). Notre analyse a d'abord porté sur l'identification des dangers liés aux produits et procédés impliqués (collaboration UPJV et ENSIB*). Elle s'est appuyée sur de l'analyse bibliographique, des échanges dans des réseaux variés (IGUS -www.oecdigus.org, pôle IAR), et par des participations à des voyages d'étude (pôle biotech dans l'Ontario, Journées d'échanges franco-brésiliennes). Cette approche s'est notamment traduite par l'identification d'une liste de facteurs favorables et défavorables à la maîtrise des

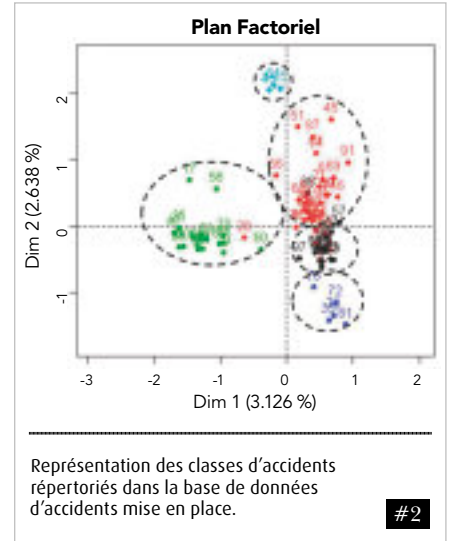
questions de sécurité liées aux procédés de production et à la distribution des biocarburants [Marlair *et al.*, 5]. L'extrême dynamisme de ce domaine d'activité milite pour un suivi régulier des innovations (nouvelles molécules présentant un potentiel intéressant comme additif de carburants ou comme nouveau carburant moteur, innovations technologiques telles que les techniques séparatives par membranes, nouveaux additifs de formulation, nouvelles biomasses constituant des matières premières en devenir...).

L'apport de l'analyse statistique en matière d'examen du retour d'expérience

En support au programme BIOSAFUEL® et d'autres projets connexes (BIOMAP, ALFA-BIRD), la mise en place d'une base de données d'accidents relatifs à l'industrie des biocarburants couvrant l'ensemble de leur cycle de vie depuis la production des agroressources jusqu'à l'utilisation finale dans un moteur thermique a été réalisée. Cette base de données, devenue un outil d'analyse pérenne, recense à ce jour plus de 110 accidents significatifs, dont certains ont été décrits dans diverses publications [Marlair *et al.*, 2, 4]. Une reconfiguration du mode d'enregistrement des données selon des catégories prédéfinies avec soin a été opérée, afin d'en permettre un traitement statistique pertinent, basé sur une analyse multicritère

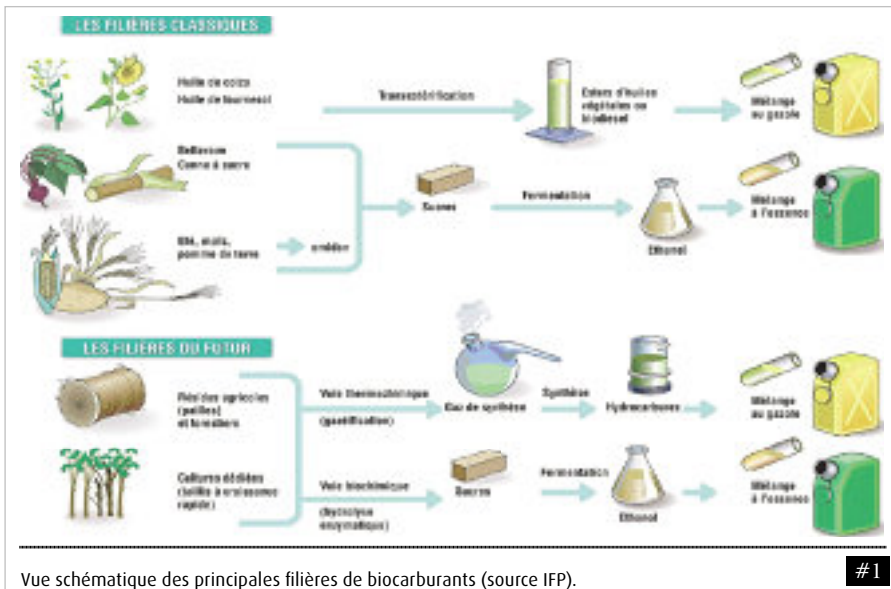
et multidimensionnelle. Le résultat majeur est un classement des accidents par analogies de critères, ces analogies ressortant d'un traitement statistique de type analyse des correspondances multiples (ACM), suivie d'une classification hiérarchique ascendante (CHA). L'ACM est une analyse factorielle permettant de transformer des données qualitatives dans une base de données en coordonnées factorielles (données quantitatives) à partir desquelles il est possible d'établir une classification. Cette classification consiste à regrouper les accidents présentant des similitudes.

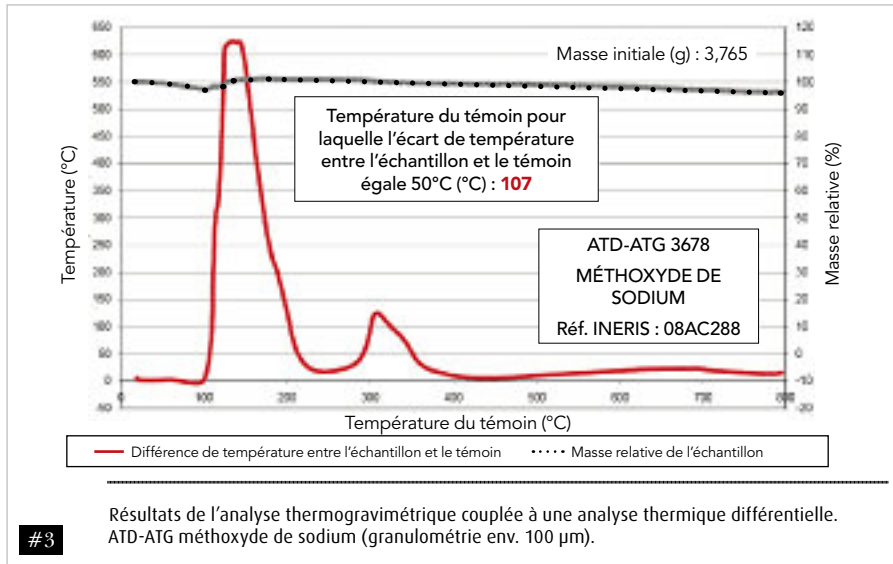
La figure 2 illustre la représentation de la base de données et des regroupements de classes d'accidents dans un plan factoriel (composantes principales). Ces différentes classes d'accidents correspondent aux scénarios principaux décrits dans le tableau 1. Le scénario 1 est notamment significatif aux États-Unis, pays pour lequel la cartographie des unités de production apporte un éclairage. La plupart des unités sont situées dans le Middle-West américain, alors que la consommation est majoritairement dans les principales mégapoles américaines situées sur les côtes, et l'exportation essentiellement par voie maritime. Les grandes distances de transport par voies terrestres (rail, route) sont un des facteurs (mais pas le seul) à l'origine de ces accidents.



Scénario 1	Scénario d'incident lors du transport de produits dangereux (éthanol) : déversement suivi ou non d'une explosion/incendie (avec dans certains cas contamination environnementale).
Scénario 2	Scénario d'explosion/incendie au niveau d'un réservoir de stockage de produits dangereux, en particulier lorsque l'usine est en travaux.
Scénario 3	Scénario d'explosion/incendie dans un sécheur de grains.
Scénario 4	Scénario d'incident atypique (ex. : accident lors de la construction de l'usine).
Scénario 5	Scénario d'explosion/incendie lors d'une fabrication artisanale de biodiesel.

Tableau 1 : Description des classes de scénarios accidentels découlant du traitement statistique.





#3

Développement de l'outil de prédiagnostic Biosafuel®

La conception de l'outil BIOSAFUEL® (du même nom que le programme) s'appuie sur le cadre méthodologique d'une méthode d'analyse multicritère d'aide à la décision, la méthode AHP (« Analytic Hierarchical Process »), une méthode assise sur une expérience significative. Notre choix s'est notamment justifié par les travaux antérieurs menés à l'aide de cette méthode par [Narayanan *et al.*, 2007] pour hiérarchiser les filières Biodiesel 1G et par [Papalexandrou *et al.*, 2008] pour évaluer les filières biocarburants. Ces méthodes multicritères permettent d'agréger plusieurs indicateurs afin d'évaluer et de comparer différentes alternatives ou options. Elles sont particulièrement adaptées lorsque des indicateurs de nature différente (données quantitatives, semi-quantitatives, qualitatives) et d'origine différente (indicateurs économiques, sociétaux...) sont pris en compte. Dans le cadre de la mise en place de BIOSAFUEL®, l'objectif était de proposer une méthodologie permettant de déterminer le niveau de sécurité d'un projet biocarburant donné, qui pourrait également s'appliquer à la détermination des indicateurs économiques, sociétaux et environnementaux relatifs à ce projet. BIOSAFUEL® s'intéresse à la sécurité liée aux procédés de production et à la distribution des biocarburants.

Les dangers relatifs aux filières biocarburants de 1^{re} génération et de génération 1bis ont été identifiés. Pour construire BIOSAFUEL®, nous nous sommes appuyés sur l'identification de ces dangers, que nous avons cherché à évaluer et à hiérarchiser à partir de méthodes semi-quantitatives existantes telles que :

- la méthode du Groupe Rhodia pour évaluer les risques liés au transport des produits chimiques (catalyseurs, acide, base, éthanol...) et de la biomasse. Cette méthode a également été utilisée dans le cadre du projet Global ;
- la méthode HPR (Hiérarchisation des Risques Potentiels) [Vincent *et al.*, 2000] de l'INRS pour évaluer les risques liés au stockage des produits chimiques (catalyseurs, acide, base, éthanol...) ;
- la matrice RMR (Reactivity Management Roundtable) de l'AIChE*** [Chastain *et al.*,

Expérimentations

Une part du projet a été consacrée à la réalisation d'essais permettant la caractérisation des scénarios accidentels se traduisant par des feux de nappes de produits impliqués dans l'élaboration de biodiesels (huiles végétales...) de première génération ou de carburants de synthèse de seconde génération (cires, produits bruts résultant du traitement en réacteur de type Fischer-Tropsch de gaz de synthèse obtenu par gazéification de biomasse, pré-examen de la combustion du 2.5 DMF* en conditions d'incendie). L'apport le plus significatif de ce volet concerne la caractérisation des dangers des produits de type alcoolates de potassium et de sodium, constituant les véritables catalyseurs de la réaction de trans-estérification opérant dans les filières de production de biodiesel reposant sur une catalyse homogène en milieu basique. Un plan d'expériences consolidé entre INERIS et le LCRE** a permis d'examiner les points suivants :

- comportement des produits lors d'une combustion en tas (essais au calorimètre de Tewarson) ;
- explosivité des poussières ;
- réactivité des produits à l'eau (essais calorimétriques menés par le LCRE).

Les résultats obtenus à ce jour confirment la réalité des dangers de ces produits et permettent d'en préciser les contours.

La figure 3 illustre le fort potentiel d'auto-échauffement du méthoxyde de sodium.

	Méthoxyde de potassium	Méthoxyde de sodium
Pmax	7.1 bars	7.6 bars
VMP	490 bars/s	746 bars/s
Kst	133 bar.m/s	215 bar.m/s
Classe d'explosion	St1 (1 à 200 bar.m/s)	St2 (201 à 300 bar.m/s)

Tableau 2 : mise en évidence des caractéristiques d'explosivité de poudres de méthoxydes de potassium et de sodium.

NOTES

* 2,5 DMF 2,5-diméthylfurane.

** LCRE laboratoire canadien de recherche sur les explosifs.

*** American Institute of Chemical Engineers.

2008] pour prendre en compte les risques liés à la compatibilité des produits stockés à proximité ;

- le modèle de Frank-Kamenetskii pour prendre en compte les risques d'auto-échauffement de produits pulvérulents (farine de blé, maïs...).

Plus globalement, le tableau 3 récapitule l'ensemble des critères de sécurité évalués par BIOSAFUEL®, il précise les outils utilisés et les paramètres d'entrée pris en compte pour déterminer ces critères.

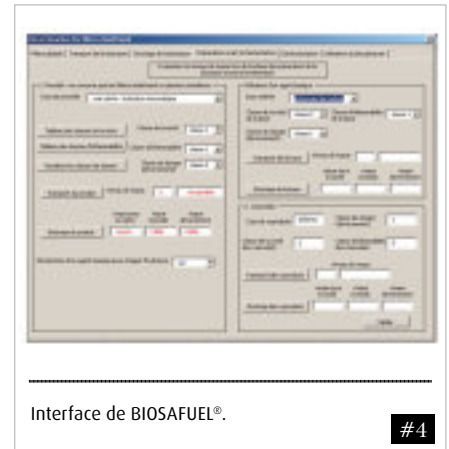
Cette approche méthodologique s'est concrétisée par le développement d'un outil informatisé sous Excel. En pratique, la version 1 de l'outil est capable de traiter l'ensemble des filières bioéthanol et biodiesel 1G. L'outil a été encodé sous VBA (« Visual Basic for Applications »). La figure 4 suivante présente l'interface de BIOSAFUEL®.

BIOSAFUEL® est un outil d'évaluation des

risques mais également un outil de hiérarchisation. Il a été conçu de façon à pouvoir comparer différentes filières biocarburant (dans un contexte donné). En effet, pour chacune des phases de production du biocarburant, différents procédés, différents produits chimiques, différentes technologies peuvent être utilisés. BIOSAFUEL® est capable de comparer et de hiérarchiser ces différentes variantes, à partir des indicateurs déterminés par la méthode AHP (score AHP).

Conclusions et perspectives

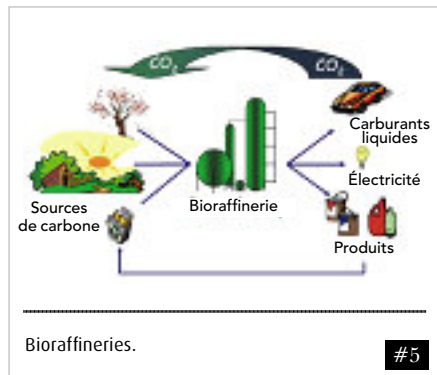
Sans véritablement constituer une barrière technologique au développement des biocarburants, il est apparu clairement au cours de notre recherche (retour d'accidents, prise de conscience des syndicats professionnels) que les questions de maîtrise de la sécurité nécessitent une réflexion plus soutenue. Certes les technologies actuelles sont matures,



#4

Famille de risques	Paramètres d'entrée	Outils utilisés	Critères évalués
Risques liés au stockage et à l'utilisation de produits chimiques	<ul style="list-style-type: none"> - Classe de danger du produit - Quantité de produit - Fréquence d'utilisation du produit 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode HRP « modifiée » - Matrice RMR 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau de risque de toxicité - Niveau de risque d'inflammabilité
	<ul style="list-style-type: none"> - Classe d'inflammabilité du produit - Source d'allumage - Quantité de produit - Quantité de produit - État physique du produit - Classe de danger du produit 		<ul style="list-style-type: none"> - Impacts environnementaux (déversement)
Risques liés au stockage de la biomasse	<ul style="list-style-type: none"> - Classe d'inflammabilité du produit - Source d'allumage - Quantité de produit 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode HRP « modifiée » 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau de risque d'inflammabilité
	<ul style="list-style-type: none"> - Dimension du contenant - Température ambiante - Géométrie du contenant - Paramètres M et N 	<ul style="list-style-type: none"> - Modèle de Frank-Kamenetskii 	<ul style="list-style-type: none"> - Adéquation de la dimension du contenant
Risques liés au stockage et à l'utilisation du biocarburant	<ul style="list-style-type: none"> - Température du point d'éclair du biocarburant - Température d'ébullition du biocarburant 	<ul style="list-style-type: none"> - Classification des liquides inflammables 	<ul style="list-style-type: none"> - Niveau d'inflammabilité
Risques procédés	<ul style="list-style-type: none"> - T_0, température opératoire du procédé - MTSR, température maximale de la réaction de synthèse - $T_{MRad>24h}$, température à partir de laquelle le TMRad > 24 h - T_b, température d'ébullition du milieu réactionnel 	<ul style="list-style-type: none"> - Diagramme de Stoessel 	<ul style="list-style-type: none"> - Classe de criticité du procédé chimique
Risques liés au transport des produits	<ul style="list-style-type: none"> - Distance parcourue - Fréquence des trajets - Mode de transport - Classe de toxicité du produit - Classe d'inflammabilité - Quantité libérable - Pression 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de Rhodia « modifiée » 	<ul style="list-style-type: none"> - Impacts humains - Impacts environnementaux (déversement) - Niveau de risque

Tableau 3 : Synthèse des critères pris en compte selon les familles de risques examinés dans BIOSAFUEL®.



mais de multiples facteurs (technologiques, culturels, économiques) rendent la maîtrise des risques parfois incertaine. Par ailleurs, de véritables challenges de sécurité – non entièrement résolus à ce jour – ont bien été identifiés dans le cadre des développements espérés dans le futur (utilisation de mélanges éthanol/gasoil ou éthanol/biodiesel dans des moteurs diesel, utilisation de carburants biosourcés en solutions alternatives au kérosène, [Marlair *et al.*, 3]). Les grands feux d'éthanol constituent également un véritable challenge pour les services d'intervention (expérience de l'accident de Port Kembla, Australie, 2004), le développement d'émulseurs plus performants, voire dédiés aux biocarburants est à l'ordre du jour. La durabilité des filières, un temps remise en question passe naturellement par une parfaite maîtrise des questions de sécurité comme pour toutes les sources d'énergie renouvelable. Les actions futures de l'INERIS dans ce domaine (dont les programmes BIOMAP,

ALFA-BIRD...) s'inscrivent bien dans l'objectif de faire reconnaître que la sécurité constitue un véritable critère à part entière de la notion de développement durable.

Il conviendra en particulier d'être attentif aux développements technologiques tant attendus comme l'industrialisation des filières de production dites de seconde génération et à l'intégration inéluctable des filières de production de biocarburants (actuelles ou futures) au sein de bioraffineries.

Le modèle industriel de la bio-raffinerie dont les enjeux sont connus imposera un niveau d'intégration des procédés et des systèmes de gestion des énergies et autres utilités sans précédent, ainsi qu'une flexibilité extrême en matière de flux entrants (biomasses traitées) et sortants (biomatériaux, bioproduits, bioénergie). Le moindre dysfonctionnement non maîtrisé aura potentiellement des conséquences significatives sur l'ensemble des systèmes de production et son environnement.

RÉFÉRENCES

Vincent R., Bonthoux F., *Évaluation du risque chimique*. Cahier de notes documentaires. Hygiène et sécurité du travail - N°178-2000.

Chastain J.W., Doerr W.W., Berger S., Lodal P.N., *Avoid chemical reactivity incidents in warehouses*, 2008.

Rivière C., Marlair G. *Use of multiple correspondence analysis and hierarchical clustering to identify biofuel related incidents typologies*. Accepté (sept. 2009) dans Biofpr- (Biofuels Bioproducts & Biorefining).

Marlair G. *Biofuels for transport: a topic of interest for IGUS experts?*, Proceedings of IGUS EOS meeting, 14-16 May 2008, Stockholm, Suède

Marlair G., Bourg D. *BIOSAFUEL® et HORIZON : two research initiatives for better sustainability of biofuels development*, Biotechnology Symposium, Brock's University, Ste Catharines (Ontario), Canada, 9 juillet 2006.

Narayanan D., Zhang Y., Mannan S. *Engineering for Sustainable Development (ESD) in bio-diesel production*. Process safety and environmental protection. 2007.

Papalexandrou M.A., Pilavachi P.A., Chatzimouratidis A.I. *Evaluation of liquid bio-fuels using the Analytic Hierarchy Process*. Process safety and environment protection 8 6 (2008) 360-374.

ABSTRACT

The project BIOSAFUEL® (2006-2009) was conducted by INERIS with external partners (UPJV, ENSIB, or CERL) to provide a first overview of existing or potential safety issues.

Steps of the project comprised :

- literature review operations and exchanges of actors from the biofuel industry,
- analytical assessments of products and process driven hazards pertaining to 1G and 2G biofuels
- in depth analysis of accidents that struck the biofuel industry in the last decade (identification of major accident scenario typology by use of hierarchical clustering)
- experimental phases focusing on special safety issues, like the characterization of hazards pertaining to biodiesel catalysts
- development of a user-friendly computer-assisted tool. It allows a preliminary and evaluation of hazards pertaining to biofuels chains (biodiesel, bioethanol, and hydrotreated,) with a life cycle analysis perspective.

Although 1G biofuels rely on relatively mature technologies, the fast moving scene of biofuel development justify that attention keeps paid on safety issues. Favorable and unfavorable factors for safety management have been clearly identified, accidents do regularly occur, and some challenging issues are foreseen for peculiar applications like the promotion of brand new biofuels (like furanics), the use of ethanol rich fuel mixtures in diesel engines, or the use of biomass derived fuels in replacement or addition to kerosene for public aviation transport. It must be realized that safety management is actually a genuine component of sustainability of biofuels in the future.

Nanoris : étude des risques d'explosion liés à la production et l'utilisation de nanoparticules

{ J. Bouillard, A. Vignes }

Depuis plusieurs années, nombre d'applications industrielles impliquant des nanomatériaux ont vu le jour mais les connaissances relatives aux dangers de ces nouveaux matériaux sont actuellement restreintes. Le développement de ces nouveaux produits ne peut se poursuivre sans une évaluation approfondie des risques pour l'environnement et au poste de travail. La toxicité potentielle de ces nouveaux matériaux est souvent mise en avant. Mais les risques d'incendie et d'explosion ne doivent pas être négligés. Centrées sur les poudres de taille micrométrique, les données de la littérature ne permettaient pas, d'évaluer la probabilité et la gravité d'une explosion de nanopoudres. La sensibilité à l'inflammation et la sévérité d'explosion de nanomatériaux pulvérulents typiques ont pu être évaluées par ce projet, ainsi que la validité des appareillages et procédures standards. Enfin, la méthodologie adoptée, afin d'évaluer les risques d'inflammation et d'explosion d'une installation de production de nanopoudres et de sécuriser au mieux la santé des travailleurs exposés aux nanoparticules, a été illustrée des exemples ciblés. Cette démarche pourra servir de base à de analyses de risques concernant les produits nanostructurés.

Les nanoparticules sont des particules ou structures dont la taille se mesure en nanomètres (1-1 000). Ces particules, lorsqu'elles participent à la constitution d'un matériau en améliorent les performances ou lui confèrent des propriétés nouvelles. Les applications des nanoparticules sont très diverses : création de filtres antipollution plus sélectifs, de composants électroniques plus fiables, de plasti-

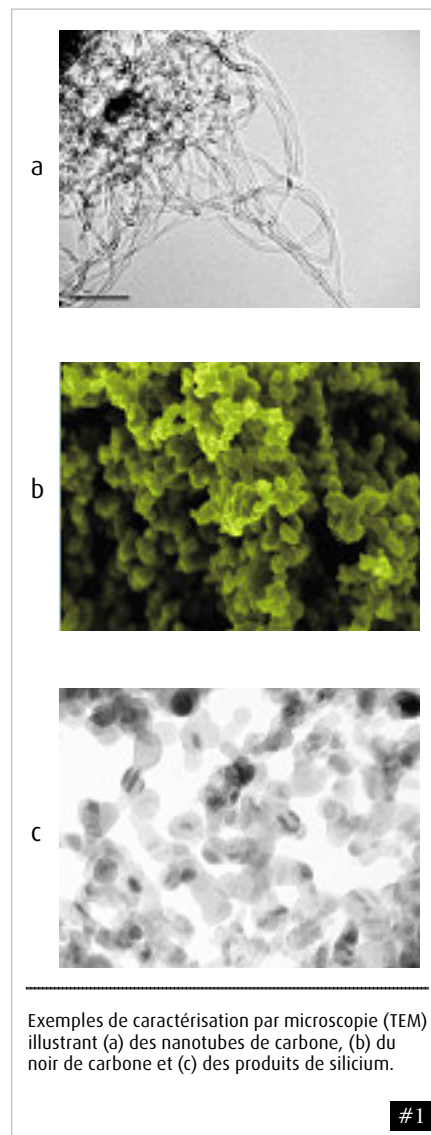
ques ou de pneumatiques plus résistants, de nouveaux catalyseurs, de nouveaux vecteurs pharmaceutiques... Ces matériaux ont donc un caractère transversal et représentent les « matières premières » émergentes au début du XXI^e siècle. Or, notre connaissance reste limitée sur les effets potentiels de ces nouveaux matériaux sur la santé ou sur leur caractère inflammable et explosif. Pour ces matériaux, le rapport surface/volume est très important, leur conférant une capacité d'échange et une réactivité exceptionnelles. Pour un développement durable et responsable de ces technologies, les risques toxicologiques et réactionnels doivent être évalués afin de pouvoir ensuite proposer des moyens de prévention.

Les objectifs généraux de ce projet de recherche ont consisté à acquérir une meilleure compréhension des phénomènes d'inflammation et d'explosivité associés à ces produits pour mieux appréhender les risques accidentels.

Dans un premier temps, un choix de nanoparticules type et représentatif des enjeux industriels a été formulé en collaboration avec nos partenaires européens. Ensuite, les paramètres d'inflammation et de sensibilité-sévérité d'explosion de ces particules ont été caractérisés en utilisant les techniques actuelles développées pour les micropoudres.

Le projet national Nanoris couplé au projet Européen Nanosafe2

Le programme NANORIS représente la contribution de l'INERIS au programme intégré européen NANOSAFE 2 coordonné par le CEA



RÉFÉRENCES

[1] Vignes A., Traore M., Perrin L., Dufaud O., Bouillard J., Thomas D. *Nano vs Micro: Estimation and Modelling of the Dust Explosion Sensitivity and Severity*, 12th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Edinburgh, Scotland, 22-24 May 2007, IChemE SYMPOSIUM SERIES N°153, paper 118.

[2] Vignes A., *Évaluation de l'inflammabilité et de l'explosivité des nanopoudres : une démarche essentielle pour la maîtrise des risques*. Génèdes Procédés, Université de Nancy-INPL Doctorat (2008).

[3] Dufaud O., Traore M., Vignes A., Perrin L., Chazelet S., Bouillard J., Thomas D. *Aluminium dusts explosions: does particle size matter?*, Risk, Reliability and Societal Safety-ESREL 2007, Stavenger, Norway, Vol 2, 2003-2009, Ed Taylor & Francis group, London, ISBN 978-0-415-44756-7.

[4] Bouillard J., Vignes A. *Explosion risks from nanomaterials*, Congrès International NANOSAFE 2008, 3-7 Novembre 2008.

[5] Vignes A., Dufaud O., Perrin L., Thomas D., Bouillard J. *Thermokinetic study of carbon nanotube combustion*, Chemical Engineering Science (2009).

[6] Munoz F., Vignes A., Perrin L., Dufaud O., Laurent A., Thomas D., Bouillard J. *Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules ?* 11^e Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne, *Récents Progrès en Génie des Procédés*, Numéro 96 - 2007, Papier 117, ISBN 2-910239-70-5, Ed. SFGP, Paris, France.

[7] Eckhoff R. K: *Understanding Dust Explosions : The role of Powder Science and Technology*, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 22, Issue 1, January 2009, p. 105-116.

et impliquant 24 partenaires européens. Les objectifs du projet Nanoris ont été :

- d'évaluer les techniques et méthodologies courantes de caractérisation d'inflammation et de sensibilité-sévérité de nanopoudres préalablement choisies et représentatives des enjeux de l'industrie européenne ;
- de proposer des recommandations et des axes de développement quant aux limitations observées des techniques et méthodologies actuellement utilisées lorsqu'elles ne sont plus applicables aux nanopoudres ;
- de proposer de nouvelles méthodologies d'analyse de risques basées sur les nouvelles données de caractérisation expérimentale, recueillies dans ce programme.

Dans le cadre de ce projet, le noir de carbone de surface spécifique variable comprise entre 9 m²/g et 1000 m²/g, les nanotubes de carbone (NTC) d'une surface spécifique voisine de 200 m²/g, les nanoparticules d'aluminium, de silices et d'oxydes de titane ont été choisies de par leur importance industrielle et stratégique.

Caractérisation physicochimique des nanoparticules

Ces particules choisies ont été caractérisées physiquement par microscopie électronique à balayage et à transmission (MEB et TEM) (figure 1), par diffraction laser et par spectroscopie à corrélation de photon, ce qui a permis de déterminer les caractéristiques granulométriques des nanoparticules. Une *caractérisation BET* a permis de déterminer les surfaces spécifiques des nanoparticules. La mesure du potentiel Zeta a permis de mettre en évidence les charges électrostatiques des nanoparticules. Ces particules ont aussi été caractérisées chimiquement par microanalyse RX, diffraction RX, spectroscopie à fluorescence X (caractérisation de la composition chimique), spectroscopie Raman, spectroscopie photo-électronique RX, et par spectroscopie infrarouge.

Caractérisation de l'explosivité des nanoparticules

Les explosions de pulvérulents sont couramment évaluées en utilisant un paramètre d'explosion qui dépend de la vitesse en montée de pression lors de l'explosion. Ce paramètre K_{st} qui décrit la sévérité de l'ex-

plosion, est défini par $K_{st} = (dp/dt)_{max} \cdot V^{1/3}$. Les résultats des mesures des paramètres de sécurité pour les nanopoudres testées sont résumés dans le tableau 1. La pression maximale pour les MWNTs (« Multi wall carbon Nanotubes »), composé non greffé et Graphistrength (composé greffé avec des copolymères) est de l'ordre de 6.6 à 7.3 bars, et la vitesse de montée en pression variant de 227 à 386 bar/s avec un index K_{st} varie de 62 à 105. La classe d'explosivité de ce type de poudre est considérée comme faible (classe St1). Il en est de même pour les noirs de carbone étudiés (Corax N115, Corax N550, Thermal Black N990 et le Printex).

Pour l'aluminium, les pressions d'explosion sont plus importantes, variant de 8.3 bars pour les particules ALEX à 9.5 bars pour les autres nanoparticules, avec une énergie minimale d'inflammation inférieure à 1-8 mJ. Ceci vient contraster avec les résultats obtenus avec les matériaux carbonés pour lesquels l'énergie minimale d'inflammation est supérieure à 1 J. Pour les nanopoudres d'aluminium de 100 et 200 nm, l'explosion peut devenir très violente avec un index d'explosion K_{st} variant de 365 à 675. Ces résultats peuvent être comparés avec la sévérité de l'explosion de l'hydrogène. Nos résultats suggèrent donc que les nanoparticules d'aluminium pourraient exploser de façon plus violente que l'hydrogène, gaz bien connu pour sa capacité à détoner.

Il apparaît donc que certaines nanoparticules pourraient détoner dans certaines conditions (rappelons que la détonation est définie comme une explosion supersonique alors que la déflagration est définie comme une explosion subsonique). Ces résultats sont de grande importance pour cette technologie émergente car de nouveaux moyens de protection devront être proposés afin de réduire ces risques [1, 2, 3, 4].

Une caractérisation des données thermocinétiques utilisées pour l'évaluation du risque d'autoéchauffement de nanotubes de carbone et de nanopoudres d'aluminium (basée sur les méthodes de Frank-Kamenetzki ou de Semenov a permis de montrer que plus le matériau est nanostructuré, plus il est sensible à la combustion et à l'explosion. À noter que cette réactivité n'est pas seulement fonction de la surface spécifique mais aussi de l'énergie

d'activation de la réaction carbone-oxygène ou métal-oxygène, qui diminue avec une augmentation de la surface spécifique [5]. Ces données ont été ensuite utilisées dans une approche systémique d'analyse des risques, où le risque est classé sous trois rubriques d'intensité croissante : faible, médian et important. Pour chacune de ces classes, des mesures de prévention et de protection adéquates doivent être définies et mises en place [6].

Conclusions et perspectives

Nous avons évalué les méthodologies actuelles de caractérisation des paramètres d'explosion et d'inflammabilité et souligné leurs limitations quant à leur utilisation pour les nanopoudres. En particulier, nous avons souligné que l'existence d'agglomérats pouvait nous faire sous-estimer les caractéristiques d'explosion et d'inflammation des nanopoudres évaluées à l'aide d'outils conçus pour les micropoudres. Nous avons montré que pour beaucoup de tests normalisés, les particules sont, au préalable, temporairement stockées et, de ce fait s'agglomèrent. Il est ensuite très difficile de les désagglomérer lors du test proprement dit. Cet effet est mineur pour les microparticules mais devient important pour les nanoparticules. Les résultats obtenus avec ces tests peuvent donc conduire à une

sous-estimation des paramètres de sécurité. Un effort majeur serait à faire dans la conception de nouveaux instruments qui permettrait une meilleure dispersion de ces nanopoudres en raison de leur forte capacité d'agglomération. Afin d'éviter tout contact des opérateurs avec les nanoparticules, de nouveaux appareils de mesure d'énergie minimale d'inflammation (EMI), de comportement au choc et de mesure de résistance électrique ont été développés. Ceux-ci entrent actuellement dans une phase de validation et de comparaison avec d'autres instruments afin de pouvoir être normalisés ultérieurement. De nouveaux axes de développement pour permettre une meilleure maîtrise des risques associés à la production et l'utilisation de nanoparticules sont déjà perceptibles :

- compréhension des phénomènes d'agglomération avec en particulier une méthodologie de mesure de l'énergie d'agglomération pouvant servir à la construction d'une échelle de risque [7] ;
- compréhension de la transition déflagration/détonation des nanoparticules ;
- conception et mise en œuvre de nouveaux outils plus compacts, utilisant moins de produits et assurant une meilleure homogénéité et répartition de ces produits sous formes primaires.

	Noirs de Carbone				Nanotubes de Carbone		Aluminium		
	THERMAL BACK N990	CORAX N550	CORAX N115	PRINTEX XE2	(MWNT-1)	(Graphistrength)	100 nm	200 nm	Alex
Énergie Minimale d'Inflammation (EMI)	> 1 J	> 1 J	> 1 J	> 1 J	> 1 J	> 1 J	< 1 mJ	7 mJ	8 mJ
Température d'inflammation en nuage (°C)	> 900	> 900	780	810	-	-	-	-	-
Température d'inflammation en couche (°C)	-	-	-	-	> 400	-	-	-	-
Concentration minimale d'explosion (g/m ³)	60	60	60	60	45	45	30	30	60
Pression maximale d'explosion P _{max} (bar)	6.7	7.5	7.7	7.2	6.6	7.3	8.2	9.5	8.3
Montée de pression maximale (dp/dt) _{max} (bar/s)	240	503	326	343	227	386	1 340	2 480	933
Kst (m.bar/s)	65	137	88	93	62	105	364	673	253
Explosivité Classe (St 0 à St 3)	St1	St1	St1	St1	St1	St1	St3	St3	St2

Tableau 1 : Principaux paramètres de sécurité pour les noirs de carbone, les nanotubes de carbone et l'aluminium.

ABSTRACT

In industrial and research fields, nanomaterials provide a growing interest that is leading to many new industrial applications for the last few years. Knowledge about the hazards related to these new materials is nevertheless currently limited. As safe nanomaterial production cannot be permitted without a thorough evaluation of environmental and occupational hazards, risks associated with these materials have to be fully evaluated. Potential toxicity of nanoparticles often comes in the foremind of safety engineers. However, dust fire and explosion should not be neglected when the dusts are combustible. So far, literature studies concerning the evaluation of explosion and flammability risks of powders were essentially carried out on micron-sized materials and did not enable in fact the evaluation of fire and explosion risk probabilities and gravities of nanosized powders. The main goal of this work is to study explosion and ignition risks related to nanopowders. In particular, the evaluation of the explosion sensitivity and severity of typical nanomaterials (carbon blacks, carbon nanotubes, aluminium) has been studied as well as the validity of the existing analytical and methodological tools designed to evaluate dust ignition and explosion hazards. It was found that agglomeration of nanoparticles can significantly modify the explosive behaviour of nanopowders, thus leading us to reconsider the actual protocols for the measurement of safety parameters. It is proposed that new instruments allowing a better dispersion should be designed to properly evaluate explosion risks from these nanomaterials.

Prédiction des mécanismes d'accélération de la combustion dans les atmosphères explosives (EXPRES)

{ C. Proust }

RÉFÉRENCES

SCI-Steel Construction Institute (2009), *Buncefield Explosion mechanisms: phase 1*, HSE Research Report RR718.

Bradley D., Cresswell T.M., Puttock J.S., 2001. *Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large scale explosions*, *Comb. and Flame*, vol. 124, p. 551-559.

Cates A., Samuels B., 1991. *A simple assessment methodology for vented explosions*, *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 4.

Janovsky B., Podstawska T., Horkel J., Vejs L., 2004. *Vented Confined Explosions: Experiment and AutoReaGas Simulation*, *Loss Prev Symp.*, Prague, June 2004.

Henneton N., 2007. *Propagation d'une flamme de prémélange gazeux d'une enceinte vers un tube : étude des mécanismes de transmission et de coincement au changement de section*, Thèse soutenue à l'Université de Poitiers le 5 décembre 2007.

Daubech J., 2008. *Contribution à l'étude de l'effet de l'hétérogénéité d'un prémélange gazeux sur la propagation d'une flamme dans un tube clos*, thèse soutenue à l'Université d'Orléans-Bourges le 18 juin 2008.

Daubech J., Sochet I., Proust C., 2007. *Flame front perturbations induced by concentration gradients*, *Proceedings of the 14th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*, 23rd-27th July 2007, Poitiers, France.

La prédiction des conséquences des explosions est un enjeu important de la maîtrise des risques. Les méthodes analytiques complètes dont on dispose depuis longtemps sont fondées sur des hypothèses restrictives comme par exemple un mélange homogène et au repos [Cates, 1991] et concernent le plus souvent des géométries simples. Elles ont pourtant eu une influence décisive sur l'évolution des mentalités par leur caractère pédagogique et leur solidité conceptuelle. Mais, dans la pratique, les atmosphères explosives responsables des explosions sont souvent turbulentes, en écoulement, parfois fortement hétérogènes et l'explosion se développe dans une géométrie complexe, transitant parfois de volumes en volumes. Les analyses d'accident attestent que, plus l'histoire de l'explosion est compliquée, plus l'explosion est sévère. Il est important de tenir compte de cette réalité.

Les méthodes numériques qui tentent de résoudre point par point et instant par instant les équations différentielles représentatives apparaissent souvent comme une alternative crédible. Il existe pour cela des codes « commerciaux » (FLUENT, REAGAS-TNO, FLACS-Gexcon), de type dits « CFD » (« Computational Fluid Dynamics »), qui n'ont pu être adaptés aux études de risques qu'au prix d'une schématisation extrême de la physique et d'une réduction drastique de la résolution des calculs. Le potentiel prédictif est altéré, comme en témoignent les difficultés rencontrées par le groupe d'experts chargé de l'analyse de l'accident de Buncefield en 2005 (SCI, 2009).

Pour contourner la difficulté, l'INERIS développe depuis plusieurs années des outils de

prédiction intermédiaires (méthodes phénoménologiques) qui reposent sur la robustesse de modèles analytiques mais dans lesquels sont introduites des données supplémentaires pour tenir compte de l'environnement de l'explosion. C'est le cas de la méthode EFFEX pour les explosions confinées [Proust *et al.*, 2007]. On a tenté dans ce programme de clarifier les connaissances dans ce domaine de la modélisation des explosions pour alimenter une discussion sur les outils numériques associés et les faire progresser. Une collaboration a été mise en place avec des partenaires académiques (Universités de Poitiers et de Bourges), institutionnels (CNES, Institut Fraunhofer) et industriels (FIKE, GEXCON).

Loi de comportement des flammes

Le programme comporte un volet de physique des flammes fondamental dans lequel on a cherché des lois de comportement des flammes. Sur cette base, on a tenté de préciser de façon paramétrique les relations entre la flamme et son environnement pratique (turbulence, géométrie). L'idée nouvelle est que l'incidence des instabilités de combustion peut être prédominante dans de nombreuses situations [Bradley *et al.*, 2001]. Nous avons exploré ces pistes en simulant l'effet de ces instabilités, très sensibles à l'effet de la richesse du mélange, par l'observation de la propagation de la flamme dans un gradient de réactivité du mélange.

On a choisi la configuration d'un tube transparent capable de résister à plus de 100 bar de section constante carrée, composé de plusieurs tronçons susceptibles d'être remplis par des mélanges de richesses différentes [Daubech,

2008]. Le mélange gazeux peut être ensemençé dans l'un des tronçons pour faire un suivi par traçage optique de la richesse. L'instrumentation a été mise au point, dont des capteurs optiques très spéciaux composés d'une diode laser collimatée et d'une cellule photoélectrique. Ces capteurs, utilisés comme opacimètres, permettent de suivre en temps réel la richesse du mélange, et de détecter le passage de la flamme. Un dispositif de tomographie laser éclairant toute la longueur du tube a été développé pour filmer la déformation de la flamme.

On a comparé la propagation des flammes dans des mélanges homogènes et hétérogènes dans lesquels un gradient de concentration contrôlé est préparé. On a eu recours à des mélanges stœchiométriques H₂/O₂/N₂. On a découvert [Daubech, 2008] une forte interaction entre la propagation de la flamme et les ondes acoustiques émises dès la formation de la flamme autour du point d'allumage. Ces ondes pourraient augmenter la surface du front de flamme d'au moins un facteur 10 (figure 2). Cet ordre de grandeur a été trouvé également dans des enceintes de plus grandes tailles, si bien qu'on peut penser que ces interactions correspondent à un mode de propagation habituel pour toutes les flammes en milieu confiné. Le facteur d'amplification de la surface de la flamme dépend du nombre de modes acoustiques excités. On a découvert qu'il est possible de prédire cette amplification à l'aide d'un modèle de stabilité de Taylor (comportement d'une interface réactive soumise à une accélération) généralisé :

$$U_{LD} = \left(1 + 4 \cdot \alpha \cdot \frac{(\alpha - 1)^2}{(\alpha^2 + \alpha^2 + 3 \cdot \alpha - 1)} \right) \cdot S_{lad}$$

$$U_{RT} = 0.51 \cdot \sqrt{\frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \eta \cdot r}$$

$$U_{comp} = \sqrt{U_{RT}^2 + U_{LD}^2}$$

où α est le taux d'expansion des produits de combustion, S_{lad} la vitesse laminaire de flamme, η l'accélération de l'écoulement et r le rayon de courbure caractéristique de la flamme. U_{comp} est la vitesse de combustion résultant de la contribution des instabilités

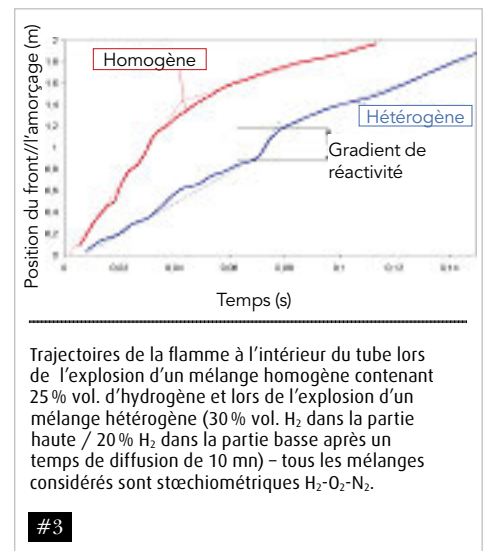
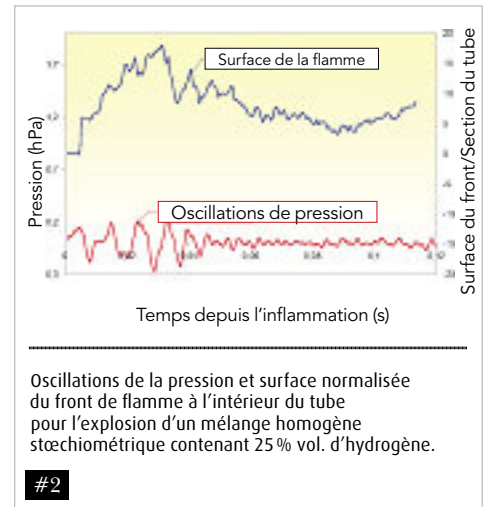
« hydrodynamiques » (U_{LD} induites par le gradient de densité à travers le front) et des instabilités de « Taylor » (U_{RT} induites par l'accélération).

Dans les mélanges hétérogènes, on observe systématiquement (figure 3) un accroissement de la vitesse de la flamme au passage dans le gradient de concentration. Cette augmentation peut être prédite avec précision au moyen du modèle de Taylor généralisé. On note que cette amplification est du même ordre de grandeur que la vitesse moyenne de la flamme en dehors du gradient.

Il en résulte que la prise en compte des instabilités de combustion est déterminante pour la prédiction des effets d'une explosion et qu'ils peuvent résulter à part égales de l'interaction avec les perturbations de l'écoulement (ondes acoustiques à coup sûr et turbulence sans doute) et des variations de réactivité du mélange. Le modèle de Taylor généralisé semble bien représenter ces effets. On a prolongé cette étude par l'examen spécifique des interactions flamme-obstacle (non présent) et flamme turbulence (voir article suivant sur la recherche partenariale avec Fike).

Performances des outils de prédiction

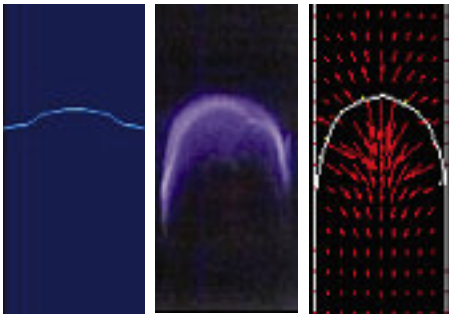
On s'est évidemment intéressé aux codes « commerciaux » de type CFD utilisés en matière de prédiction des effets de l'explosion : FLACS, REAGAS et FLUENT. Sur le fond, ces codes sont destinés au calcul des écoulements. Ils ont été adaptés pour faire du calcul d'explosion en ajoutant un terme de production de chaleur [Proust *et al.*, 2008] calculé dans un sous-programme à partir de corrélations expérimentales. Pour que cela fonctionne, ce terme de production doit être réparti sur plusieurs cellules du maillage ce qui est fort éloigné de la physique réelle. L'une des conséquences est que la flamme n'est pas d'épaisseur faible si bien que les effets d'instabilité peuvent être nettement sous-estimés (figure 4). Il en résulte une forte sous-estimation de l'accélération de la flamme lorsque l'écoulement n'est pas turbulent. Ce point avait été noté par Janovsky et a été confirmé dans le cadre de ce projet [Henetton, 2007]. En revanche, la capacité que ces codes possèdent pour prédire les



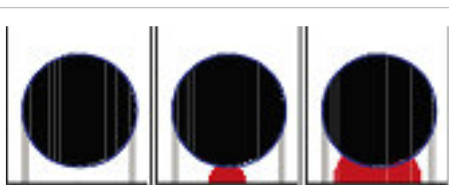
RÉFÉRENCES

Proust C., Leprette E., Daubech S., Sochet I., 2007. *The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions*, 41st Annual Loss Prevention Symposium, April 23-25, 2007, Houston, USA.

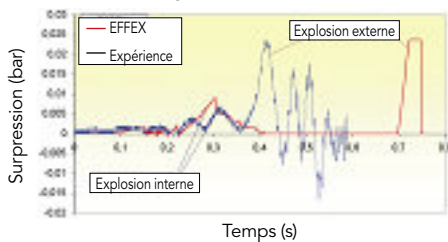
Proust C., Daubech J., Leprette E., 2008. *Differentiated routes for the simulation of the consequences of explosions*, accepted for publication in J. Loss Prev.



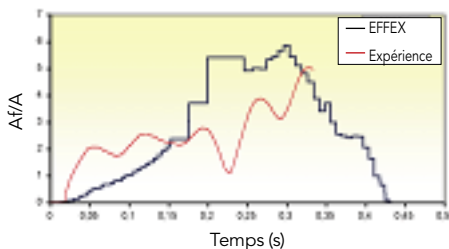
Simulation CFD (van Wingerden, 1994), observation (Proust *et al.*, 2008) et simulation MERLIN (Daubech, 2008) d'une flamme (6.3 % méthane in air) se propageant dans un tube vertical ouvert du côté de l'inflammation (bas) et fermé à l'autre extrémité. #4



Surpression interne



Surface de la flamme / section droite



EXPRES : contournement par une flamme d'un obstacle sphérique dans un cylindre ouvert au sommet - simulation et expérience (mélange méthane air stœchiométrique). #5

caractéristiques d'un écoulement peut être mise à profit pour interpréter des résultats expérimentaux lorsque cette information n'est pas directement accessible.

Malheureusement, il est peu probable que ce type de code puisse en l'état être capable de prédire les instabilités de combustion. On a examiné comment ces codes pourraient évoluer pour y parvenir. On a mis à l'étude une méthode originale [Daubech, 2008] qui consiste à considérer la flamme comme une interface semi-perméable dotée d'une vitesse propre séparant deux milieux de densités différentes. Une méthode de suivi de front est appliquée à l'interface avec des relations de saut spécifiques aux flammes (code MERLIN). Des résultats certes prometteurs ont été obtenus (figure 4) mais les temps de calculs peuvent être longs et de nombreux détails doivent être fournis pour faire une prédiction significative. C'est pourquoi ce type d'outil n'est sans doute envisageable que pour la recherche.

Est-il dès lors possible d'implémenter les instabilités de combustion dans un outil phénoménologique comme EFFEX ? Une modification a été initiée afin de permettre une prise en compte de la modification de la flamme par son environnement en suivant l'esprit de MERLIN. On suppose que la trajectoire de la flamme est globalement isotrope (c'est une sphère) et on admet une variation du taux de combustion en chaque point de la surface en fonction

des conditions locales (turbulence, richesse, obstacle, paroi étanche...). Cela permet de conserver le principe analytique de la formulation d'origine, y compris pour l'écoulement. Un exemple est présenté sur la figure 5, qui décrit raisonnablement le contournement d'un gros obstacle sphérique à l'intérieur d'un cylindre (comparaison avec l'expérience). Cette nouvelle version s'appelle désormais EXPRES.

Conclusion

Ce projet a été consacré à la représentation physique de la propagation des flammes et à la simulation des effets de l'explosion. L'analyse des mécanismes d'accélération des flammes a fourni, outre des connaissances fondamentales nouvelles, un moyen d'investigation des forces et faiblesses des méthodes de simulation actuellement proposées. La force des méthodes numériques CFD est dans la finesse de la représentation de l'écoulement qui offre un moyen original d'analyse du comportement des flammes. Mais il n'est pas du tout évident que la modélisation de l'explosion soit fiable sauf si la propagation de la flamme est entièrement régie par la turbulence. Il n'existe pas de solution simple à cette difficulté même si une piste a été expérimentée. Il ressort que les méthodes phénoménologiques sont une voie crédible et un nouvel outil a été développé (EXPRES).

ABSTRACT

This project was led as a relatively wide forum devoted to the physical representation of the flames propagation and to simulation means of explosion effects. In addition to new fundamental knowledge, the analysis of flame acceleration mechanisms provided a mean of investigation of strengths and weaknesses of the simulation methods proposed at present. We showed that instabilities of the combustion are more a reaction of flames to their environment than to initial turbulence of the atmosphere except of course for dust flames (it cannot have a cloud without a significant preliminary level of turbulence). In the two cases, some adapted formulations were proposed and validated: Common Taylor model in the first case and Gülder model in the second one). Regarding simulation tools, the strength of CFD codes is clearly in the acuteness of the flow representation which provides a new mean of flames behavior analysis. However it is not at all obvious that the explosion modeling with CFD be reliable except possibly if the flame propagation is totally driven by the turbulence. There is still no solution to this difficulty even if an attempt was tried with the development by INERIS of a new code called MERLIN. It also appears that phenomenological models may be a credible alternative for the modeling of flame propagation. A large effort was devoted to this topic along the project and a new tool was developed (EXPRES).

Recherche partenariale avec Fike Corp., ICT, LCD

{ C. Proust }

Dans le cadre de cette recherche, on cherche à préciser les relations entre la turbulence et la combustion des nuages de poussières. On s'interroge à la fois sur la nature de la turbulence dans les nuages de poussières et sur ses effets au plan de la propagation de la flamme. L'objectif est de fournir une corrélation entre les caractéristiques de la turbulence, la vitesse de la flamme et les propriétés standard d'explosivité, sachant que la vitesse de la combustion est le paramètre clé pour décrire le déroulement et les effets d'une explosion ainsi que les moyens de mitigation. C'est un objectif essentiel de la modélisation des explosions de poussières identifié dans EXPRES. Des moyens relativement importants sont nécessaires pour y parvenir, ce qui justifie une action partenariale. Les aspects fondamentaux ont été traités à travers une collaboration plutôt académique afin de mettre en évidence les paramètres importants et les relations qu'ils entretiennent. L'un de ces paramètres est la vitesse de combustion turbulente qu'il est très difficile de mesurer de façon routinière, comme par exemple lors d'un essai standard d'explosivité en laboratoire. En collaboration avec la société FIKE, qui propose des solutions de mitigation dans le monde industriel, une relation supplémentaire entre l'un des paramètres d'explosivité standard et la vitesse de combustion turbulente a été recherchée. À cette occasion des techniques expérimentales tout à fait originales ont été développées.

La turbulence des nuages de poussières

Ces aspects ont été traités à travers une collaboration avec le CNES et le LCD [Bozier et Veyssière, 2005, 2006]. Un étudiant de thèse, un étudiant en post-doctorat et un étudiant

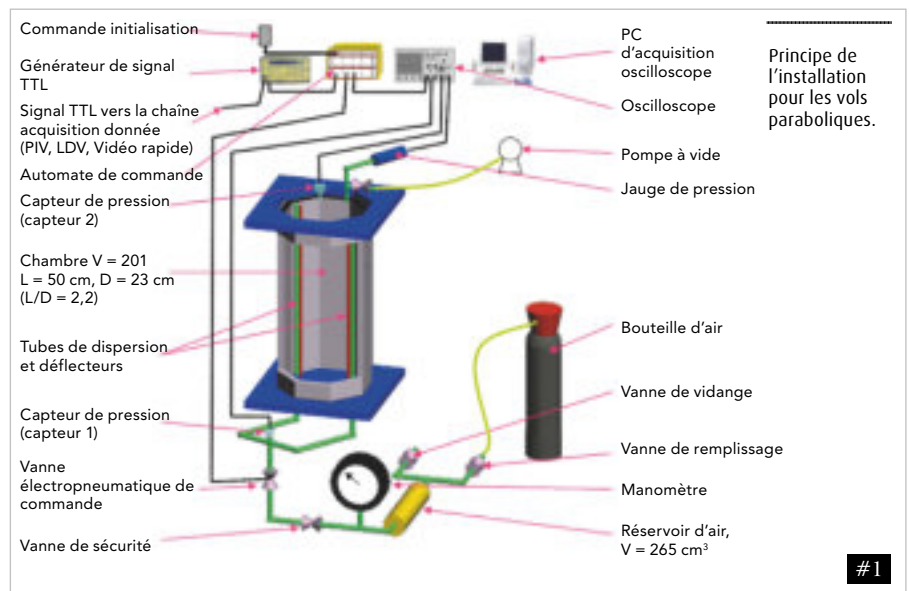
de Mastère ont travaillé sur ce sujet. En particulier, un nouveau concept expérimental a été mis au point pour la production d'une suspension air-particules dont on puisse maîtriser et mesurer les caractéristiques y compris les détails de l'aérodynamique (figure 1). C'est la première fois que l'on y parvient. Les expériences ont été réalisées au sol et en microgravité (vols paraboliques) ce qui permet de s'affranchir des difficultés associées à l'action des forces de pesanteur sur les particules (limitation du temps de présence des particules en suspension).

La chambre a un volume de 20 litres, transparente, pour étudier par PIV (Particle Image Velocimetry) et ADL (Anémométrie Doppler Laser) la dynamique du nuage de particules. Il est possible d'affirmer que dans une enceinte d'essai close, configuration habituellement retenue pour les mesures « d'explosivité »,

RÉFÉRENCES

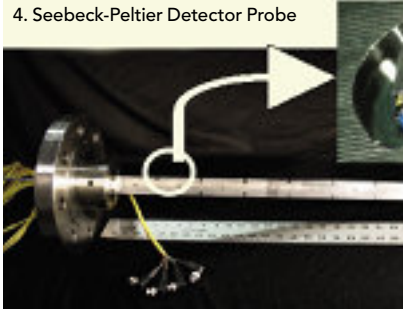
Bozier O., Veyssière B., 2005. *Influence de l'état initial sur les caractéristiques de combustion isochore d'une suspension de particules solides*, XVII^e Congrès Français de Mécanique, Troyes.

Bozier O., Veyssière B., 2006. *Étude des mécanismes de génération d'une suspension de particules solides dans une enceinte fermée*, Actes du 10^e Congrès francophone de techniques laser, Toulouse, pp 475-482, 2006.

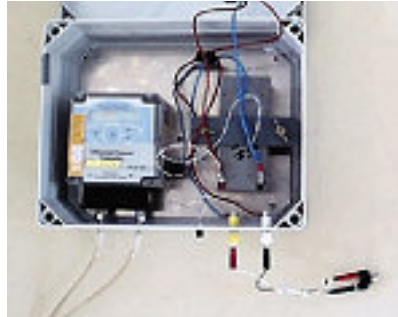


#1

4. Seebeck-Peltier Detector Probe



Sondes de détection de flamme (Fike)



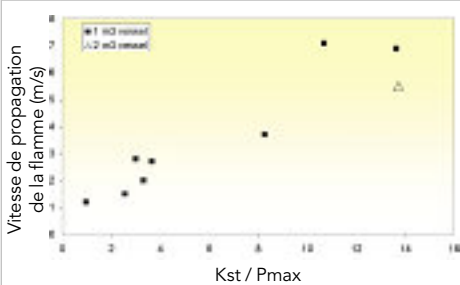
Sondes de turbulence



Opacimètre (concentration de poussières)

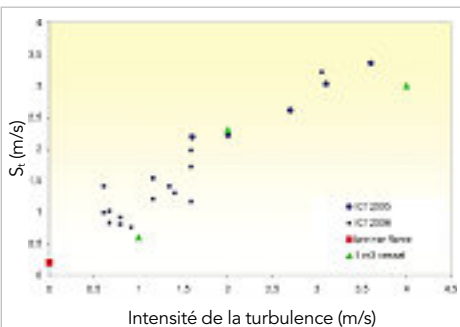
Sondes développées et utilisées dans ce projet.

#2



Relation entre les coefficients d'explosivité et la vitesse de propagation de la flamme pour plusieurs types de poussières.

#3



Évolution de la vitesse de combustion turbulente (S_t) en fonction de l'intensité de turbulence (u' : intensité de la turbulence) pour des nuages d'amidon et d'air.

#5

le processus de combustion est représentatif (c'est-à-dire que les résultats peuvent être transposés à une autre configuration) si l'intensité de la turbulence est suffisante (plus grande que 0,5 à 1 m/s) pour que la combustion soit adiabatique et si la dispersion des poussières dans la chambre est achevée au moment de l'amorçage. Il semble assez difficile de satisfaire ces critères dans une petite chambre d'explosion comme celle-ci, puisque le premier critère est satisfait si la combustion est achevée en moins de 500 ms depuis le début de la dispersion tandis que le second est atteint au-delà de 500 ms.

Ces éléments ont été considérés lors de l'interprétation des mesures « d'explosivité » standard [Proust *et al.*, 2007b ; Snoeys *et al.*, 2008]. On a effectivement montré que les mesures de violence d'explosion réalisées dans la « sphère » de 20 litres ne peuvent pas être corrélées au moyen d'une relation « raisonnable » avec celles obtenues avec un équipement de plus grandes dimensions.

Les relations entre la vitesse de la flamme et les paramètres d'explosivité

Il semble donc qu'il faille avoir recours à des chambres d'explosion plus grandes. Un examen du processus d'explosion dans les chambres de 1 m³ (ISO) de l'INERIS et de 2 m³ de FIKE Corp a fait l'objet d'une collaboration internationale (FIKE Europe, FIKE USA, INERIS). Pour mesurer les caractéristiques de la turbulence et du nuage de poussières (y compris pendant la propagation de la flamme si nécessaire), des sondes aérodynamiques spéciales (figure 2) et des opacimètres, conçus à l'INERIS,

ont été mis à disposition de FIKE Corp. À cette occasion, la société FIKE a mis au point une technique originale de détecteurs thermiques à effet Peltier (figure 4) qui semblent donner de bons résultats.

On a trouvé [Snoeys *et al.*, 2006, 2008] que les critères de « représentativité » issus des travaux du LCD sont satisfaits pour ces deux chambres : notamment l'intensité de turbulence est constante pendant la propagation de la flamme et de l'ordre de 2 m/s pour la chambre de 1 m³ et de plus de 0,5 m/s pour la chambre de 2 m³. L'échelle intégrale de la turbulence (taille caractéristique des tourbillons de l'écoulement) est de l'ordre de 5 cm dans les deux appareils. On a vérifié que le développement de la « boule de feu » dans la chambre peut être relié à l'augmentation de la pression par l'intermédiaire de la théorie des flammes sphériques confinées. Cela signifie que les coefficients d'explosivité « Kst » et « P_{max} » sont directement reliés à la vitesse de propagation de la flamme comme l'indiquent les essais (figure 3) et confirme la « représentativité » des coefficients mesurés dans ces conditions.

La turbulence et la vitesse de combustion

Il reste à préciser les aspects paramétriques de l'interaction turbulence-combustion, ce qui a fait l'objet d'une collaboration avec l'Institut allemand ICT, le LCD et FIKE.

Une installation spécifique a été conçue à cette fin à l'ICT à l'aide de l'expertise et de moyens de mesure de l'INERIS (figure 4). Il s'agit d'un tube vertical transparent de section carrée (30 cm x 30 cm), ouvert du côté de l'inflam-

RÉFÉRENCES

Bozier O., Veyssièrre B., 2005. *Influence de l'état initial sur les caractéristiques de combustion isochore d'une suspension de particules solides*, XVII^e Congrès Français de Mécanique, Troyes.

Bozier O., Veyssièrre B., 2006. *Étude des mécanismes de génération d'une suspension de particules solides dans une enceinte fermée*, Actes du 10^e Congrès francophone de techniques laser, Toulouse, p. 475-482, 2006.

Bozier O., Veyssièrre B., 2006. *Influence of Suspension Generation on Dust Explosion Parameters*, *Combustion, Science and Technology*, Vol. 178, n° 10-12, p. 1927-1955.

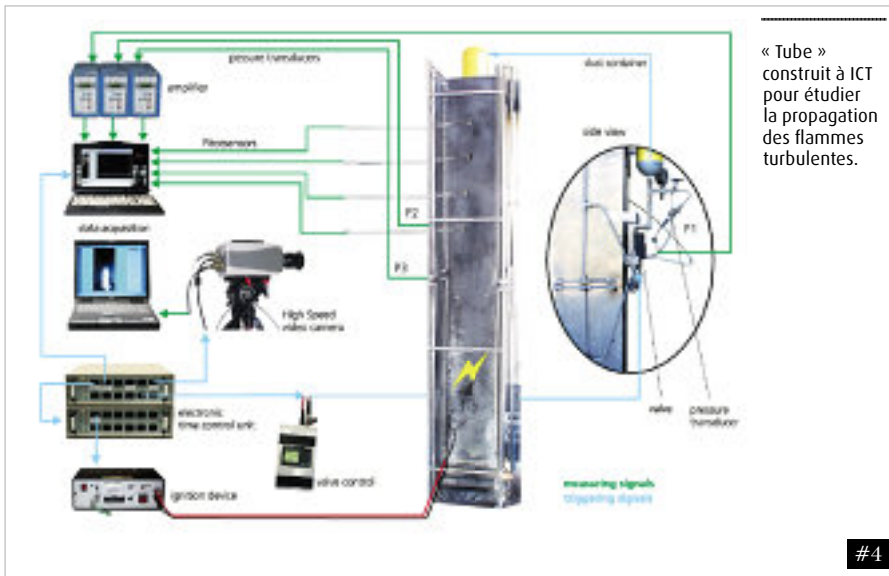
Proust C., Accorsi A., Dupont L., 2007b. *Measuring the violence of dust explosion with the "20 litre sphere" and with the standard "ISO 1 m³ vessel": systematic comparison and analysis of the discrepancies*. *J. Loss Prev*, vol. 20, p. 599-606.

Schneider H., Proust Ch., 2005. *Laminar and Turbulent Burning Velocities of Dust clouds*, Presented at the ESMG meeting, Nürnberg, 11-14 oct 2005.

Schneider H., Proust C., 2007. *Determination of turbulent burning velocities of dust air mixtures with the open tube method*. *J. Loss Prev*, vol. 20, p. 470-476.

Snoeys J., Proust C., Going J., 2006. *Experimental studies of turbulent flame speeds in dust clouds*, Communication to the 6th International symposium on hazards, prevention and mitigation of industrial explosions, 27 august - 1 september 2006, Halifax, Canada.

Snoeys J., Proust C., Going J., Farrell T., Vingerhoets J., 2008. *Experimental studies in turbulent flame speeds in dust clouds*. 8th HPMIE, St Petersburg, Russia, July 2008.



« Tube » construit à ICT pour étudier la propagation des flammes turbulentes.

mation (en bas) et fermé en haut (hauteur : 180 cm). Un dispositif de dispersion semblable à celui du LCD a été installé. Les caractéristiques de la turbulence ont été déterminées au moyen des sondes aérodynamiques décrites précédemment et le suivi de la flamme est réalisé au moyen d'une caméra vidéo rapide [Schneider et Proust, 2005, 2007]. L'intensité de la turbulence varie de 0,5 à 4 m/s et l'échelle intégrale est de l'ordre de 5 cm (comme pour les chambres d'explosion de 1 et 2 m³). Ces travaux ont, pour la première fois pour les

nuages de poussières, permis d'établir directement une relation (figure 5) entre l'intensité de la turbulence et la vitesse de consommation des réactifs de la flamme (c'est approximativement la vitesse de la flamme divisée par le taux d'expansion des produits de combustion). On a vérifié que, dans une chambre fermée, la combustion se développe de la même façon toutes choses égales par ailleurs (pour cela, les chambres ont été modifiées pour pouvoir y faire varier le degré de turbulence).

ABSTRACT

We have tried to specify connections between turbulence and combustion of dust clouds. We wondered about turbulence nature within dust clouds and about their effects on flames propagation. The aim is to supply a correlation between characteristics of the turbulence, speed of the flame and standard properties of the explosivity knowing that combustion speed is the key parameter to describe progress and effects of an explosion as well as mitigation means. This is an essential objective for modeling dust explosions identified within EXPRES. Quite significant means are necessary to reach there what justifies a partnership action. Fundamental aspects were realized through a rather academic collaboration so that significant parameters and their connections were identified. One of these parameters is the turbulent combustion speed which is very difficult to measure as a matter of routine, for example during a standard explosivity test in a laboratory. In association with FIKE, who proposes mitigation solutions in the industrial world, a supplementary connection between one of the parameters of standard explosivity and the turbulent combustion speed was searched. On that occasion, new experimental practices were developed.

Facteur humain



Stratégie de recherche

Le dernier inventaire des accidents technologiques publié par le BARPI indique qu'en 2008, 61 % des accidents avaient une cause organisationnelle ou humaine identifiée. Dans 45 % des cas c'est l'organisation elle-même qui est jugée défaillante, dans 21 % l'accident résulte d'un défaut de maîtrise du procédé par ses opérateurs. Le BARPI estime par ailleurs que les facteurs humains et organisationnels sont encore sous-évalués en tant que cause d'accident. Encore souvent, en effet, l'enquête post-accidentelle s'arrête à l'identification d'une cause technique, défaillance ou rupture d'un équipement, sans approfondir les causes profondes de cet événement qui peuvent être un défaut de conception, d'entretien ou une utilisation en dehors des spécifications initiales.

Face à cette prédominance des causes humaines et organisationnelles, la tentation est forte de développer des systèmes dans lesquels le rôle de l'humain serait extrêmement limité, des systèmes fortement automatisés, par exemple. L'expérience montre cependant que de tels systèmes s'insèrent toujours dans des organisations, qui sont en perpétuelle évolution. Ils sont, par exemple, vulnérables aux erreurs liées à la gestion des modifications techniques, aux défauts de maintenance. En cas de dysfonctionnement, les opérateurs peuvent être déroutés par le comportement d'un système avec lequel ils sont finalement peu familiers.

C'est donc bien dans l'organisation et les comportements individuels ou collectifs que des progrès sont à réaliser. Les besoins sont multiples : savoir évaluer l'efficacité des actions humaines et, plus largement, d'une organisation et prendre en compte les aspects humains et organisationnels dans l'analyse des risques, savoir définir et mettre en place une organisation fiable, savoir améliorer sa résilience, c'est-à-dire sa capacité à faire face à l'imprévu.

Les travaux présentés dans ce rapport scientifique portent sur le premier niveau, celui de l'évaluation. Dans

le cadre du projet DIRIS, il s'agissait de prendre en compte les facteurs humains et organisationnels dans l'estimation des risques en s'appuyant sur les réseaux bayésiens pour représenter l'influence que les facteurs organisationnels et d'environnement peuvent avoir sur les actions humaines et sur la probabilité d'occurrence d'événements accidentels. Le deuxième article, qui présente la méthode Oméga 20, porte sur l'évaluation des performances des barrières humaines de sécurité. Il s'agit de l'ensemble des actions qui sont prescrites pour réduire un risque ou rattraper une situation dangereuse. L'objectif est de pouvoir estimer le niveau de confiance de ces actions et leur efficacité en fonction du contexte afin de pouvoir les prendre en compte comme facteur de réduction du risque et évaluer ainsi si la maîtrise du risque est suffisante.

Les travaux de l'INERIS portent aussi depuis plusieurs années sur l'évaluation des performances des organisations en matière de sécurité et l'identification des caractéristiques des organisations qui contribuent à ces performances. Ces travaux doivent déboucher prochainement sur des méthodes opérationnelles pour l'évaluation des organisations adaptées aux installations industrielles dangereuses.

Ces travaux sont menés en partenariat avec des entreprises de l'industrie chimique et pharmaceutique, mais aussi avec des partenaires académiques et des réseaux d'expertise et de recherche tels que l'IMDR¹ ou l'ICSI². Ils le sont aussi dans le cadre de collaborations internationales, des projets européens de recherche, en particulier. Une approche partenariale soutenue par un consensus scientifique, est en effet essentielle sur ces questions particulièrement sensibles pour les entreprises, qui touchent au cœur même de leur organisation.

1 - IMDR : Institut pour la Maîtrise Des Risques.

2 - ICSI : Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle.

DIRIS : utilisation des diagrammes d'influence (réseaux bayésiens) dans l'analyse des risques pour les installations industrielles

{ R. Farret , J.-C. Le Coze }

Le programme de recherche DIRIS, mené en collaboration avec EDF R&D (Département maîtrise des risques industriels), a pour objectif principal de permettre une analyse de risques dite « transverse » d'un système industriel en incluant son environnement humain et organisationnel, en plus des facteurs techniques, via un « réseau bayésien ». Également appelés « diagrammes d'influence », les réseaux bayésiens sont des outils très intéressants à exploiter dans le cadre de l'analyse des risques, car ils peuvent représenter les relations de dépendance entre différents éléments ainsi que les probabilités associées, le tout via un support graphique. Ils permettent d'élargir la notion « d'arbre des défaillances » et d'estimer la probabilité d'occurrence de différents scénarios d'accidents tout en intégrant la complexité de l'ensemble du système industriel.

L'objet de notre programme de recherche est de prendre en compte des facteurs humains et organisationnels comme la gestion du REX (retour d'expérience), les stratégies de maintenance, la gestion des procédures. Les résultats obtenus sont d'une part la structuration conceptuelle du modèle, d'autre part l'application de l'outil bayésien sur un cas industriel.

Modèle conceptuel

Nous avons proposé un modèle générique structuré en trois niveaux principaux (illustration en figure 1, partie de gauche) :

- le niveau 1 est focalisé sur les éléments techniques, il s'agit d'un premier réseau

bayésien élaboré comme un diagramme en forme de « nœud papillon », représentant les scénarios accidentels possibles : un « arbre de défaillances » mène à un Événement redouté central (ERC), qui entraîne à son tour un « arbre d'événements » ;

- au niveau 2, les décisions et actions individuelles, dont l'efficacité produit des effets sur les événements au niveau 1, par exemple l'application d'une procédure d'urgence, ou une action de maintenance, qui auront une influence directe ou indirecte sur le bon fonctionnement d'une barrière de sécurité ;

- au niveau 3, les facteurs managériaux et organisationnels : ceux-ci traitent des processus relatifs à l'organisation, aux moyens qu'elle met en place ou aux contraintes qu'elle génère (exemple : formation, pression de production).

Sur la figure 1, dans la partie droite, au niveau 1 du modèle, les variables ou nœuds figurent les événements que l'on retrouve classiquement dans un nœud papillon : événements initiateurs (telles les défaillances techniques), et résultats des actions dues aux barrières de sécurité.

Au niveau 2, les Facteurs d'Efficacité des Actions Particulières (FEAP) regroupent l'ensemble des déterminants de l'efficacité d'une action humaine (ex : compétence des opérateurs, qualité des outils et aides disponibles, etc.). Ils sont spécifiques du « petit collectif de travail » : une équipe, ou un ensemble d'opérateurs agissant sur un

équipement précis. Ces FEAP sont en phase avec les récents développements au sein d'autres programmes à EDF comme à l'INERIS (MIRIAM/ATOS, référentiel Oméga 20).

Au niveau 3, les facteurs managériaux et organisationnels sont modélisés à l'aide de sept facteurs organisationnels pathogènes (FOP) proposés par EDF [Y. Dien, S. Pierlot], par exemple : la culture organisationnelle de sûreté, ou la pression de production. Ce seront les nœuds amont du réseau bayésien. Chaque FOP est « présent » ou « absent », avec une certaine probabilité de répartition entre ces deux états.

Lors de la déclinaison sous forme de réseau bayésien, le principe de base est la « dégradation » des probabilités au sein du réseau : lorsqu'une variable amont est à l'état négatif (ex. : facteur FOP « pression de production » présent) cela vient dégrader la probabilité de succès de la variable aval (ex. : niveau de formation satisfaisant), donc la probabilité de réussite de l'action sous-jacente (ex. : maintenance d'un capteur). L'INERIS a proposé des « coefficients de dégradation » génériques, en approfondissant le travail de la thèse de Aurélie Léger portant sur ce sujet et sur la formalisation unifiée des connaissances - thème encadrée par le CRAN, Centre de Recherche en Auto-

matique de Nancy, UMR 7039. Cela correspond au principe habituel de « décote » semi-quantifiée dans les études de dangers, mais en l'adaptant au réseau bayésien ainsi qu'aux actions humaines.

Étude de terrain et modélisation sous réseau bayésien

Une étude de terrain a été menée chez un industriel, en complément d'une étude de sécurité existante, sur un site de fabrication de matières plastiques (événement redouté : atmosphère explosive dans un silo de stockage). Elle a permis de légitimer la démarche en montrant sa faisabilité, de valider le protocole de terrain, et d'assurer le lien entre l'approche générique présentée plus haut et l'approche clinique au « cas par cas ». Plusieurs séries d'entretiens ont été menées, par binôme regroupant un expert en sciences organisationnelles et un expert en analyse des risques techniques. La figure 2 présente un extrait du modèle.

Le niveau de sécurité sur le site est globalement élevé, cependant le diagnostic organisationnel a décelé l'absence de réexamen des hypothèses de conception comme facteur organisationnel pathogène (FOP) possible ; or, cela est en concordance avec un autre constat sur un plan purement tech-

RÉFÉRENCES

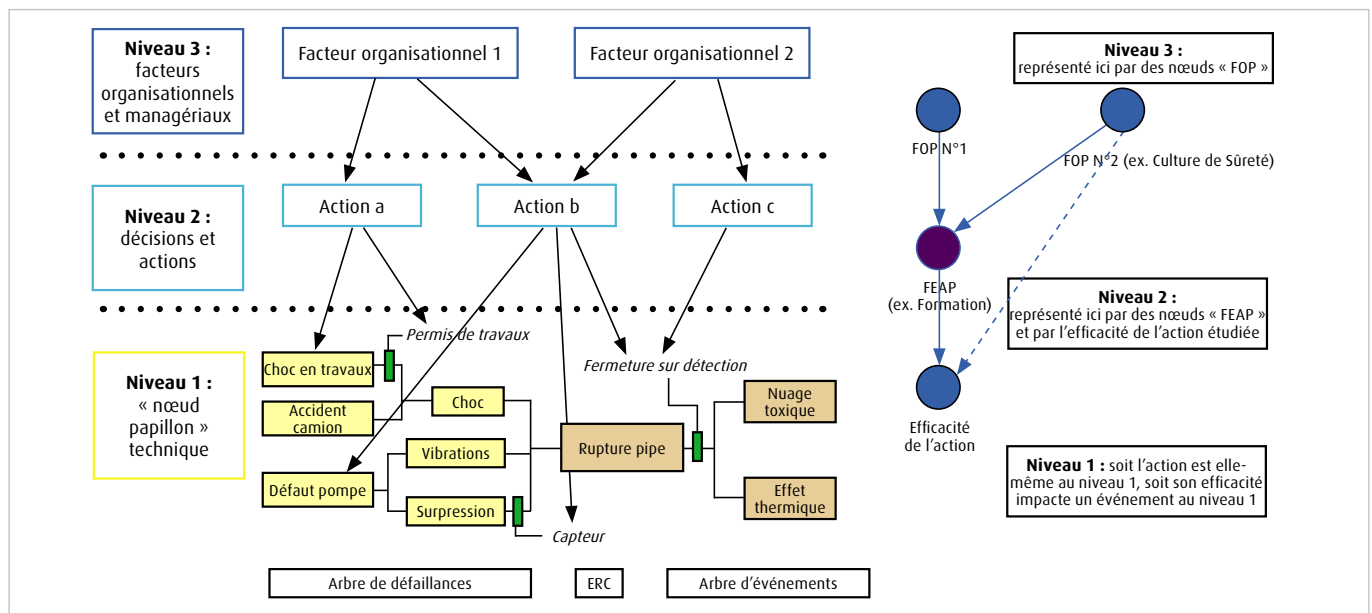
Farret R., Le Coze J-C., Merad M., Léger A., Duval C., 2006. Epistemological perspective of the modelling process of a system with technical and organisational dimensions, SRA Conference, Ljubljana, Slovénie.

Duval C., Léger A., Farret R., Weber Ph., 2007. Méthodologie d'analyse de risques pour les systèmes socio-techniques complexes et application à un cas industriel, Congrès lambda-mu 16 (IMdR).

Duval C., Léger A., Farret R., 2007. Choice of a risk analysis method for complex socio-technical systems. ESREL Conference 2007, Stavanger, Norvège.

Léger A., Levrat E., Weber Ph., Lung B., Duval C., Farret R., 2008. Methodology for a Probabilistic Risk Analysis of Socio-Technical Systems, INSIGHT Vol.11 Issue 3 (revue de l'INCOSE, International Council on Systems Engineering).

Léger A., Weber Ph., Levrat E., Duval C., Farret R., Lung B., Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems, soumis en novembre 2008 au Journal of Risk and Reliability (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O), accepté en juin 2009.



Modèle conceptuel en trois niveaux (à gauche) et variables correspondantes dans le réseau bayésien (à droite).
 ERC : événement redouté central.
 FOP : facteurs d'organisation pathogène.
 FEAP : facteurs d'efficacité des actions particulières.

Modèle sous réseau bayésien pour le cas d'un accident sur un silo industriel : zoom sur une action de maintenance et son influence sur une barrière, les facteurs influents (FOP et FEAP) sont en amont, les variables influencées en aval.



FOP : facteurs d'organisation pathogène.
FEAP : facteurs d'efficacité des actions particulières.

Parmi les FOP :

COS : Culture Organisationnelle de Sécurité.

PP : Pression de production.

AR : Absence de Réexamen des hypothèses de conception.

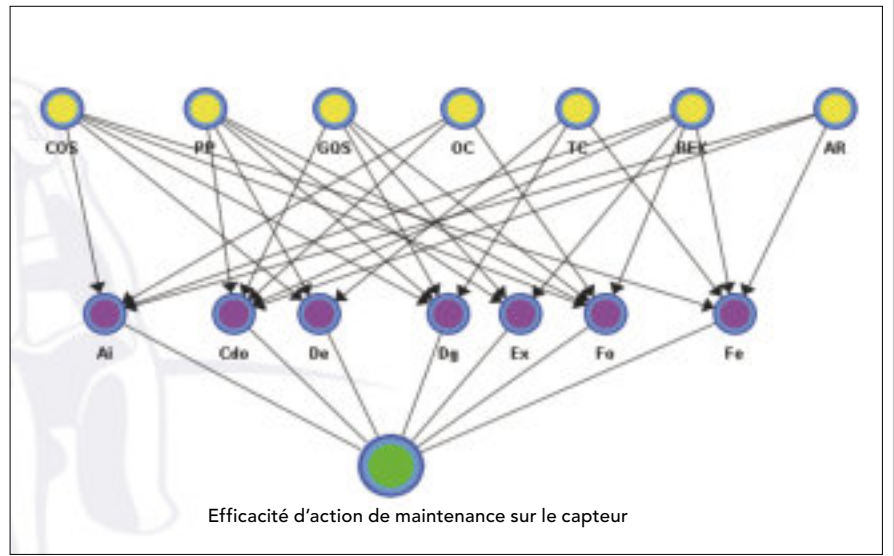
Parmi les FEAP :

Fo : Formation et compétence des opérateurs.

Ai : Qualité des outils et aides disponibles.

Cdo : Contrôle des actions et définition des objectifs.

#2



nique : la fiabilité de la barrière basée sur le capteur d'oxygène pourrait être augmentée, car bien que la redondance de la fonction de détection soit très bien assurée, la redondance du traitement des informations ne l'est pas. Enfin, en montrant en termes probabilistes l'influence des FOP, le modèle a montré les facteurs sur lesquels l'industriel peut agir, tel le besoin de maintenir le contrôle des actions par un tiers (service HSE).

Signalons enfin que l'étape « d'approbation » par l'industriel est importante avant de passer à l'étape de quantification. Une validation par rapport à la réalité serait ici impossible puisqu'on étudie des événements rares. Mais il s'agit de s'assurer que le système est bien compris et que le modèle est jugé adapté à l'objectif recherché.

ABSTRACT

Any industrial system is constrained by regular human interventions conditioned by organizational decisions, which must be taken into account by the risk analysis. The research led in the DIRIS project aims at developing a methodology, a tool and a «risk model» that can be adapted to case studies. Our work considers a probabilistic frame and focuses on the modeling of safety barriers, that are key elements including human and organizational influences. The «bayesian network» was chosen, because it combines the calculation of probabilities with event trees represented in a graphic manner. It integrates all the probabilistic links within the network, and deterministic links can be introduced. We defined a generic «risk model» composed of three levels: a technical level, a level of human actions, and an organizational level. The last one is represented through 7 «pathogenic organizational factors» (POFs), such as «weakness of control» or «production pressure». This model is then applied to a real industrial site, with the study of the explosion of a vessel. The probabilistic links between the variables are modified by quantitative degradation coefficients that take into account upstream influences. This industrial application offered the opportunity to develop bayesian networks as replicable tools, and proved the feasibility of the whole method.

La méthode Oméga 20 : vers une référence partagée pour la prise en compte de la fiabilité humaine dans les études de dangers

{ R. Périnet }

L'approche déterministe a longtemps prévalu parmi les approches mises en œuvre pour la maîtrise des risques industriels majeurs. La loi du 30 juillet 2003 (loi Bachelot) a introduit une nouvelle exigence en matière d'évaluation des risques. Cette loi impose aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation d'évaluer la probabilité d'occurrence des accidents susceptibles d'être générés par leurs installations, en évaluant la performance des barrières techniques et humaines mises en place pour prévenir l'occurrence de ces accidents. Cette évolution implique d'évaluer la fiabilité de certaines tâches humaines... pas si évident pour des non-spécialistes du domaine. D'autant que, pour de multiples raisons, souvent implicites, l'évaluation de la fiabilité humaine continue de « déranger ».

En effet, ce type d'évaluation suggère qu'il est possible de prédire le comportement humain, or beaucoup, considèrent, à tort, que les erreurs humaines sont imprévisibles. Ceux-ci estiment, en effet, que le comportement humain est trop complexe pour être modélisé. D'autres, au contraire, estiment que les erreurs humaines peuvent être anticipées mais que les probabilités sont inadaptées pour rendre compte des risques d'erreurs humaines. Ceux-ci considèrent, en effet, que l'appréciation de ces risques, compte tenu de la complexité des comportements humains, fait nécessairement appel au jugement subjectif et à des échelles qualitatives, peu compatibles avec les échelles utilisées dans le cadre des analyses de risques d'accidents majeurs.

Dans le domaine des installations classées, l'évaluation probabiliste de la fiabilité humaine est apparue, à l'instar des pratiques du domaine nucléaire, comme un moyen permettant d'améliorer la gestion des risques d'accidents majeurs. C'est dans ce contexte qu'a été développée la méthode Oméga 20 (référence 1) d'évaluation des Barrières humaines de sécurité (BHS).

Enjeux de la méthode Oméga 20

La méthode Oméga 20 a été développée dans le cadre d'un programme d'étude financé par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM). Elle est l'aboutissement d'un partenariat de recherche entre RHODIA et l'INERIS. C'est dans ce cadre que la méthode a fait l'objet d'expérimentations menées en 2007 visant à éprouver ses choix méthodologiques et consistant à évaluer une dizaine de barrières humaines (test d'étanchéité sur évaporateur avant remise en service, composante humaine d'une chaîne de sécurité visant l'isolement d'une fuite toxique sur détection de gaz : actionnement d'un bouton d'arrêt d'urgence sur alarme de détection gaz...). L'expérimentation, menée sur deux sites industriels différents, a été réalisée avec la participation, au sein d'un groupe de travail, des opérateurs et des responsables des activités en jeu dans les barrières humaines évaluées.

L'enjeu de l'Oméga 20 est de s'assurer que la barrière (ou tâche de sécurité) mise en place par l'exploitant répond bien à la fonction de sécurité requise dans l'étude de danger et

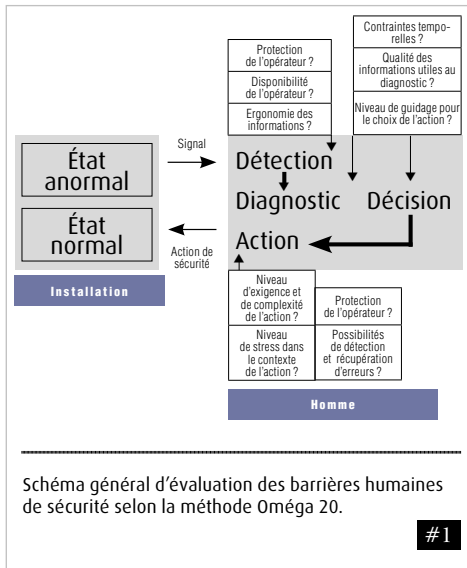
RÉFÉRENCES

Miché E., Prats F., Chaumette S., Le Coze J.C., Capo, S., 2006. *Formalisation du savoir et des outils dans le domaine des risques majeurs (DRA-35) - Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité - Ω 20*. Verneuil-en-Halatte : Institut de l'Environnement et des Risques Industriels. <http://www.ineris.fr>.

Ayrault N., Bonnet C., Faucher B., Bouchet S., 2005. *Évaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs (DRA-039) Ω - 10 - Évaluation des barrières techniques de sécurité*. Verneuil-en-Halatte : Institut de l'Environnement et des Risques Industriels. <http://www.ineris.fr>.

Périnet R., Miché E., Chaumette S., 2008. *Oméga 20 : vers une référence partagée pour l'évaluation des barrières humaines de sécurité*. Negroni P., Haradji Y. (Cord.). Actes du 43^e Congrès de la Société d'ergonomie de langue française, *Ergonomie et conception. Concevoir pour l'activité humaine*, 17-19 septembre 2008, Ajaccio. Lyon : ANACT, 2008, p. 535-542.

Périnet R., Miché E., 2008. *Évaluation des barrières humaines de sécurité : vers une méthodologie conciliant mieux les approches techniques et humaines*. IMDR. Actes du 16^e congrès de Maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement. *Les nouveaux défis de la maîtrise des risques*, 6-10 octobre 2008, Avignon.



que l'exploitant a prévu des moyens adéquats pour permettre aux agents en charge de cette fonction de la réaliser efficacement. La méthode Oméga 20 a été conçue pour répondre à cet enjeu d'évaluation. Or, en pratique, l'évaluation de la maîtrise des risques est assurée par des ingénieurs, qui, s'ils disposent, le plus souvent, de connaissances et d'outils adaptés pour prendre en compte les aspects techniques de la sécurité, se trouvent souvent démunis pour prendre en compte les facteurs humains dans l'analyse des risques et l'élaboration de leur architecture de sécurité, alors même que la plupart, et de plus en plus, conviennent de la nécessité de mieux prendre en compte ces aspects.

Principes de l'Oméga 20

L'INERIS s'est efforcé, par une approche structurée, de donner à ces ingénieurs un minimum de connaissances et de repères pour améliorer leurs pratiques d'étude des dangers. Par exemple, parmi les principes importants, la méthode Oméga 20 considère que la fiabilité humaine n'est pas réductible à la seule fiabilité du seul composant humain. La fiabilité humaine est en réalité celle de l'homme pris dans son environnement, par nature complexe (matériel, procédural, organisationnel, culturel...). La fiabilité humaine dépend de ces différents facteurs humains et environnementaux, de leurs complémentarités et de leurs influences sur les différents processus en jeu dans le travail des hommes (cognitif, physiologique...).

L'Oméga 20 propose d'évaluer les barrières humaines de sécurité (BHS) à partir d'un découpage *a priori* des tâches de sécurité en trois principales sous-tâches (détection, diagnostic et action) et, pour chacune d'elle, d'une évaluation de certains critères, tels que représentés dans le schéma suivant.

Partant d'un niveau de confiance de 2 de la barrière humaine (équivalent à une probabilité de défaillance à la demande comprise entre 10^{-3} et 10^{-2}), il s'agit, pour chaque sous-tâche de choisir le maintien de ce niveau de confiance ou sa décote (de -1 ou -2), si pour un critère donné, il apparaît que les conditions de réalisation de la barrière sont plus ou moins défavorables. À l'issue de l'évaluation, le niveau de confiance peut alors être de 2, 1 ou 0. L'exemple suivant illustre,

à partir d'un cas réel, les points à considérer pour aboutir à un niveau de confiance.

Principaux atouts de la méthode Oméga 20

Par conception, le cadre proposé par l'Oméga 20 présente de nombreuses similitudes avec la méthode Oméga 10 (référence 2) d'évaluation des Barrières techniques de sécurité, développée également par l'INERIS. L'Oméga 10 et l'Oméga 20 partagent notamment l'idée que les performances des barrières de sécurité sont étroitement liées au contexte réel de leur mise en œuvre. Autrement dit, il s'agit, à l'occasion de leur mise en œuvre de se préoccuper et de détecter des écarts, parfois importants, entre les conditions théoriques et les conditions effectives de réalisation de ces barrières. Ces similitudes entre ces méthodes permettent de conduire une évaluation la plus homogène possible des barrières techniques et humaines, en s'articulant bien, dans le cadre d'un groupe de travail, avec les démarches classiques d'analyse de risques. En outre, ces similitudes présentent un réel avantage sur le plan pédagogique, permettant de limiter le coût d'apprentissage de la méthode.

La méthode permet tout d'abord d'obtenir un résultat qui n'est pas forfaitaire (utilisation de bases de données) mais qui tient compte de la situation de travail réelle (nature de la tâche à réaliser, caractéristiques de l'environnement de travail), avec des ressources facilement mobilisables sur site (hommes, temps, compétences). Ensuite, les critères d'évaluation retenus permettent de détecter certaines anomalies, parfois importantes, pour la sécurité. Par exemple, un bouton d'arrêt d'urgence inaccessible en raison de la présence de fûts et de chariots élévateurs, des problèmes de compréhension trop importants entre les chauffeurs de camions et les agents chargés du dépotage, une alarme importante confinée dans un local jamais fréquenté par les agents, des arrangements passés entre opérateurs rendant inopérant un double contrôle, des espaces fumeurs trop éloignés de la salle de commande perturbant la surveillance des installations, un manomètre inaccessible situé à 4 mètres de hauteur, une jauge de contrôle jamais utilisée, un extincteur rendu inefficace par le froid occasionné par une aération, un

**Arrêt d'urgence du dépotage
en cas de fuite (gaz très inflammable)**



© Gilles Paire/Forolia

Quelle confiance accorder à cette barrière humaine ?

Exemple d'évaluation d'une barrière humaine de sécurité.

- Qu'est-ce que l'opérateur doit faire ? Qu'est-ce qui lui est demandé ? Comment s'y prend-t-il ?
- Indépendance ? Temps de réponse ? Formation ? Procédure ? Entraînement ? Protection de l'opérateur vis-à-vis du jet enflammé ?
- **Conditions dégradant la détection ?** Disponibilité de l'opérateur ? Est-il présent en permanence, a-t-il d'autres tâches à remplir pendant le dépotage ? → Décote ?
- **Conditions dégradant le diagnostic ?** Ambiguïté et accessibilité des signaux ou informations ? Connaissance, adéquation et disponibilité de la procédure ? → Décote ?
- **Conditions dégradant l'action :** Accessibilité et ergonomie du bouton d'arrêt d'urgence ? → Décote ?

→ Niveau de confiance =
2 - somme des décotes

#2

ABSTRACT

The law of July 30th, 2003 introduced a new requirement related to risks assessment. This law requires that hazardous industrial installations assess the probability of potential major accidents likely to be generated, by assessing the performance of the technical and human safety measures. This evolution implies an effort of homogenisation of the approaches used until now to assess the performances of the technical and human safety measures so that they eventually can be used to determine the probability of the potential accident. It is also the opportunity to simplify the existing methods and to make them more compatible with resources, workload and with engineers skills in charge of their application. In this context, INERIS has developed, in partnership with various manufacturers, two probabilistic methods aiming at assessing the technical and human safety measures :

« Omega 10 » for the technical safety measures and « Omega 20 » for the human safety measures. Being inspired by Omega 10, Omega 20 proposes a structured approach, articulating with classic risk analysis methods. Both are based on a set of criteria allowing to verify and to justify the performance of the human safety measures and if necessary to identify potential improvements for these measures. First elements of user feedbacks are encouraging. They show that the set of criteria allow to treat safety problems which would not have been managed and that the link between the technical measures and the human measures brings a real advantage from the educational point of view.

temps insuffisant laissé au gardien pour intervenir suite à un incendie...

La découverte et l'analyse de ces anomalies, mais aussi de ce qui fait la fiabilité des barrières humaines, est dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode, un réel avantage pour améliorer la maîtrise des risques d'accident majeur. En complément de l'objectif de quantification du risque, cette méthode apporte surtout une meilleure connaissance de l'activité humaine sur des situations de travail importantes pour la sécurité, mettant parfois à jour des pratiques de travail informelles dépassant la vision restreinte de « ce qui est écrit dans la procédure ». Au final, la méthode s'avère être un outil permettant d'identifier des actions d'amélioration des barrières (moyens d'actions, règles d'exploitation...), de valider un choix de conception ou comparer des choix de conception entre eux.

Les premiers éléments de retour d'expérience issus des formations et des expérimentations de l'Oméga 20 sont encourageants. D'abord, avec une centaine de téléchargements par mois sur le site de l'INERIS, la méthode Oméga 20 commence à être connue et utilisée, tant parmi les scientifiques que les industriels et bureaux d'étude. Une vingtaine de personnes (industriels et bureaux d'études) ont été formées par l'INERIS à son utilisation depuis 2007. La collecte de retour d'expérience auprès de ces utilisateurs montre que la méthode Oméga 20 ouvre un espace d'échange, jusqu'alors très restreint, sur les situations de travail. Focalisés principalement sur les

aspects techniques des installations, les industriels tendent désormais à s'accorder sur l'idée qu'une plus grande connaissance et qu'une plus grande maîtrise des activités humaines deviennent incontournables pour continuer à faire progresser la sécurité des installations.

Un club ouvert à tous les utilisateurs de la méthode sera prochainement mis en place afin de poursuivre l'analyse de ses avantages et de continuer à l'améliorer, notamment par la constitution d'un guide pratique d'utilisation et le développement de la formation existante.

Conclusion

En dépit des limites du modèle sous-jacent (faible prise en compte de certains aspects cognitifs et de l'organisation du travail) et de certains progrès possibles pour en améliorer l'utilisation, l'Oméga 20 présente l'avantage d'attirer l'attention sur des tâches sensibles vis-à-vis de la sécurité industrielle, de permettre une première évaluation des situations sensibles et d'offrir des possibilités de réinterroger les choix de conception des barrières humaines de sécurité. De la sorte, par le jeu de la comparaison entre les situations de travail telles qu'elles sont prévues et les situations de travail telles qu'elles sont réellement gérées, l'Oméga 20, complétée par l'intervention de spécialiste des facteurs humains et organisationnels, devrait aussi contribuer à provoquer une vision plus réaliste du travail des hommes, essentielle pour prendre des décisions adaptées en matière de gestion des risques.

Sécurité globale et malveillance



Stratégie de recherche

La sécurité globale est définie comme «la capacité d'assurer à une collectivité donnée et à ses membres un niveau suffisant de prévention et de protection contre les risques et les menaces de toutes natures et de tous impacts, d'où qu'ils viennent, dans des conditions qui favorisent le développement sans rupture de la vie et des activités collectives et individuelles¹».

En 2008, la parution du livre blanc sur la défense et la sécurité nationale a réaffirmé le besoin de disposer d'une stratégie et de moyens pour «parer aux risques et aux menaces susceptibles de porter atteinte à la vie de la nation. Les atteintes possibles à la vie du pays peuvent être la conséquence soit d'intentions hostiles – les menaces -, soit de ruptures accidentelles – les risques.»

Ce thème préoccupe également l'Europe qui a défini quatre grandes missions verticales de sécurité : la sécurité des frontières (terrestres et maritimes) ; la sécurité du citoyen (protection contre le terrorisme et le crime) ; la sécurité des infrastructures, des sites et des réseaux ; la gestion de crise, intervention et réparation.

Ainsi, la Commission européenne a lancé en 2007 la thématique de recherche «Security» dans le cadre du FP7. L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a lancé en 2006 l'appel à projets «Concepts, Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale (CSOSG)».

L'INERIS peut contribuer à une mise en cohérence des démarches de sécurité industrielle (évaluation et maîtrise des risques technologiques) et de sûreté (protection des sites contre les menaces de malveillance et de terrorisme) dans des conditions économiquement acceptables, source de synergies.

C'est pourquoi l'INERIS prend part à des projets et contrats pour la prise en compte de la malveillance sur les sites sensibles, lancés avec le cadrage de la Direction générale «Justice, Liberté, Sécurité» de la Commission européenne.

Ce rapport scientifique présente :

- une contribution sur les programmes européens SECURE-SITE et IMPROVE illustrant les résultats de travaux relatifs aux méthodes intégrées d'évaluation des risques et des menaces pour la protection des sites industriels ;
- les travaux réalisés dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique d'Aide à la Gestion des Crises (AGECRIS) ;
- une contribution sur le programme ANR REALEX sur les perspectives de la mise en réseau d'une expertise en temps réel pour la gestion des crises NRBCE (Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique et Explosifs).

1 - Définition de l'Institut National des Hautes Études de Sécurité (INHES).

Méthodes intégrées d'évaluation des risques et des menaces Programmes européens SECURE-SITE et IMPROVE

{ F. Fontaine, S. Lim, Thiébot }

RÉFÉRENCES

Fontaine F., Lim S., Vignon H., Debray B., 2007. *Protection des installations à risques et des infrastructures critiques contre les attentats et la malveillance : intégration de l'évaluation de la menace à l'analyse et à la maîtrise des risques industriels* - 1^{er} congrès cindyniques-Institut pour la Maîtrise des Risques-Paris, 13-14 décembre 2007.

Dechy N., Lim S., Vignon H., Fontaine F., 2007. *Utilisation du retour d'expérience pour l'analyse de la menace et la gestion de crise d'événements impliquant des enjeux NRBC* - 1^{er} congrès cindyniques-Institut pour la Maîtrise des Risques-Paris, 13-14 décembre 2007.

NOTES

(1) CEFIC : Conseil Européen de l'Industrie Chimique.

(2) CCPS : Center of Chemical Process Safety.

Suite aux attaques terroristes aux États-Unis, le Conseil européen a demandé à la Commission d'élaborer une stratégie globale de renforcement de la protection des infrastructures critiques, définies comme les actifs, les systèmes qui sont indispensables au maintien des fonctions sociétales critiques : la chaîne d'approvisionnement, la santé, la sécurité. En réponse, la Commission a transmis, le 22 octobre 2004, une communication intitulée « Protection des infrastructures critiques dans le cadre de la lutte contre le terrorisme », dans laquelle elle propose des mesures en vue de renforcer la prévention, la préparation et la réponse de l'UE face aux attaques terroristes contre des infrastructures critiques.

Le projet de la Commission de proposer un programme européen de protection des infrastructures critiques (EPCIP) et un réseau d'alerte concernant les infrastructures critiques (CIWIN) a été accepté lors du Conseil européen des 16 et 17 décembre 2004.

Ainsi, la DG JLS (Direction Générale Justice, Liberté et Sécurité) adopte depuis 2004, un programme annuel de travail, détaillant les objectifs spécifiques et les thématiques prioritaires sur le thème de la sûreté et de la protection des infrastructures critiques.

Enjeux et objectifs des projets SECURE-SITE et IMPROVE

Parmi les secteurs considérés comme critiques au niveau européen figure l'industrie chimique. C'est dans ce cadre qu'ont été proposés, suite à l'appel à propositions

2005/2006 puis suite à l'appel à propositions 2008 de la Direction Générale Justice, Libertés et Sécurité (DG JLS), les projets SECURE-SITE puis IMPROVE.

Le projet SECURE-SITE, coordonné par l'INERIS, avait pour objectif d'élaborer une méthodologie d'identification de la vulnérabilité des sites chimiques, et plus particulièrement des établissements SEVESO, face aux menaces de malveillance et de terrorisme en intégrant les approches de sécurité et de sûreté et de proposer des recommandations pour l'amélioration de la protection des installations industrielles. Le projet a duré un an, de décembre 2006 à novembre 2007.

Dans son prolongement, le projet IMPROVE, d'une durée de 18 mois, et coordonné par le CEFIC⁽¹⁾, a pour objectif de proposer une méthodologie d'analyse de la vulnérabilité des sites chimiques adaptée au contexte européen sur la base des résultats du projet SECURE-SITE. Cette méthodologie permettra de soumettre une trame pour un Plan Sûreté Opérateur (PSO) requis au niveau européen. Le projet IMPROVE vise également à mettre à jour la base de données relative aux réglementations en vigueur en Europe portant sur la sécurité et la sûreté.

Des études de cas, sur des sites industriels européens, ont été réalisées pour améliorer et valider les principes de la méthodologie d'analyse de la sûreté.

Ces deux projets ont associé, outre l'INERIS et le CEFIC, plusieurs partenaires européens, à savoir le JRC d'Ispra (European Commission

Joint Research Center) en Italie, le gouvernement régional de Styrie (Autriche), le FOI (agence de recherche sur la défense) en Suède, le NAVI (agence de sûreté) aux Pays-Bas, l'Université d'Ostrava en République tchèque et Eu.select, un consultant allemand basé en Belgique spécialisé dans l'industrie chimique.

Méthodologie d'analyse de la vulnérabilité des installations industrielles adaptée au contexte européen

L'analyse de sûreté a pour objectif d'identifier les biens critiques dans une infrastructure critique ainsi que les menaces plausibles (malveillance et terrorisme) qui pourraient affecter ces biens et d'évaluer les contremesures à mettre en place afin de protéger le public, l'environnement, l'établissement ou les intérêts nationaux.

Une comparaison de plusieurs méthodologies d'analyse de la vulnérabilité a été menée dans des domaines aussi divers que le secteur nucléaire, le domaine des transports de marchandises dangereuses ou le secteur industriel et chimique. Cette démarche a conduit à sélectionner puis tester et adapter la méthodologie américaine développée par le CCPS⁽²⁾ dans la mesure où elle intègre des approches d'évaluation similaires à celles employées dans l'évaluation des risques liés à la sécurité en Europe.

En effet, l'analyse de la sûreté ne doit pas, dans la mesure du possible, s'ajouter comme une nouvelle étude à celles déjà réalisées par les industriels. Cette analyse de la sûreté doit s'appuyer sur les pratiques existantes dans le domaine de la sécurité industrielle et notamment sur l'application de la Directive Seveso II et ses transpositions au niveau national par les différents États membres. De ce point de vue, la méthodologie du CCPS est apparue comme la plus pertinente du fait, entre autres, de sa démarche d'analyse systématique.

Toutefois, il s'est avéré nécessaire d'adapter cette méthodologie au contexte européen. La méthodologie d'analyse de la sûreté comprend des phases similaires à celle d'une étude de dangers. La différence essentielle réside dans l'analyse des menaces

qui a pour objectif d'identifier des scénarios pertinents d'actes intentionnels sur le site étudié.

Les différentes études de cas des projets SECURE-SITE et IMPROVE ont permis de valider et d'améliorer la méthode élaborée. Les données d'entrée nécessaires à la réalisation des différentes étapes de la méthodologie ont pu être mieux cernées ; les paramètres d'identification et d'évaluation des biens critiques ont été raffinés ainsi que ceux définissant la vraisemblance des actes intentionnels. Un tableau d'analyse des risques liés à la sûreté a été établi avec la matrice des risques associée.

Pour les sites industriels participant à ces projets, cela a été l'occasion de mettre en lumière les forces et faiblesses de leurs sites en termes de maîtrise des risques liés aux actes intentionnels et d'anticiper la réflexion sur le Plan Sûreté Opérateur (PSO) qui sera exigé de la part des opérateurs d'infrastructures critiques.

Ce travail permettra de mettre en lumière les bonnes pratiques en matière de sûreté en comblant les lacunes à un coût économiquement raisonnable pour les industriels. Toutefois, des antagonismes entre sécurité et sûreté sur des thèmes, tels que la diffusion d'information au public, restent à lever. En effet, les pratiques de sécurité industrielles amènent à informer la population sur les risques de l'installation alors que, du point de vue de la sûreté, ces informations pourraient être utilisées pour une action terroriste. Des mesures générales pour l'amélioration de la sûreté, telles que la mise en place d'une politique de sûreté, la formation et la sensibilisation du personnel ou le principe de « Dissuader, Détecter, Retarder » ont été proposées.

Au terme du projet IMPROVE, un Guide d'utilisateur et une « boîte à outils » pour les opérateurs (dont un modèle pour un PSO) seront mis à disposition des opérateurs qui auront été désignés en Europe comme opérateur d'infrastructure critique mais également des officiers de liaison sûreté et des autorités compétentes.

ABSTRACT

Terrorist acts perpetrated in the United States and then in Europe led the European Commission to propose a European Programme for Critical Infrastructure Protection (EPCIP) and a Critical Infrastructure Warning Information Network (CIWIN) in 2004. Consequently, the Commission proposes in the framework of a specific five-year programme the specific objectives and thematic priorities on security and the protection of critical infrastructures. The chemical sites were identified among critical infrastructures as hazardous substances are stored, produced and handled, which can lead to not only human and material damage but also to fear and loss of confidence within the public with regard to chemical industry. In this context that the SECURE-SITE (2006-2007), coordinated by INERIS and then IMPROVE (2008-2010), coordinated by the CEFIC were proposed. These projects gather several European partners (Belgium, France, Germany, Netherlands, Austria, Sweden, Italy and Czech Republic) from different background: public institutions, a professional federation, a university and the private sector. IMPROVE aims at providing a methodology for vulnerability analysis of chemical sites and integrating safety and security approaches, based on the results from the SECURE-SITE project and on the existing European regulations (like the Seveso II Directive). A review of the European regulations related to safety and security was performed across the Member States.

Le Groupement scientifique AGECRIS

En mai 2004, est créé le Groupement d'Intérêt Scientifique d'Aide à la Gestion des Crises (GIS AGECRIS), qui associe l'INERIS, expert en sécurité industrielle, l'École des mines d'Alès pour ses compétences en recherche appliquée, et l'ENSOSP, l'École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs-pompiers, représentant de la gestion opérationnelle des services de secours. En 2005, l'INHES, Institut National des Hautes Études de sécurité rejoint ce groupement. Sa création permet de développer dans le domaine des risques technologiques, naturels et émergents, une approche intégrée associant l'identification, l'analyse, la gestion, l'organisation des

secours en cas de sinistre ainsi que l'aide à la décision pour les gestionnaires de crise de protection civile.

Le GIS AGECRIS a pour ambition de conduire, élaborer et coordonner des programmes de recherche et de développement, au niveau national et international entre les quatre membres.

Ces derniers se sont donné pour objectif d'améliorer la connaissance de l'action publique et de la demande industrielle et sociétale dans le domaine de la gestion des crises nécessitant la mise en œuvre de moyens de secours (évaluation des conséquences, moyens à mettre en œuvre, limitations des effets...).

La recherche menée au sein du GIS AGECRIS, à la fois théorique et pratique, s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire alliant les sciences humaines et sociales, les sciences de gestion et les sciences de l'ingénieur.

Depuis 2004, deux thèses ont été réalisées dans le cadre du GIS. La première porte sur l'utilisation des données opérationnelles pour l'aide à la décision en situation accidentelle, la seconde sur l'aide à la décision pour la gestion des crises de grande ampleur.

Parmi les projets de recherche significatifs conduits par le GIS, signalons le projet européen Mitra, et plus récemment le projet ANR REALEX (*voir article suivant*).

L'INERIS au cœur des réseaux

En ce qui concerne les Secteurs d'Activités d'Importance Vitale (SAIV), l'INERIS a mis en place, dans le cadre du Groupe Thématique National sur la Sécurité (GTN), un sous-groupe sur les besoins en recherche liés à la protection des infrastructures critiques.

Le groupe de travail constitué de l'INERIS, de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), du CEA, d'AREVA,

UTILISATION DES DONNÉES OPÉRATIONNELLES POUR L'AIDE À LA DÉCISION EN SITUATION ACCIDENTELLE (Cyrille BRONNER)

Lors d'un accident majeur d'origine chimique, les sapeurs-pompiers et les experts des cellules d'appui doivent faire face à des phénomènes complexes (explosions, dispersions de produits toxiques) et ne disposent souvent que d'éléments incertains et imprécis, rendant difficile le diagnostic de la situation. Dans les premiers instants qui constituent la phase d'urgence, la « source » d'émission du flux dangereux est souvent mal connue mais elle est pourtant indispensable pour avoir une vision globale de l'événement et prendre les décisions visant à limiter les conséquences.

Dans le cadre du GIS AGECRIS, l'INERIS et l'École des mines d'Alès ont mis en place un programme de recherche et une thèse dont l'objectif était de développer des méthodologies et des outils d'aide à la décision destinés aux primo-intervenants des situations d'urgence d'origine chimique. Ces outils doivent permettre, à partir de l'exploitation des données opérationnelles, d'accéder d'une part à la nature d'une substance *a priori* inconnue, d'autre part au « terme source » impliqué, c'est-à-dire ce qui caractérise le rejet de la substance dans l'atmosphère (débit, température, quantité).

Pour identifier une substance inconnue ou tout au moins les dangers qu'elle présente, l'approche a consisté à utiliser les données descriptives et les symptômes recueillis *in situ*. Un logiciel a été développé pour faciliter l'exploitation de ces données opérationnelles en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision inhérentes à ces données, notamment à l'aide de la théorie des probabilités.

L'évaluation des conséquences requiert, en plus de la nature de la substance impliquée, la connaissance précise du « terme source ». Aussi, une méthode inverse a été proposée afin d'évaluer le terme source à partir des conséquences observées et/ou mesurées (surpressions, concentrations). Elle consiste en l'utilisation d'un algorithme générique couplé à un modèle de calcul de flux.

de la DGA (Délégation Générale pour l'Armement) et de l'UTT (Université de Technologie de Troyes), auxquels ont été associés des industriels de la chimie ainsi que des opérateurs de transport et du secteur de l'énergie, a rendu ses conclusions en juin 2009.

Elles seront intégrées à l'agenda stratégique de la recherche sur la sécurité et communiquées à la Commission européenne.



Accident de Génolhac, (Gard, 2004).

© 5015 370

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES CRISES DE GRANDE AMPLIEUR : CONNAISSANCE ET AIDE À LA DÉCISION POUR LA SÉCURITÉ CIVILE (Carole DAUTUN)

Face à l'augmentation du nombre de catastrophes et de crises de type naturel, industriel ou intentionnel, les organisations gestionnaires doivent renforcer leurs pratiques afin d'augmenter leur résilience. Dans le cadre du GIS AGEGRIS, un programme de recherche et une thèse sur le sujet ont été réalisés. Les objectifs étaient d'une part, d'améliorer la connaissance sur les situations de crise et d'autre part, de développer une méthode d'aide à la décision à l'attention des acteurs de la sécurité civile afin d'anticiper et gérer une crise de grande ampleur. La démarche était structurée en trois parties. La première était axée sur l'amélioration de la connaissance de ces situations en se basant à la fois sur des observations de terrain et des retours d'expérience, ainsi qu'un état de l'art bibliographique. La seconde partie a conduit à proposer une définition de la crise de grande ampleur et une modélisation systémique du processus conduisant à l'émergence de ces situations extrêmes. Elle a également posé les bases théoriques de la méthode de veille stratégique du territoire en s'appuyant sur deux outils d'aide à la décision que sont la méthode de décision multicritère de Saaty et les réseaux de neurones de type « classifieur ». Par le biais de cette méthode, les gestionnaires de crise pourront qualifier la situation en présence soit d'incident, soit d'accident majeur, soit de crise conventionnelle ou bien de crise de grande ampleur. Enfin, la troisième partie était consacrée à l'application et la démonstration de la faisabilité des deux méthodes définies précédemment afin d'établir le potentiel de crise de dix-huit retours d'expérience.

Introduction de la thèse téléchargeable sur le site de l'INHES :

http://www.inhes.interieur.gouv.fr/contribution_a_l_etude_des_crisis_de_grande_ampleur-h211a464.html.

RÉFÉRENCES

- Bronner C., Bony-Dandrieux A., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., 2007. *Utilisation d'algorithmes génétiques pour l'évaluation du terme source : Application aux phénomènes d'explosion*, WISG, Workshop Interdisciplinaire sur la sécurité globale, 30-31 janvier 2007.
- Bronner C., Bony-Dandrieux A., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., *Utilisation des données opérationnelles pour l'aide à la décision en situation accidentelle*, Journée des doctorants, INERIS, 23 novembre 2005.
- Dautun C., Tixier J., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., 2005. *Contribution à l'étude des crises de grande ampleur*, 4^e Colloque international en gestion des risques, 22 et 23 novembre 2005, Québec, Canada.
- Dautun C., Tixier J., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., 2006. *Traitement de l'incertitude en gestion de crise au travers de la mise en place d'une veille stratégique du territoire*, Lambdaµ 15 Risques et Performances, Lille, 10-12 octobre 2006.
- Dautun C., Bronner C., Dandrieux A., Tixier J., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., (2007). *Situations de crise, 1 et 2 - Préventique Sécurité* 91 : 39-42, 92 : 40-43.
- Dautun C., Tixier J., Chapelain J., Fontaine F., Dusserre G., 2007. *Crisis management: Improvement of knowledge and development of a decision aid process*, Loss prevention Conference, Edinburg, UK.

Programme REALEX

Évaluation des risques et expertise en temps réel pour la gestion des crises NRBCE

{ F. Fontaine }



© S015 79

Accident de Limalonges (Deux-Sèvres, 2008).

L'INERIS coordonne le projet REALEX, parmi les premiers projets dédiés à la « sûreté » des installations industrielles. Le terme « sûreté » désigne ici l'évaluation et la maîtrise des risques liés à la malveillance et au terrorisme.

REALEX a été retenu par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) à l'appel « Concept, Systèmes et Outils pour la Sécurité Globale » (CSOSG) lancé en juin 2006. C'est l'un des projets menés par le GIS AGEGRIS.

Il regroupe des centres d'études et de recherches (CEA, École des mines d'Alès, Fondation de la Recherche stratégique, Institut national des hautes études de sécurité, INERIS, École nationale supérieure des officiers de sapeurs-pompiers) et des entités industrielles (THALES, Port Autonome de Marseille).

Il associe dans un comité de suivi, les prescripteurs, ministères chargés de l'Environnement et du Transport, de l'Intérieur, de la Défense, Hauts Fonctionnaires de Défense et de Sécurité ainsi que les services de réponse opérationnelle.

Ce projet correspond à des préoccupations sociétales croissantes : depuis dix ans, les actes de vandalisme, de malveillance et de terrorisme contre des installations à hauts risques se multiplient. Ces lieux sont aussi des sources potentielles d'approvisionnement en précurseurs d'engins explosifs ou chimiques improvisés (EI/EI) ou en substances utilisables lors d'attentats (ex. dispersion toxique dans un métro).

Au regard de ces nouvelles menaces, le projet REALEX poursuit deux objectifs :

- compléter l'évaluation des risques menée en sécurité industrielle par une évaluation de la vulnérabilité des installations aux actes délibérés et en assurer la prévention ; à cet effet, la démarche ARAMIS⁽¹⁾ a été retenue ;
- au-delà de la prévention, mieux caractériser la situation pour le dimensionnement de la réponse face à l'imminence d'un événement ou juste après son occurrence. À ce titre, le projet REALEX réserve une part importante à la mise en place d'une expertise Nucléaire, Radiologique, Biologique, Chimique, et sur les Explosifs (NRBCE) mobilisable 24 h/24 en cas d'attentats ou d'accidents. L'organisation et le recours en temps réel à un appui technique et scientifique (expertise pluridisciplinaire) contribueront à l'aide à la décision des gestionnaires de crise à caractère NRBCE.

Contenu du projet REALEX

Le projet est articulé autour de trois types de tâches.

Tout d'abord des tâches transversales :

- l'analyse et la formalisation des connaissances des domaines des risques et des menaces NRBCE afin d'en partager une compréhension commune, compte-tenu de la variété des partenaires du projet REALEX. Dans le cadre du projet REALEX, les efforts ont été concentrés sur le développement d'un outil d'enrichissement de l'ontologie⁽²⁾ de la sûreté et de la sécurité dont l'objectif est d'apporter

NOTES

(1) ARAMIS : Accidental Risk Assessment Methodology for Industries.

(2) Une ontologie est un système conceptuel qui détermine des concepts et les articule entre eux.

un support aux acteurs dans l'analyse et la détection d'un contexte favorable à la survenue d'événements non souhaités d'origine malveillante. Cet outil a vocation à évoluer vers un outil de veille automatique dans une phase postérieure au projet afin de cibler les informations relatives à une activité industrielle ou bien à une société par exemple ;

- l'élaboration d'un retour d'expérience (REX) en matière de *modus operandi* employés pour des attentats radiologiques, biologiques et chimiques et de gestion des crises NRBCE, pour établir des scénarios pertinents de menaces et caractériser les situations de crise auxquelles devront faire face les décideurs ;
- l'expression de besoins des gestionnaires de crise en la matière : cette tâche s'est largement appuyée sur le travail réalisé par le GIS-AGECRIS sur la gestion des crises de grande ampleur.

Ensuite ont été menées des tâches de définition d'un référentiel d'expertise avec :

- une méthode d'analyse des risques liés à la sûreté à partir d'une méthode d'analyse des risques liés à la sécurité industrielle (ARAMIS), l'objectif étant d'aider les exploitants à définir les moyens à déployer pour assurer la sûreté de leur site. Ainsi ont été proposées des représentations d'événements génériques relatifs à la sûreté en identifiant à la fois les causes et les conséquences potentielles de ces événements, par l'intermédiaire de représentations en nœud papillon et en y associant une matrice de criticité. Une étude de cas, réalisée au Port Autonome de Marseille, a permis de tester la méthode d'évaluation globale des risques et des menaces. Un outil de réalité virtuelle a été développé aux fins de tests et d'exercice ;

- l'architecture d'un réseau d'expertise NRBCE en temps réel à laquelle a été associée une feuille de route pour sa réalisation. Un premier maillage des structures susceptibles d'apporter une aide à la décision aux gestionnaires des crises à caractères NRBCE a été proposé.

Cette opération abordait donc successivement : l'organisation du système (prescripteurs, utilisateurs, processus d'échange et de collaboration...), la structuration et organisation de la connaissance sur les risques NRBCE, les fonctionnalités ou services attendus en termes d'applications et de flux d'in-

formations, la technique : vue d'ensemble du système en termes d'implémentation de ses composants de sûreté, d'interopérabilité et de qualité de service.

Premières conclusions

Le projet REALEX a permis de développer une méthodologie pour l'évaluation des menaces et vulnérabilités des installations industrielles, des outils de veille qui permettront d'alerter sur la sensibilité des situations dangereuses et de détecter des événements précurseurs, et un réseau d'expertise et de support aux gestionnaires de crises NRBCE. Concernant l'organisation d'une expertise maillée NRBCE en temps réel, le projet a été bien accueilli par les autorités, membres du Comité de suivi de REALEX. Il convient maintenant de préciser de manière très pragmatique le mode de saisine de ce réseau d'organismes d'expertise.

RÉFÉRENCES

Fontaine F., 2007. *Realex – Évaluation des risques et de la menace, analyse de situation et expertise en temps réel pour la gestion des crises NRBCE*, Workshop International sur la sécurité globale, Troyes 31 janvier 2007.

Dechy N., Lim S., Fontaine F., 2008. *Retour d'expérience sur les agressions ayant affecté des installations industrielles et impliquant des enjeux NRBCE* - Workshop International sur la sécurité globale, Troyes 29 janvier 2008.

Salvi O., Fontaine F., Debray B., *Adaptation of the ARAMIS methodology to integrate the security of hazardous installations and critical infrastructures. Abstracts book of the 15th annual conference SRA-Europe Innovation and technical progress: benefit without risk?* 11-13 septembre 2006, Ljubljana, Slovenia, p.20.

ABSTRACT

INERIS is coordinating one of the first projects dedicated to the security of industrial installations against threats of terrorism and malevolent acts.

REALEX involved researches centers and industrial companies and was followed by a steering committee composed of French Ministries.

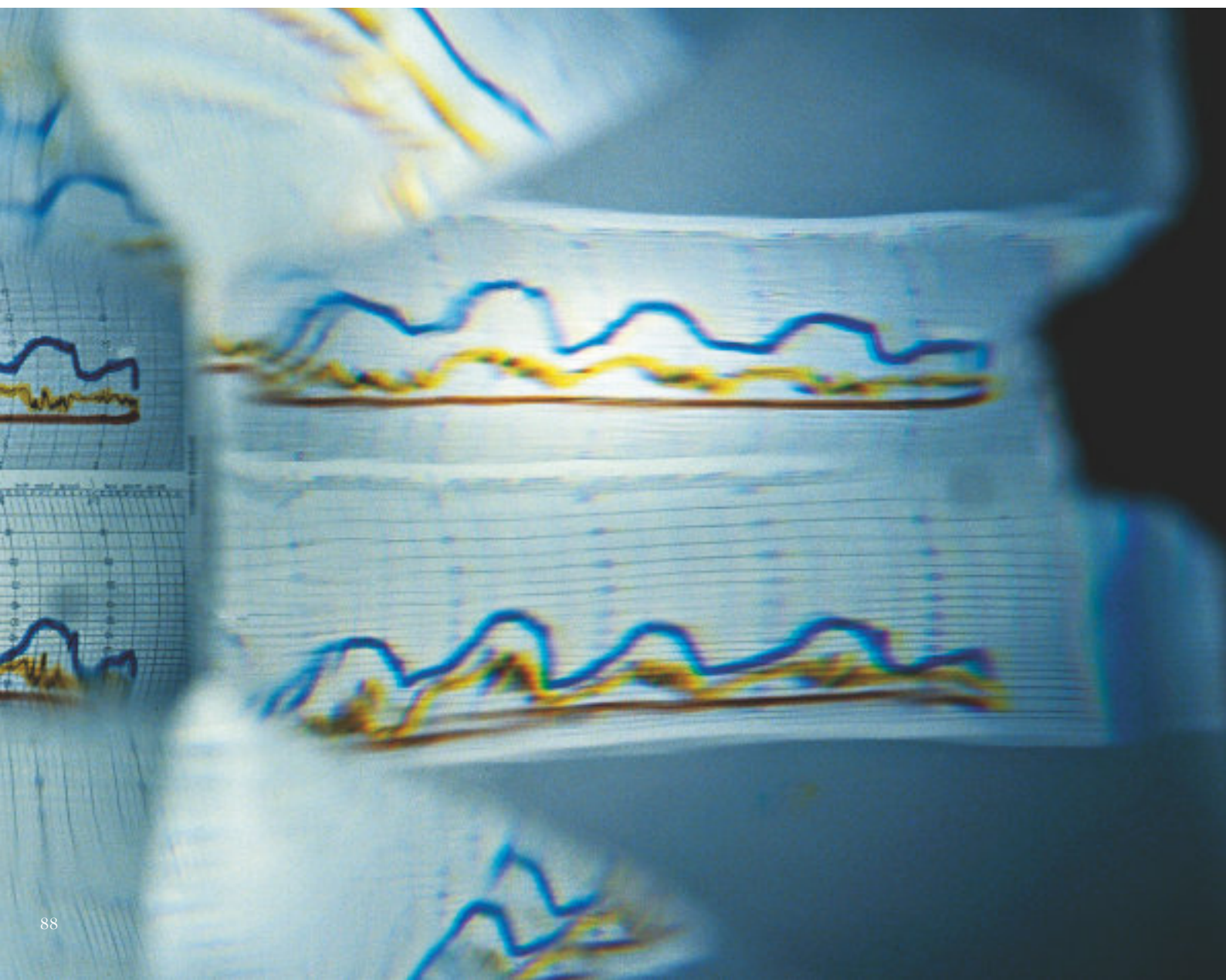
REALEX has two objectives:

- To complete the risk assessment realized in the framework of industrial safety by a vulnerability analysis of industrial installations against malicious actions.
- To better characterize the event for the dimensioning of the response. In this objective, the organization and the use of a real-time technical and scientific support (multidisciplinary expertise) will contribute to the decision aid for CBRNE crisis managers.

The project has achieved:

- The analysis and the formalization of knowledge in the fields of risks and CBRNE threats to share a common understanding. A specific ontology has been developed;
- The capitalization of the lessons learned from passed events, CBRNE crisis; the main objectives of this work were to develop relevant threat scenarios and characterize crisis situations that policy makers may face in the future;
- The expression of the needs from crisis managers;
- A method for security analysis of industrial sites based on ARAMIS methodology;
- The network architecture of a real time CBRNE expertise associated with a roadmap for its implementation. A Case study, conducted in the Port of Marseille, has tested the method for a global overall assessment of risks and threats.

Prévention des risques de mouvements de terrain



Stratégie de recherche

Fort d'une expérience de plusieurs décennies, l'INERIS possède une expertise unique en France dans le domaine du risque souterrain (mines, carrières, cavités naturelles) et fournit un appui aux services de l'État impliqués dans la prévention de ce type de risque.

L'INERIS transfère depuis quelques années cette compétence à d'autres types de risques rendus particulièrement sensibles par le changement climatique. Par exemple : les éboulements rocheux (falaises côtières, grands glissements...), et les conséquences de la sécheresse sur les sols argileux (désordres sur les structures, impacts sur l'activité agricole...).

La démarche de recherche mise en œuvre se décline en trois thèmes principaux : la compréhension des mécanismes à l'origine de la rupture d'un massif rocheux ; le développement d'outils utiles à la prédiction des instabilités ; la protection des ouvrages soumis à des aléas miniers ou naturels.

Compréhension du comportement des massifs rocheux

Les travaux de recherche sur les mécanismes à l'origine des ruptures susceptibles d'affecter les ouvrages rocheux (mines, falaises) s'appuient sur des résultats d'expérimentations sur site ou en laboratoire fournissant des données quantitatives. Des lois de comportement sont alors établies et implémentées au sein de modèles numériques. On peut ensuite extrapoler ces résultats de recherche sur des sites pouvant poser des problèmes de sécurité publique.

L'exemple retenu pour illustrer ce thème est un programme de recherche qui traite de l'analyse du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés à double porosité (porosité de matrice et porosité de fractures). Plusieurs approches ont été confrontées pour traiter des versants rocheux comme des ouvrages souterrains. Après des expériences de laboratoire, des expérimentations *in situ* à grande échelle ont été réalisées. Le dépouillement des résultats obtenus a permis l'élaboration d'une méthode de modélisation.

Développement d'outils de prédiction des instabilités

L'INERIS, au travers du CENARIS (Centre National de surveillance des Risques du Sol et du Sous-Sol) développe des compétences dans le domaine de la détection et de l'interprétation de signes précurseurs au déclenchement d'instabilités géologiques. Un tel domaine, en permanente évolution, tant en termes de matériel que de capacité de traitement des informations exige des développements scientifiques permanents pour garantir des facultés sans cesse accrues de détection des situations à risque.

Pour illustrer ce second thème, sont présentés les résultats de l'expérimentation de la cavité saline de Cerville-Buissoncourt. Cette expérimentation *in situ* de grande ampleur a permis de suivre l'extension, la dégradation puis l'effondrement d'une cavité saline. Cette expérimentation a permis de confirmer les capacités de la technique d'écoute micro-sismique à détecter des signes précurseurs émis par le massif rocheux bien avant le déclenchement du processus d'effondrement des terrains de surface.

Protection des enjeux soumis à des risques de mouvements de terrain

L'INERIS consacre une attention particulière à la problématique de la vulnérabilité des ouvrages aux aléas d'origine naturelle ou minière. On entend ici par « ouvrages », des bâtiments, des infrastructures ou des structures industrielles particulièrement sensibles. Ce dernier point ouvre la problématique en devenir des « Natech » (accidents industriels résultant d'un aléa naturel).

Sont présentés les premiers résultats de recherche concernant « l'interaction sol-structure », c'est-à-dire le phénomène d'action-réaction qui se développe à l'interface entre un sol mis en mouvement et une structure qui se déforme sous l'effet de cette sollicitation. La problématique se trouve à l'interface de deux domaines de compétence : la géologie de l'ingénieur, pour les mouvements du sol, et le génie civil, pour les conséquences sur les ouvrages.

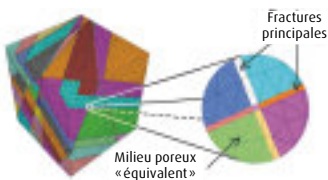
Caractérisation et prédiction du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés

{ A. Thoraval }

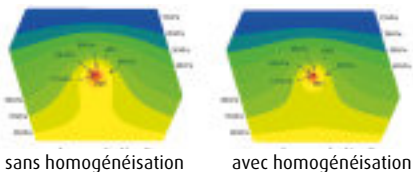
A - Essai d'injection réalisé sur le site de Coaraze, Alpes-Maritimes



B - Mise au point d'un modèle « double porosité » avec les logiciels 3DEC et FLAC3D



C - Impact de l'homogénéisation sur les pressions hydrauliques dans la fracture instrumentée



Caractérisation et prédiction du comportement des milieux fracturés *in situ*.

1

Le comportement mécanique, hydraulique et hydromécanique des fractures a été abondamment étudié durant ces trente dernières années et ce à divers titres (exploitation minière, stabilité des versants rocheux, stockage géologique). Il a ainsi clairement été établi que les paramètres géométriques (rugosité des épontes et répartition des zones en contact et des vides), les paramètres mécaniques (raideurs normale et tangentielle) et les paramètres hydrauliques (perméabilité ou ouverture hydraulique de la fracture) sont en lien direct avec les sollicitations qui se développent au niveau de ces zones « sensibles » (contraintes mécaniques et pressions hydrauliques).

L'INERIS a contribué à ces travaux en collaboration avec le laboratoire Sols, Solides, Structures (L3S) de l'Institut national polytechnique de Grenoble et le Laboratoire environnement, géomécanique & ouvrages (LAEGO) de l'Institut National Polytechnique de Lorraine. Cette collaboration a conduit notamment à élaborer une procédure d'identification de la loi de couplage hydromécanique reliant l'ouverture hydraulique à la fermeture mécanique des fractures à partir d'essais de laboratoire. L'analyse de la morphologie des épontes de la fracture a également mis en évidence une relation entre cette loi et la variation de la surface de contact (ou d'écoulement) de la fracture avec la contrainte normale effective [Lopez *et al.*, 2007].

Les interactions entre le comportement hydromécanique des fractures et celui de la matrice rocheuse ont également été étudiées. Cette recherche a conduit au développement d'un dispositif expérimental,

permettant de caractériser le comportement hydromécanique, à la fois des fractures et de la matrice poreuse constituant les épontes de la fracture. L'appareillage dispose pour cela d'un système de récupération du fluide percolant à travers l'éponte supérieure de la fracture, ainsi qu'un système d'imperméabilisation amovible au niveau des limites du joint.

Après qualification du dispositif expérimental et validation des procédures d'identification à partir d'essais sur des échantillons de calcaire (provenant du site de Coaraze, Alpes-Maritimes) et de grès des Vosges (provenant de la carrière de Bleuville), les mesures réalisées en laboratoire ont servi de calage au développement d'un modèle numérique permettant de restituer fidèlement le comportement hydromécanique d'échantillons de grès fracturé et poreux soumis à une sollicitation normale et à un chargement hydraulique complexe [Souley *et al.*, 2007 & 2009].

Les travaux de laboratoire sont très utiles pour comprendre les relations entre les différents paramètres définissant le comportement hydromécanique des fractures. Toutefois, cette caractérisation faite sur des échantillons de taille nécessairement réduite n'est pas forcément représentative du comportement de la fracture à l'échelle du site étudié. C'est pourquoi l'INERIS a souhaité développer parallèlement des outils et des méthodes de caractérisation *in situ* des milieux rocheux fracturés.

Cette recherche a été conduite dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire Géoscience-Azur de l'Université de Nice sur le site de Coaraze, Alpes-Maritimes (figure 1A). Elle a

débouché sur la mise au point d'un dispositif amovible d'auscultation *in situ* du comportement hydromécanique des fractures permettant la réalisation de mesures simultanées de pression et de déplacement de haute précision [Cappa *et al.*, 2006] et la détermination, par calage de modèles numériques tridimensionnels, des caractéristiques hydromécaniques des fractures [Thoraval *et al.*, 2009].

En complément de ce travail, l'INERIS s'est également attaché à développer des méthodes de prédiction du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés, et cela à différentes échelles. Cette recherche a conduit à élaborer des modèles numériques tridimensionnels, dit à « double porosité » (figure 1B), permettant de rendre compte simultanément du comportement hydromécanique d'un certain nombre de fractures considérées comme majeures, mais également de celui de la roche intacte ou d'un milieu équivalent constitué de la matrice et des fractures d'importance secondaire non introduites explicitement [Thoraval, 2009].

Si l'on s'intéresse à la prédiction de la stabilité ou des écoulements à très grande échelle, il

n'est pas envisageable en effet de prendre en compte toute la fracturation de manière explicite (pour des problèmes liés à la reconnaissance *in situ* de cette fracturation et aux limites des outils de modélisation). Il n'est d'ailleurs pas nécessaire de le faire. En effet, cette recherche a montré que le recours à l'homogénéisation (technique permettant de calculer les caractéristiques hydromécaniques d'un milieu continu poreux équivalent) rend possible une prédiction correcte du comportement hydromécanique global sans introduire explicitement toute la fracturation (figure 1C).

Ces travaux ont donc permis de progresser dans la compréhension théorique et pratique des lois régissant le couplage entre les déformations mécaniques et les écoulements au sein du massif en s'appuyant sur des essais innovants de laboratoire ainsi que sur différentes expérimentations *in situ*. Il est désormais possible d'envisager l'application de ces résultats à l'ensemble des problématiques relatives au champ d'expertise de l'INERIS (versants rocheux instables, carrières, mines, stockages).

ABSTRACT

During the last three decades, considerable efforts have been devoted to investigate and to characterize the hydromechanical behaviour of fractures. INERIS has participated to this research in collaboration with the Sols, Solides, Structures laboratory (L3S) from Institut National Polytechnique of Grenoble, the Environnement, Géomécanique & Ouvrages laboratory (LAEGO) from Institut National Polytechnique of Lorraine and Géoscience-Azur laboratory from Nice university. The main contributions concern the determination of relations between joint hydraulic opening and joint mechanical closure ; the improvement of a experimental device, previously used to characterize individual fractures at the laboratory scale, in order to also measure the flow through porous rock mass sample in addition to fracture flows ; the development of a removable device allowing the *in situ* fracture monitoring through the realization of simultaneous pressure and mechanical displacement measurements. Three-dimensional numerical approach was also developed to simulate at big scale the hydro-mechanical behavior of a fractured rockmass using explicit representation for the main fractures and up-scaling for the others. Thus, this work made it possible to progress in the theoretical and practical comprehension of the laws governing the coupling between the mechanical deformations and the flows within the fractured rock mass. From now, it is possible to consider the application of these results to various problems relating to the field of INERIS expertise as rock slope stability or underground cavern design.

RÉFÉRENCES

- Cappa F., Guglielmi Y., Rutqvist J., Tsang C.F., Thoraval A., 2006. *Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze laboratory site, France, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2006, vol. 43, N° 7, p. 1062-1082.
- Lopez P., Thoraval A., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M., 2007. *Advance in constitutive modelling of jointed rock hydromechanical interaction at laboratory scale, Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXX, N° 1-2, 2008.
- Souley M., Boulon M., Rahmani I., Thoraval A., 2007. *Mesure en laboratoire des échanges hydrauliques entre fracture et matrice et des couplages hydromécaniques associés dans le cas d'une roche gréseuse*, Proceedings of the 11th congress of the International Society for Rock Mechanics, 9-13 July 2007, Lisbon, Portugal. *Leiden, The Netherlands : Taylor & Francis*, 2007, vol. 1, p. 327-330.
- Thoraval A., Guglielmi Y., Cappa F., 2009. *Caractérisation hydromécanique des fractures in situ - Apport de la modélisation numérique*, numéro à thème de la Revue française de géotechnique sur les « Discontinuités et joints dans les massifs rocheux » (à paraître prochainement).
- Thoraval A., 2009. *Analyse du comportement hydromécanique des milieux rocheux fracturés à double porosité*, Rapport de recherche INERIS référencé DRS-09-66395-01896A.

Surveillance de l'évolution d'une cavité saline jusqu'à son effondrement

{ X. Daupley, I. Contrucci, E. Klein }

NOTE

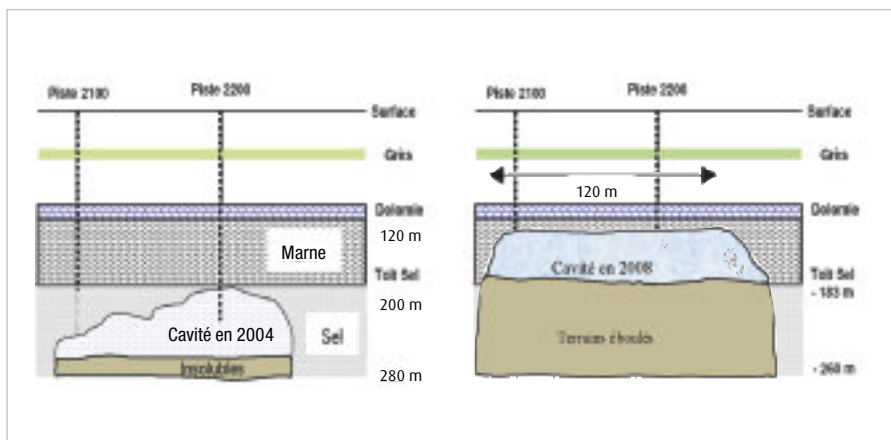
(1) Le GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) associe l'INERIS, le BRGM, l'INPL et l'ENSMP.

La gestion des risques de mouvements de terrain liés à la présence d'ouvrages souterrains requiert une bonne connaissance des phénomènes d'aléa du type affaissements ou effondrements en grand. Dans ce contexte, l'INERIS mène des travaux de recherche et a saisi l'opportunité d'instrumenter une cavité saline de grandes dimensions, en cours d'exploitation, pour tester différentes techniques d'auscultation et de surveillance. Dans le contexte des cavités abandonnées, les techniques mises en œuvre permettent de détecter les phénomènes d'effondrement, dont le déclenchement peut être brutal, et laisser le temps aux pouvoirs publics et aux collectivités de prendre les mesures de protection nécessaires.

Une expérimentation unique

L'INERIS a participé depuis 2004, avec le soutien du MEEDDM et dans le cadre du GISOS⁽¹⁾, à une expérimentation sur une cavité saline en exploitation dans le bassin salifère lorrain, à quelques kilomètres de Nancy. Le site d'expérimentation se situe à l'intérieur du périmètre de la concession minière de Cerville-Buissoncourt appartenant à la société SOLVAY. La méthode d'exploitation utilisée, dite « intensive » consiste à récupérer l'intégralité du gisement de sel par dissolution, laisser s'effondrer les terrains de couverture puis réaliser des réaménagements de surface. Les différents stades d'évolution de la cavité (figure 1) ont ainsi pu être suivis jusqu'à son effondrement survenu en février 2009 (photo 1).

Plusieurs méthodes géotechniques et géophysiques complémentaires ont été mises en œuvre sur le site par les partenaires du GISOS. L'INERIS a installé un système de surveillance microsismique couplé à un tachéomètre et un GPS différentiel haute résolution pour la mesure de déplacement en surface, afin d'approfondir sa connaissance des mécanismes d'initiation et d'évolution de l'effondrement (figure 2) [2, 3].



Coupe schématique de la cavité et de sa position en 2004 et 2008 (estimation) avant l'effondrement.

#1

RÉFÉRENCES

[1] Mercerat D. *Sismicité induite et modélisation numérique de l'endommagement dans un contexte salin*. Thèse de doctorat soutenue en 2007 à l'Institut national polytechnique de Lorraine, en collaboration avec l'Institut de physique du globe de Paris.

[2] Driad-Lebeau L., Daupley X., Mercerat D. *Suivi d'une cavité saline jusqu'à son effondrement : analyse microsismique*. Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG'08, Nantes, 18-20 juin 2008, p. 313-320.

[3] Klein E., Contrucci I., Daupley X., Hernandez O., Bigarré P., Nadim C., Cauvin L. *Experimental Monitoring of a Solution-mining Cavern in Salt: Identifying and Analyzing Early-Warning Signals Prior to Collapse*. SMRI Fall 2008 Technical Conference, Austin, Texas (États-Unis), 13-14 octobre 2008.



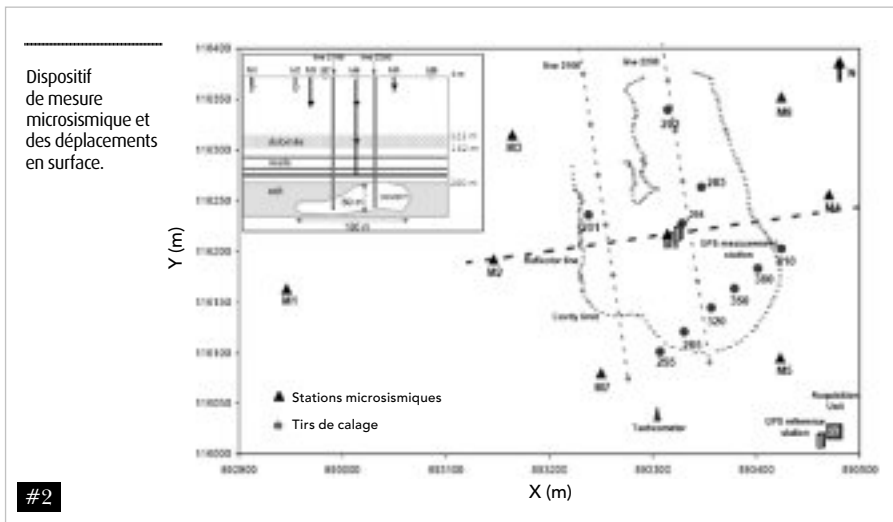
Photographie de l'effondrement de la cavité de Cerville-Buissoncourt, prise en mai 2009.

Signes précurseurs de l'effondrement

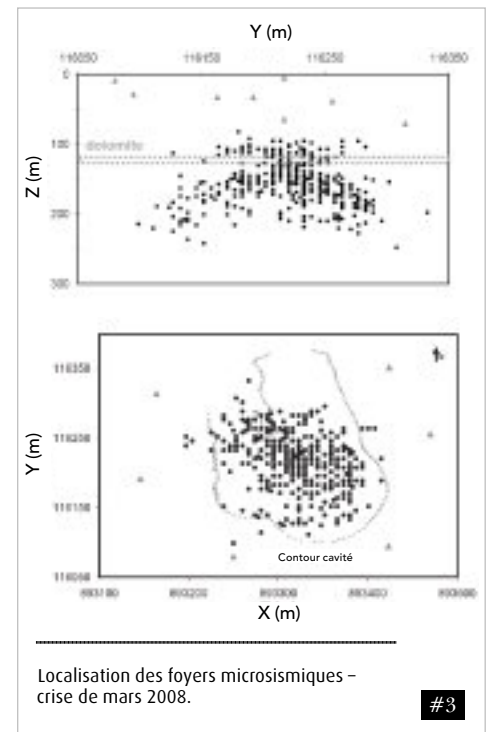
Les premiers signes d'évolution significative de la cavité ont été détectés par le dispositif de surveillance microsismique en mars et avril 2008. Ces signes précurseurs de l'effondrement ont précédé un déplacement de la surface du sol de faible amplitude (quelques centimètres). La localisation des foyers microsismiques (figure 3), est bien corrélée aux variations quasi dynamiques de pression de saumure et aux évolutions mesurées de chutes de toit au droit des forages d'observation [2, 3]. À ce stade d'évolution, l'activité microsismique se révèle beaucoup plus fine et précise quant à l'évolution de la cavité minière que les mesures de déplacement réalisées en surface ou sub surface.

Alors que la cavité avait atteint en 2008 ses dimensions critiques, l'exploitant a décidé d'accélérer son effondrement. Des opérations de pompage dans la cavité ont permis de réduire le niveau de la saumure et ainsi la pression hydrostatique qui contribuait jusqu'alors à soutenir les parois de la cavité. L'effondrement est intervenu après 4 jours de pompage, le 13 février 2009.

Les différentes étapes d'évolution ont été suivies en temps réel par le dispositif de surveillance. La corrélation des mesures acquises par les différentes techniques d'auscultation a permis de préciser, d'une manière fine, les stades d'évolution terminale de la cavité (réponse élastique, rupture, évolution de l'instabilité). L'affaissement de la surface du sol a atteint 4 m avant effondrement et son

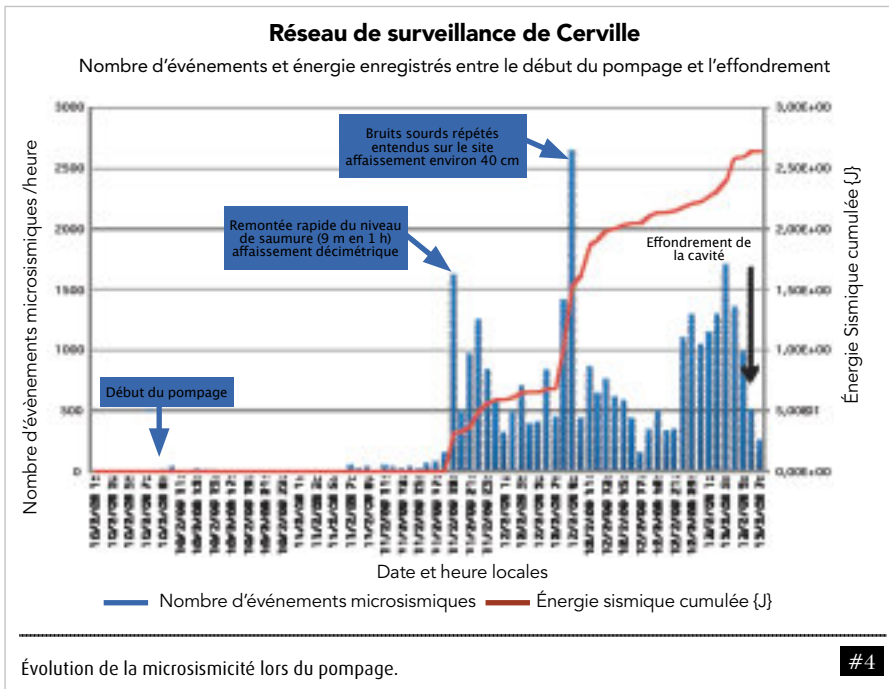


#2



Localisation des foyers microsismiques - crise de mars 2008.

#3



évolution est parfaitement corrélée avec les variations d'activité microsismique (figure 4).

À l'issue de cette expérimentation unique, de nombreuses données très précises, en particulier microsismiques, sont disponibles. Leur analyse commencée au cours des quatre années précédentes [1, 2, 3] est développée dans le cadre d'un programme de recherche dédié à l'identification des signes précurseurs d'instabilité. Les travaux en cours portent actuellement sur :

- une meilleure localisation des foyers microsismiques. Un travail de localisation par rapport à des événements très précisément situés permettra de minimiser les erreurs liées à la propagation des signaux ;
- l'appréhension des mécanismes à la source basée sur le rapport d'amplitude entre les ondes de compression et de cisaillement P/S.

ABSTRACT

Managing the risk of ground instabilities linked to the presence of underground cavities requires a good knowledge of accidental phenomena like subsidence or large scale collapse. In order to improve our understanding in ground failure phenomenon induced by old mining works, a mine exploited by solution mining technique has been instrumented in 2004 prior to its collapse resulting of the mining scheme. A permanent early warning system was set up, including a high resolution microseismic monitoring network linked to a surface field displacement measurement system. The important amount of data transmitted by on-line processing offered daily insight of the evolution of the geological system. After a stationary period, the cavern entered into its final evolution phase since early 2008. The microseismic activity showed upwards progressive failure migration all along 2008 without any significant surface movement. Then, after two days of intensive brine extraction, the high microseismicity and energy release rate marked the failure of a thin and very stiff dolomite layer underlying 120 meters deep. This failure occurred 24 hours before the final collapse; it was followed by transient brine pressure signals, and by an exceptional acceleration in the surface subsidence rate.

The analysis of the numerous data collected during this experiment is being developed within the framework of a research program dedicated to the identification of early warning signals of instability.

RÉFÉRENCES

- [4] Contrucci I., Klein E., Bigarré P., Lizeur A., Lomax A., Bennani M., (accepted 2009). *Management of post-mining large-scale ground failures: blast swarms field experiment for calibration of permanent microseismic early-warning systems*, *Pure and Applied Geophysics*.
- [5] Mercerat E. D., Driad-Lebeau L., Bernard P., accepted 2009. *Induced seismicity monitoring of an underground salt cavern prone to collapse*, *Pure and Applied Geophysics*.

Impact des mouvements de terrains sur les bâtis et les infrastructures

{ M. Al Heib, M. Caudron, B. Hor, J.-B. Kazmierczak }

Les mouvements de terrains (retraits-gonflements, glissements, affaissements, effondrements localisés et généralisés, etc.) sont souvent dommageables pour les structures ou les infrastructures. Le niveau de dommage dépend de l'amplitude des mouvements et des caractéristiques des ouvrages en surface. L'évaluation de la vulnérabilité des structures ne tient pas toujours compte de l'interaction entre le sol et l'ouvrage. Des mesures de mouvements de terrains réalisées lors du creusement d'un tunnel à Londres ont montré clairement l'écart entre le modèle de prédiction sans tenir compte de l'interaction sol-structure et les mesures *in situ*. Elles ont montré que la courbe d'affaissement obtenue dépend de la rigidité de la structure affectée. Le nombre de structures exposées au risque de mouvements de terrains est très important. Il est primordial de proposer une évaluation précise et des solutions efficaces pour bien évaluer et réduire la vulnérabilité.

Problématique scientifique liée à l'évaluation des dommages

L'évaluation des dommages induits par les mouvements de terrains est généralement réalisée en deux étapes indépendantes : la première est l'évaluation de l'amplitude des mouvements et la deuxième est la sollicitation de la structure par ce mouvement sans tenir compte de l'interaction sol-structure qui peut très fortement modifier l'amplitude du mouvement et ses conséquences⁽¹⁾.

Il existe des connaissances permettant de prévoir relativement convenablement les mouvements verticaux de terrains provoqués par des cavités souterraines (mines et carrières), notamment en fonction de leur morphologie et de la nature du recouvrement. Pour déterminer la sollicitation de la structure et estimer la classe de dommages, la structure a souvent été modélisée par une poutre simple.

La prise en compte de l'interaction sol-structure s'est développée récemment. Les travaux les plus avancés concernent généralement le creusement de tunnels, caractérisé par une amplitude de mouvements généralement faible.

Le retour d'expérience met en évidence la nécessité de développer des connaissances scientifiques, afin de mieux appréhender la complexité des mécanismes mis en jeu lors du développement d'Interactions Sol-Structure.

La problématique se trouve donc à l'interface de deux domaines de compétence : la géologie de l'ingénieur, en ce qui concerne les mouvements du sol, et le génie civil, concernant les conséquences sur les ouvrages.

La démarche adoptée par l'INERIS est globale et permet d'apprécier et de déterminer le rôle de l'interaction sol-structure vis-à-vis des mouvements de nature à induire des dommages aux structures. L'approche scientifique est celle de la modélisation physique et numérique associée aux observations *in situ*.

RÉFÉRENCES

Al Heib M. Interaction sol-structure. Influence de la déformation horizontale (MVT) sur le bâti. Rôle d'une tranchée périphérique. Actes des Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG 2008, Nantes, p. 159-166.

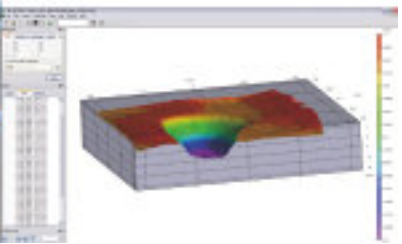
Caudron M., Al Heib M., 2009. Le simulateur de mouvements de terrain : un outil pour l'étude du comportement de structures soumises à des affaissements/effondrements. Conférence Géorisque, Montpellier. 3 février 2009.

Caudron M., Al Heib M., Emeriault F. Collapses of underground cavities and soil-structure interactions: influences of the position of the structure relative to the cavity. Int. Ass. for Comp. Meth. and Adv. in *Geomechanics* (IACMAG), Goa, INDIA, 30 sept - 5 octobre 2008.

Caudron M. Un modèle physique de grandes dimensions : un outil pour l'étude de l'interaction sol-structure. Conférence invitée aux JNGG'08, Nantes, juin 2008.

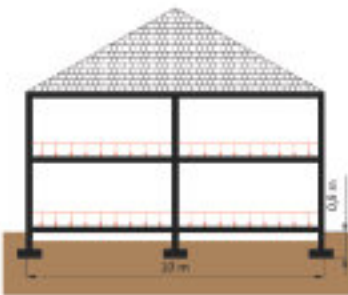
NOTE

(1) L'interaction sol-structure décrit le phénomène (d'action-réaction) qui se développe à l'interface entre un sol mis en mouvement et une structure (habitation, ouvrage) qui se déforme sous l'effet de la sollicitation.



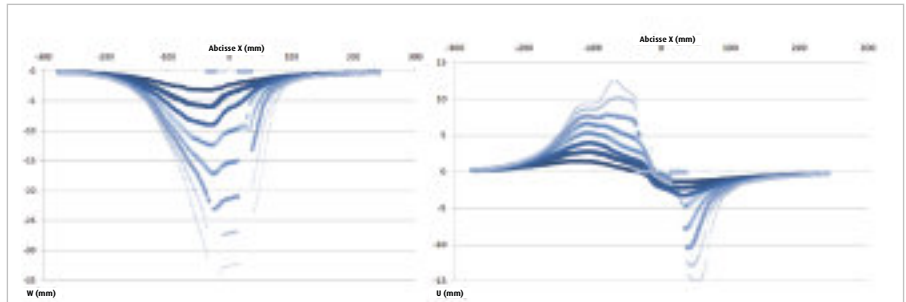
Modélisation physique des mouvements de terrain et leur impact sur les ouvrages en surface.

#1



Géométrie de la structure modélisée.

#3



Évolution de la cuvette d'affaissement et des déplacements horizontaux pour huit valeurs de déplacements du vérin, de 10 à 80 mm.

#2

Développement d'un modèle physique réduit

La modélisation physique réduite a d'abord été employée dans le cadre de la thèse de M. Caudron (2007), en partenariat avec l'INSA-Lyon. Un modèle réduit physique bidimensionnel fut développé permettant de représenter l'effondrement d'une cavité et l'apparition des mouvements de terrain en surface sollicitant une maquette de structure. Les résultats obtenus ont confirmé l'importance de l'interaction sol-structure. Toutefois, les caractéristiques et l'échelle du modèle ne permettent pas de reproduire les mécanismes réels d'interaction sol-structure.

L'INERIS a investi pour réaliser un modèle physique réduit tridimensionnel de dimensions importantes. Ce modèle physique a été conçu et fabriqué au sein des ateliers de l'INERIS (figure 1) (3 m de longueur, 2 m de largeur et 1 m d'hauteur). Il peut être équipé de 48 vérins (un seul dans son état actuel) permettant de reproduire dans le sol des sollicitations s'apparentant aux mouvements induits par l'effondrement d'une cavité.

Afin d'être capable, tout au long d'un essai, de mesurer les différentes composantes des déplacements en surface, un système d'imagerie numérique basé sur l'utilisation de deux caméras et d'un outil logiciel, Vic3D, est intégré au modèle. Il permet, après une phase initiale de calibration, de déterminer les champs de déplacements en tout point de la surface du massif de sol avec une précision de 0,05 mm.

Le modèle physique a été conçu en respectant les lois de similitude entre le prototype et la réalité grâce aux différents facteurs

d'échelle. Plusieurs grandeurs peuvent être modifiées pour simuler des configurations différentes générant des mouvements en surface (géométrie de la cavité et profondeur de celle-ci) : d'un fontis de petites dimensions à l'effondrement généralisé ou une cuvette d'affaissement de grande extension. Un essai sur le modèle physique est relativement rapide. Le traitement des images obtenues permet de modéliser la cuvette et les profils de déplacements verticaux, horizontaux ainsi que des déformations (figure 1). Grâce au traitement d'images, nous obtenons les caractéristiques de la cuvette d'affaissement : déplacement vertical, déplacement horizontal, déformation du sol en fonction de l'évolution des dimensions de la cavité modélisée grâce au vérin se trouvant à la base du sol. La figure 2 présente un exemple de courbes d'affaissement sans présence d'une structure, pour différentes amplitudes de déplacement vertical de vérin.

La structure de l'étude actuelle correspond à une maison individuelle courante (figure 3) de base carrée (10 x 10 m), avec voiles en maçonnerie et planchers en béton armé, deux niveaux de superstructure, fondations sur semelles filantes sans sous-sol. La structure modélisée est beaucoup plus simple car elle correspond à une dalle. Celle-ci présente un comportement analogue à celui de la structure complexe et un niveau de chargement identique.

Des essais ont été conduits en présence de la structure, la figure 4 présente une comparaison entre la courbe du déplacement vertical obtenu en terrain vierge et celle obtenue en présence de la maquette de structure.

La structure modélisée est beaucoup plus simple car elle correspond à une dalle. Celle-ci présente un comportement analogue à celui de la structure complexe et un niveau de chargement identique.

RÉFÉRENCES

Caudron M., 2008. Mouvements de terrain et déformations d'un bâtiment consécutif à un fontis : approche expérimentale et numérique. *Revue Européenne de Génie Civil*.

Hor B. Évaluation de l'impact des affaissements miniers et fontis sur les bâtiments en surface (Approche Expérimentale 3D). Rapport de Master de Recherche, INSA de Lyon 2008.

Pavier J. Évaluation de la vulnérabilité d'un bâtiment face à un risque d'affaissement de terrain. Rapport du stage 2a MRI - ENSI - Bourges 2008.

Prime N., Emeriault F., Caudron M., Al Heib M. Efficiency of mitigation measurements for structures subjected to ground movements. First International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo) 2009.






Type de structure					
Déformation horizontale transmise %	75	70	7	5	0,3

Tableau 1 : Pourcentage de transfert de la déformation horizontale du sol à la structure.

La perturbation des mouvements induits est indéniable. La présence de la structure en surface modifie la forme et l'amplitude des mouvements de terrain de manière croissante avec l'amplitude de celui-ci : pour l'ouverture de 10 mm, la perturbation est faible, alors que pour l'état final, associé à une ouverture de la cavité de 30 mm, la perturbation est très importante, allant jusqu'à un décollement entre la structure et le sol.

La modélisation numérique d'une structure simple (portique ou un mur plein) a montré que la présence d'une structure rigide réduit la déformation du sol jusqu'à 60 % et la déformation transmise à la structure est inférieure à 5 %. En revanche, en présence d'une structure souple la déformation transmise est égale pratiquement à la déformation du sol (tableau 1).

Conclusion et perspectives

La prise en compte de l'interaction sol-structure dans les études de mouvements de terrains a permis de mettre en évidence que les approches classiques ne sont satisfaisan-

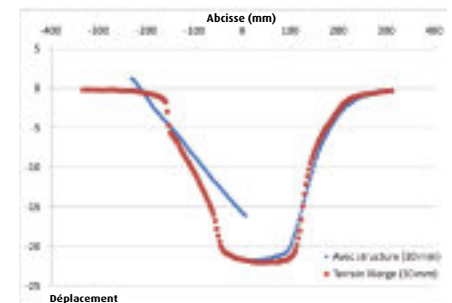
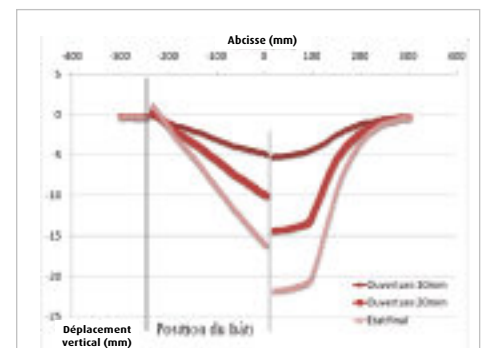
tes que pour des structures très peu rigides. Les résultats des approches conduites en laboratoire grâce à la modélisation physique et numérique montrent que les structures rigides subissent peu de déformation ce qui réduit leur endommagement. Néanmoins, il se pose alors la question de la fragilité de telle structure, dont la ruine peut être très rapidement obtenue dès que le seuil de résistance est dépassé, *a contrario* du comportement des structures souples.

L'évolution du modèle physique se poursuit, principalement au niveau du nombre de vérins utilisés, afin de permettre une reproduction de mouvements de terrain plus diversifiés qu'elle ne l'est actuellement. Par ailleurs, l'étude des structures et plus particulièrement de leur endommagement lorsque soumises à des mouvements de terrain doit permettre une meilleure compréhension de leur comportement afin d'optimiser au mieux le choix de solutions techniques de réduction de leur vulnérabilité.

ABSTRACT

The excavation and the collapse of underground cavities can induce the subsidence of the ground surface. The damages due to the subsidence may affect the structures and the infrastructures. The qualification of the level of potential damages is done without taking into account the soil-structure interaction. INERIS realizes today an important research program to study the effect of soil-structure interaction. Three research tools are adopted: *in situ* observation, physical and numerical modelling. INERIS has realized the concept and the construction of an important physical model for modelling the subsidence. A simple house was also constructed on the subsidence zone.

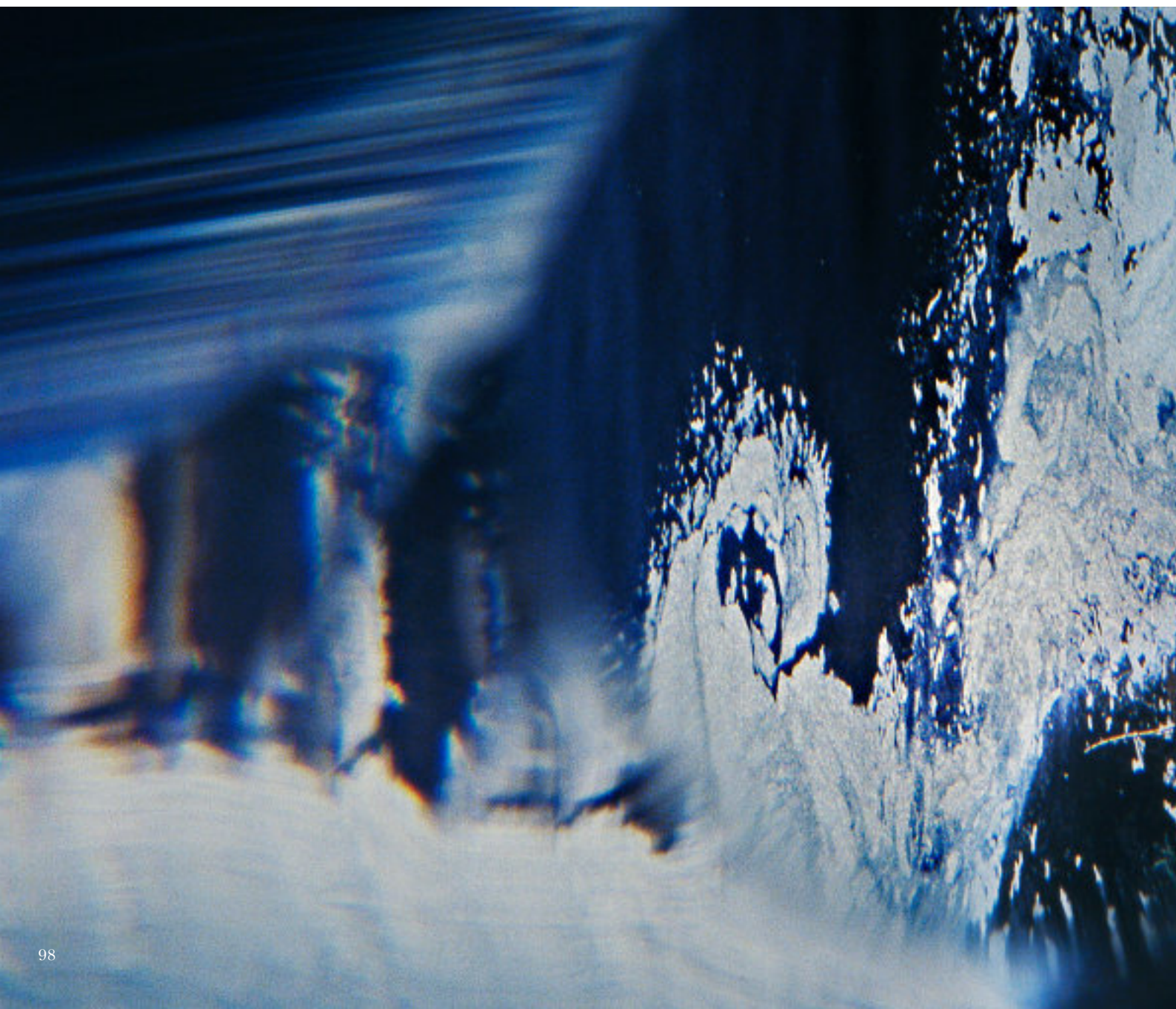
The first results of the physical modelling clearly show the influence of structures on the through subsidence shape. Thank to the numerical modelling, we know that the amplitude of the ground movement transmitted to the structure depends on their stiffness, it varies between 5 % and 100 % of the movement induced by underground cavities under greenfield conditions.



En haut : évolution de l'affaissement en présence de la structure en surface.
En bas : comparaison entre deux profils d'affaissement en terrain vierge et en présence de la structure.

#4

Stockage du CO₂



Stratégie de recherche

Afin de diminuer la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz contribuant à l'effet de serre responsable du réchauffement climatique, les experts s'accordent à dire qu'il faudra diviser par deux les émissions d'ici 2050 (par 4 pour les pays industrialisés). La filière CSC (captage et stockage du dioxyde de carbone) pourrait contribuer à hauteur de 20 à 33 % de la réduction escomptée. Il faudra, pour cela, être capable de piéger le CO₂ durant une longue période (de l'ordre du millier d'années ou davantage). Aujourd'hui trois contextes de stockage sont principalement étudiés : les anciens gisements d'hydrocarbures, les aquifères salins profonds et les gisements houillers non exploités. Ces deux derniers cas sont illustrés dans les articles qui suivent.

Comme toute technologie émergente, la filière CSC comporte des risques spécifiques qu'il convient d'identifier et de gérer dès l'amont, c'est pourquoi l'INERIS y consacre un axe de recherche depuis fin 2002. En effet, pour que cette filière prometteuse puisse se développer harmonieusement au niveau international, elle devra le faire dans des conditions de sécurité optimales pour l'homme et l'environnement, à court comme à long terme, tant pour les activités de surface que pour le devenir en sous-sol. Précisons que l'ensemble de la chaîne peut se décomposer en 4 maillons : captage, transport, injection, stockage.

Les questionnements scientifiques relatifs à la filière CSC sont les suivants :

- le besoin spécifique de concilier plusieurs échelles de temps et plusieurs phases de vie de la filière dans l'analyse des risques, depuis les accidents sur les installations de surface en période d'exploitation jusqu'au devenir à long terme dans le sous-sol. C'est l'objet du premier article.
- la prévision de la capacité de stockage, qui conditionne à la fois la faisabilité et la sécurité de la filière. Ce sujet est abordé, dans le deuxième article, consacré au stockage dans les bassins houillers.
- la difficulté de prévoir à long terme le comportement mécanique et hydrogéologique du sous-sol – ce point est illustré par le troisième article présentant le projet PICOREF – sachant qu'il faut également étudier les impacts géochimiques de la mise en solution du CO₂.

De par ses compétences en évaluation des risques industriels, des risques liés à l'utilisation du sous-sol et des risques environnementaux, l'INERIS développe une vision transversale de l'ensemble de la filière CSC et la valorise à travers de multiples programmes de recherche, européens et nationaux (financements du ministère chargé de l'écologie, de l'ANR et de l'ADEME). L'INERIS entend renforcer sa recherche sur les installations de surface et sur le transport. Notons que, pour réaliser une expertise appropriée des risques, il convient de rassembler le plus en amont possible les compétences disponibles, issues tant du monde industriel que du monde académique et d'organismes de référence tels le BRGM et l'IFP, avec lesquels l'INERIS collabore de longue date. L'INERIS est partenaire de plusieurs projets de démonstrateurs.

Vers une méthode d'analyse des risques globale de la filière CSC, intégrant plusieurs échelles de temps

{ R. Farret, P. Gombert, F. Lahaie, P. Roux }

Issus de publications récentes, les éléments rapportés ici reflètent la réflexion globale engagée par l'INERIS sur l'analyse des risques de la filière CSC, au sein de plusieurs programmes de recherche – associant divers organismes et experts français – et d'un programme d'appui aux pouvoirs publics.

Spécificités de l'analyse de risque sur la chaîne CSC

La filière « CSC » (captage et stockage du carbone) est en fait une chaîne d'activités qui comprend quatre maillons principaux :

- le captage du CO₂ à son lieu d'émission ;
- le transport jusqu'au site d'injection, par exemple à l'état supercritique dans une canalisation ;
- l'injection dans le réservoir souterrain ;
- le stockage à long terme.

Chacun de ces maillons est défini par une fonction, c'est pourquoi nous pouvons les qualifier de « systèmes fonctionnels ». Bien que distincts dans l'espace dans le plan horizontal (sites de captage, de transport et d'injection) ou vertical (installations de surface, puits d'injection, réservoir de stockage), ces quatre systèmes fonctionnels sont interdépendants, et l'analyse des risques doit impérativement considérer l'ensemble de la chaîne : par exemple le taux d'impuretés, qui se gère au niveau du captage, est susceptible de causer des risques sur les autres maillons, à court comme à long terme.

Sur certains maillons, des enjeux spécifiques vont apparaître, liés à la problématique de long terme et à notre manque de connaissances, c'est pourquoi lors des analyses de

risques il convient d'être prudent, et parfois inventif dans les solutions retenues. Ainsi, le maillon « stockage » est le moins bien connu, le seul qui ne sera pas construit par l'homme et pour lequel l'accès à l'information ne peut être qu'indirect (surveillance géochimique et géophysique). En outre, le retour d'expérience est assez faible puisque le plus ancien site de stockage géologique du CO₂, celui de Sleipner en Norvège, n'est en fonctionnement que depuis 1996.

L'analyse des risques du maillon « injection » est particulièrement sensible puisque les puits, même colmatés après fermeture du site constitueront des voies de fuite préférentielles du fait de leur jonction directe avec le réservoir de stockage. Ces vecteurs peuvent de plus être affectés à long terme par l'action du CO₂ comme des impuretés injectées, avec des aléas tels que l'altération du cuvelage métallique, de la cimentation annulaire et de l'anneau de roche endommagée entourant le puits (EDZ).

Première structuration d'une démarche d'analyse de risques

L'objet de « l'analyse des risques » est d'identifier les scénarios possibles puis de les caractériser ou de les mesurer, classiquement, en probabilité et en gravité (selon le guide ISO/CEI 73, le risque résulte de la « combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences »). Afin de caractériser la gravité, on utilise le plus souvent un modèle numérique, aussi modélisation et analyse des risques constituent généralement deux démarches complémentaires.

En conformité avec le contexte des études de

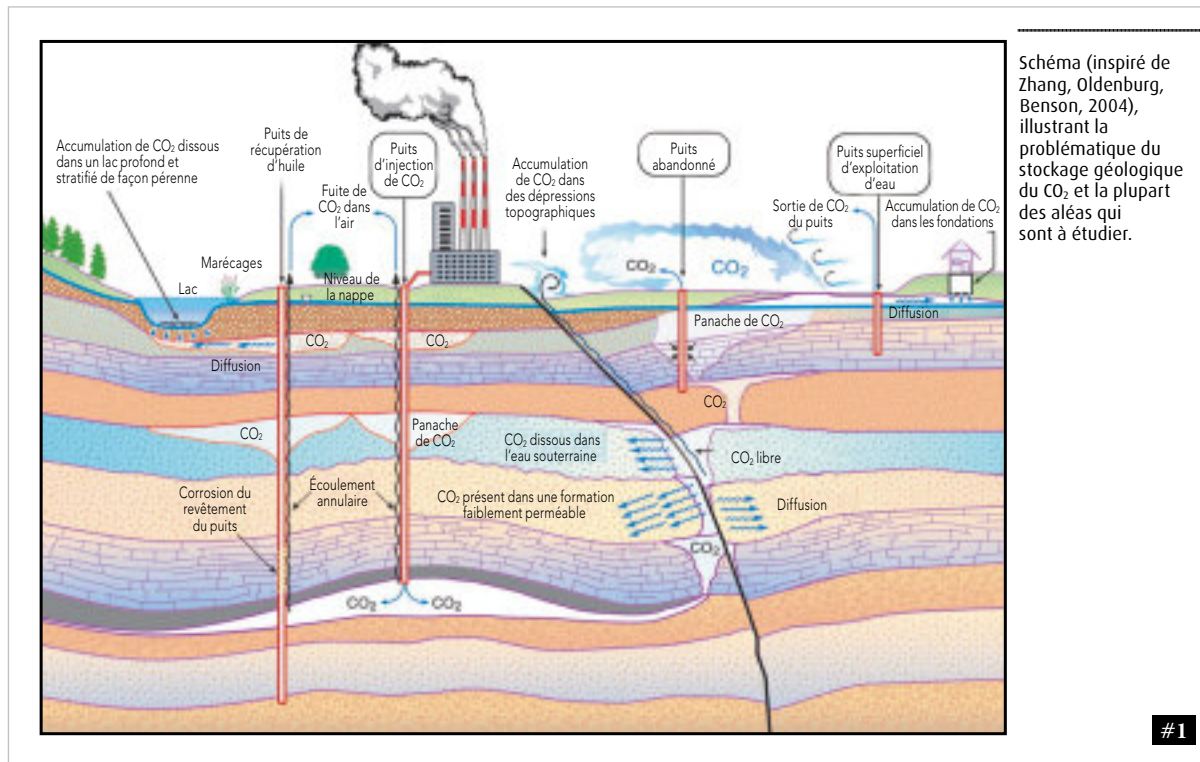


Schéma (inspiré de Zhang, Oldenburg, Benson, 2004), illustrant la problématique du stockage géologique du CO₂ et la plupart des aléas qui sont à étudier.

#1

dangers en France en 2005, nous considérons les « phénomènes » susceptibles de causer des dommages (ou conséquences) sur les cibles en jeu : pollution, blessure, mort. Afin de structurer la réflexion, nous avons proposé de regrouper l'ensemble des phénomènes susceptibles de se produire en plusieurs familles principales, alliant aussi bien des phénomènes de nature accidentelle (explosion ou nuage de gaz toxique par exemple) que ceux qui se réalisent de manière continue ou chronique (contamination d'un compartiment de l'environnement, effets mécaniques et hydrauliques, etc.).

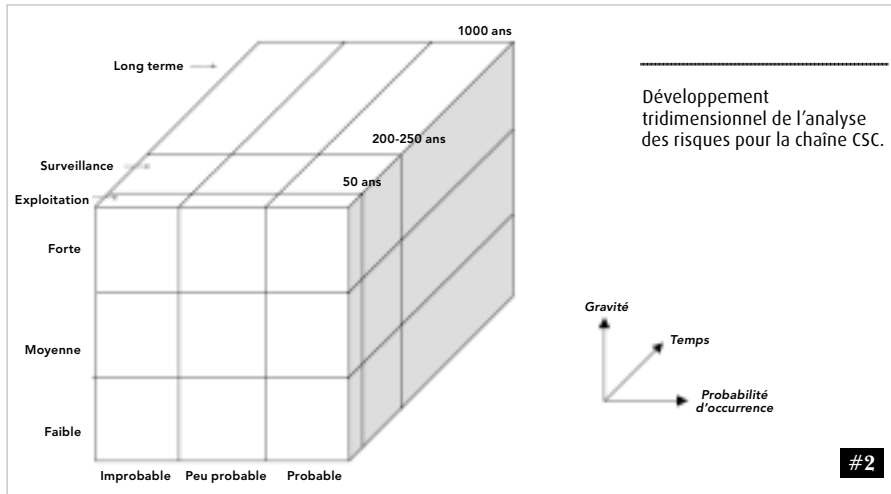
Au sein de chaque famille, des sous-catégories d'événements permettent de systématiser les analyses de risques à mener et de capitaliser les résultats obtenus. Ils regroupent les mécanismes liés aux transferts de fluides, aux transferts de chaleur, à l'évolution des contraintes hydrauliques ou mécaniques, et aux perturbations chimiques en solution comme sur les matériaux.

Pour de nombreux acteurs les phénomènes les plus redoutés *a priori* sont les pertes de confinement, brutales ou lentes, concernant le CO₂ lui-même. Les émanations brutales en

surface sont *a priori* susceptibles d'apparaître principalement en période d'exploitation seulement, mais peuvent concerner tous les maillons de la chaîne. Les migrations plus lentes sont susceptibles d'atteindre différents compartiments sensibles (pollutions), voire d'atteindre la surface (émanations); elles peuvent survenir en évolution normale comme en évolution dégradée du système, et résulteront principalement de perturbations au sein du réservoir et lors de la traversée des recouvrements (puits, failles). D'autres phénomènes doivent être étudiés. On citera, à titre d'exemple, les impacts liés aux impuretés ou à la mise en solution d'éléments-traces potentiellement toxiques, ou la modification des écoulements hydrauliques à longue distance liés à la poussée du fluide injecté qui reste supercritique longtemps avant de se dissoudre.

La troisième dimension : prise en compte du paramètre « Temps »

La probabilité d'occurrence s'estime par rapport à une période de temps de référence. Ainsi, une crue centennale (ce qui, par définition, signifie que sa fréquence



PRINCIPALES DIFFÉRENCES AVEC LES STOCKAGES SOUTERRAINS D'HYDROCARBURES

L'INERIS mène pour le ministère chargé de l'Environnement un programme d'appui DRS07 concernant l'étude des risques pour différents types de stockages souterrains : les hydrocarbures d'une part, le CO₂ d'autre part. L'analyse des risques de la filière CSC ne repose, à ce jour, que sur un retour d'expérience limité à une dizaine d'années d'exploitation sur quelques sites dans le monde. Elle devra donc s'appuyer aussi sur l'expérience acquise avec d'autres stockages souterrains tels que les stockages d'hydrocarbures, tout en étant adaptée aux spécificités du produit stocké et aux finalités du système. Ainsi on peut mettre en exergue les différences suivantes :

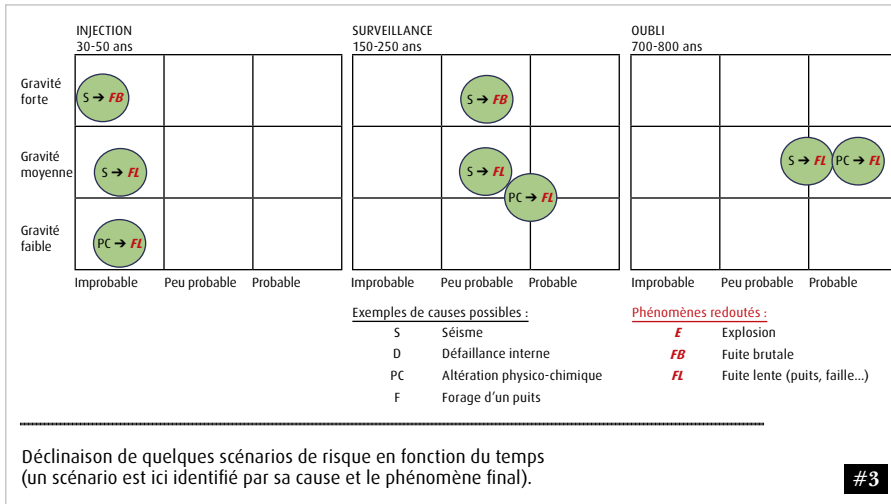
- le CO₂ sera injecté en continu, à l'état supercritique, avec abandon du site de stockage sous une pression maximale ;
- pour être efficace vis-à-vis du cycle du carbone, la durée de vie d'un stockage géologique de CO₂ devra être de l'ordre de grandeur d'un millier d'années contre quelques dizaines d'années pour un stockage souterrain d'hydrocarbures ; en ce sens, on se rapproche ici du mode de gestion des risques à long terme tel qu'il est envisagé dans les centres de stockage de déchets radioactifs ;
- le CO₂ est soluble dans l'eau d'où une réversibilité très difficile du stockage souterrain après un certain laps de temps ; la dissolution dans l'eau produit de l'acide carbonique susceptible de corroder les éléments constitutifs du puits (ciment, acier) ainsi que certaines roches-réservoirs (notamment carbonatées) ;
- le CO₂ supercritique ayant un fort pouvoir solvant sur la matière organique, il risque d'interagir avec les hydrocarbures résiduels présents dans les gisements d'hydrocarbures déplétés et d'en extraire certains composants toxiques (HAP) qui pourront passer en solution dans l'eau de formation ;
- dans les aquifères salins profonds, l'acidité produite par la dissolution du CO₂ pourra conduire à la remobilisation de certains éléments-traces (Kharaka, 2007), potentiellement toxiques, présents à l'état de précipités dans le milieu souterrain profond (métaux lourds, actinides) ; cette remobilisation pourra également être facilitée par des impuretés qui seraient présentes dans le CO₂ injecté (Trofimov *et al.*, 2004).

d'apparition est d'une fois tous les 100 ans) a une probabilité d'occurrence faible sur une période de référence de 1 an (probabilité de l'ordre de 0,01 – sans être toutefois égale à cette valeur), mais une probabilité d'occurrence proche de 1 sur une période de référence de 1 000 ans : à cette échelle de temps, la crue se produira de manière quasiment certaine.

La prise en compte de cette dimension est capitale dans le cas d'une filière qui aura plusieurs périodes de vie bien distinctes. En effet, ces périodes ont des durées variables, ce qui va influencer sur la probabilité d'occurrence de la cause d'un scénario de risque. Cela implique de raisonner non plus en deux mais en trois dimensions comme illustré sur la figure 2 : gravité, probabilité, temps [Toulhoat *et al.*, 2009].

Nous avons illustré cette démarche en considérant trois périodes de vie : la période d'exploitation, pendant laquelle les quatre maillons de la chaîne sont en fonctionnement (*a priori*, une cinquantaine d'années au maximum) ; la période de surveillance (150 à 200 ans maximum) durant laquelle les puits d'injection sont comblés puis une surveillance active a lieu « monitoring » – ultérieurement lorsque ce monitoring s'arrête les populations conservent la mémoire du site stockage ; la période de long terme, au cours de laquelle l'existence même du stockage et des risques associés est susceptible d'être oubliée (700 à 800 ans, l'horizon à considérer étant une durée de vie totale du stockage de 1 000 ans). Ainsi la figure 3 montre les principaux scénarios susceptibles d'apparaître, pour ce qui concerne le maillon « injection » seulement, au cours de ces trois périodes. Pour chaque période figure une grille dans un plan « gravité-probabilité », sur laquelle les scénarios sont représentés par un cercle où figure le lien « Cause → Phénomène ». Précisons que la démarche est ici illustrée avec des échelles simplifiées de gravité et de probabilité, constituées de seulement 3 catégories qui sont identifiées par de simples vocables qualitatifs.

En ce qui concerne le phénomène « fuite lente », FL, il peut être lié, soit à la dégradation du puits par corrosion (phénomènes physico-chimiques PC), soit à un événement extérieur de type séisme (S) :



- au cours de la période de surveillance, chaque cause est plus probable qu'au cours de la période d'exploitation car celle-ci est plus courte ; à long terme, la corrosion du puits d'injection devient même un phénomène presque certain, de par l'échelle de temps et le vieillissement des matériaux.
- pour la cause S la gravité est susceptible d'être plus forte que pour la cause PC, tant que du CO₂ à l'état supercritique, est présent dans le proche-puits, c'est-à-dire en période d'exploitation ou de surveillance : à long terme, les gravités sont supposées similaires car une grande partie du CO₂ injecté se trouve à l'état dissous. D'ailleurs pour la même raison on voit sur la figure que le phénomène « fuite brutale », FB, (provoqué par la même cause séisme S) n'est susceptible d'apparaître qu'en période d'exploitation ou de surveillance.

Face aux risques identifiés, il est essentiel de définir, le plus en amont possible, des mesures de maîtrise des risques (ou MMR) adaptées. Celles-ci devront avoir des objectifs précis et répondre à des critères stricts : soit

pour empêcher le scénario de se dérouler (cas des mesures de conception), soit pour en limiter la probabilité d'occurrence ou en réduire la gravité (cas des barrières de sécurité, ou de la protection des enjeux par des mesures telles la maîtrise de l'urbanisme) ; sans oublier les mesures de surveillance (ou « monitoring ») qui permettent dans tous les cas de suivre l'évolution du site de stockage, que ce soit pour vérifier qu'elle est conforme à ce qui était envisagé, ou au contraire pour détecter les éventuels problèmes.

Nous pouvons également envisager de représenter l'incertitude dans la représentation décrite ci-dessus : plus l'incertitude est grande (que ce soit en probabilité ou en gravité), plus le cercle représentant le scénario de risque est large sur le schéma. Il faut pour cela tenir compte de la sensibilité des modèles bien sûr, mais également de notre manque de connaissance, ou incertitude épistémique: notamment à long terme, il se peut en effet que le mécanisme étudié soit mal connu, ou que les conditions aux limites soient délicates à déterminer.

RÉFÉRENCES

Gombert Ph., Thoraval A., Poirot N. *Synthèse de l'état des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO₂*, partie 1, Programme EAT DRS07, rapport INERIS-DRS-08-95145-11842A.

Toulhoat P., Farret R., Gombert Ph. *Long term safety issues in geological CO₂ storage*, Rencontres Scientifiques de l'IFP, 27-29 mai 2009, Rueil-Malmaison, France.

Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G., Farret R. *Gas monitoring methods development and validation for underground geological CO₂ storage sites*, 1st iNTeg-Risk conference *Dealing with risks of tomorrow's technologies*, 2-4 June 2009, Stuttgart, Germany.

Gombert Ph., Farret R., Lahaie F. *Tunnels et Ouvrages Souterrains* N° 213, juin 2009, *Adaptation des outils d'analyse de risques aux futurs complexes de stockage géologique de CO₂*.

Gombert Ph., Farret R. *Definition of a risk analysis method combining long-term and short-term issues and application to the CCS*, 5th Trondheim Conference, 16-17 juin 2009, Trondheim, Norvège.

Farret R., Gombert Ph., Lahaie F., Salmon R., Toulhoat P. *A method for Risk Analysis of CCS combining CO₂ and impurities, long-term and short-term issues*, 1st S4FE Conference (Sustainable Fossil Fuel For Future Energy), 6-10 juillet 2009, Rome, Italie.

Zhang, Oldenburg and Benson, *Vadose zone remediation of carbon dioxide leakage from geological carbon dioxide sequestration sites*, *Vadose Zone Journal* 3:858-866 (2004).

Faisabilité du stockage du CO₂ en gisement houiller et étude de l'adsorption du CO₂ sur le charbon

{ Z. Pokryszka, D. Charrière, J.M. Brignon }

RÉFÉRENCES

Pokryszka Z., Krause E. Dégagement de méthane des couches de charbon ennoyées dans les mines arrêtées. Mining & Environment. Research Reports of Central Mining Institute. Quarterly, n°IV/2007 ISSN 1643-7608.

Charriere D., Pokryszka Z., Behra P. Thermodynamics and kinetic processes at coal interface for CO₂ geological storage 5th International conference *Interfaces against pollution*, 1-4 June 2008, Kyoto, Japan, Abstracts book p. 106.

Charriere D., Pokryszka Z., Behra P. Cinétique de sorption du CO₂ dans le cadre du stockage géologique du CO₂ dans le charbon. Insertion des grands ouvrages dans leur environnement : actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur (JNGG 2008), 18-20 juin 2008, Nantes. Paris : LCPC, 2008, p. 297-304.

Van Hemert P., Bruining J., Susanne E., Rudolph J., Wolf K.H., Billefont P., De Weireld G., Gensterblum Y., Krooss B., Prinz D., Li D., Charriere D., Busch A. Preliminary results of european interlab comparison. 2008 Asia pacific coalbed methane symposium, 22-24 september 2008, Brisbane, Australia. [communication orale].

Fort de son expérience unique dans le domaine du charbon et de son interaction avec les gaz, l'INERIS joue un rôle central dans l'étude de la faisabilité de stockage de CO₂ dans les gisements houillers, notamment français. Cette implication s'est notamment traduite par le développement du programme de recherche VELCO₂, qui contenait une très forte composante expérimentale et a contribué à constituer un laboratoire dédié à l'étude de l'adsorption « gaz-solide », mais qui s'est également attaché à intégrer à la réflexion les aspects économiques de la problématique. Une campagne ambitieuse d'essais de laboratoire a ainsi été menée pour différents environnements houillers français, permettant l'établissement d'isothermes caractéristiques de la nature des charbons et d'étudier le rôle de différents paramètres environnementaux sur le processus d'adsorption. Ce travail s'est notamment appuyé sur la thèse de Delphine Charrière soutenue en octobre 2009.

Parallèlement, a démarré depuis 2007, une recherche impliquant d'autres partenaires, intitulée CHARCO « Expérimentation et modélisation de l'échange de gaz dans les Charbons en vue d'un stockage du CO₂ - CharCO ». Financée par l'ANR, elle associe l'INERIS, le BRGM, l'INPL-LAEGO, l'Université d'Orléans, l'Université de Metz et TOTAL pour une durée de 4 ans.

Identification de sites potentiels de stockage en France

Il s'est agi de pré-identifier les sites potentiels français dans lesquels un stockage de CO₂ pour-

rait être techniquement envisageable, compte tenu d'exigences requises : volume suffisant, confinement satisfaisant, etc. L'analyse des données géologiques et hydrogéologiques de nombreux gisements houillers français a permis de retenir deux zones :

- le secteur ouest du bassin houiller lorrain correspondant aux trois champs de réserve inexploités (Carling-Saint-Avold, Faulquemont-Sud et La Houve-Ouest) ;
- le secteur Gardanne-Aix-Velaux-Vitrolles dans le bassin de l'Arc (Provence).

Les secteurs identifiés se caractérisent par la présence d'importants secteurs de gisement non exploités qui se situent à proximité d'un ou plusieurs émetteurs importants de CO₂ : la centrale thermique Huchet pour le bassin lorrain, le complexe pétrochimique de Berre et la centrale de Gardanne pour le bassin de Provence.

Développement des connaissances relatives au mécanisme d'adsorption de CO₂ sur le charbon

La part essentielle des travaux de laboratoire a consisté à estimer à l'aide d'une balance gravimétrique les capacités d'adsorption de certains charbons français et d'évaluer l'influence des paramètres affectant la liaison gaz-charbon – notamment pour les deux bassins houillers sélectionnés. Ainsi :

- la capacité d'adsorption de CO₂ varie très significativement selon les caractéristiques intrinsèques du charbon. La « maturité géologique » du charbon joue un rôle important dans la capacité d'adsorption de gaz. Pour les deux charbons sélectionnés, la capacité d'adsorption de CO₂ en phase gazeuse s'est

révélée importante : à une pression d'équilibre 5 MPa, elle est voisine de 2 mmol/g environ. La surface spécifique estimée pour ces deux charbons vis-à-vis du CO₂, est de l'ordre de 200 à 400 m² g⁻¹, valeurs également élevées ;

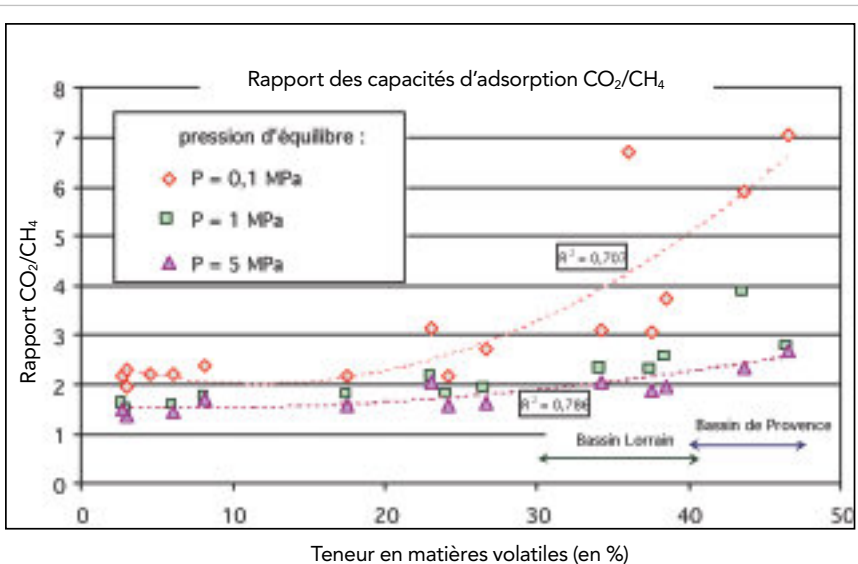
- la capacité d'adsorption du CO₂ en phase gazeuse à forte pression est en moyenne deux fois plus grande que celle du méthane (figure 1). De même, sa cinétique d'adsorption est bien plus rapide. Ceci confirme l'intérêt d'étudier la récupération assistée de CH₄ par injection de CO₂ dans les terrains houillers ;

- la teneur en eau des charbons réduit leur capacité d'adsorption de gaz, cependant cette influence est bien moindre pour le CO₂, comparativement au méthane. Des expériences avec des charbons à plus forte teneur en eau sont actuellement réalisées dans le cadre du programme ANR CHARCO ;

- la température est un paramètre qui joue un rôle ambivalent. La liaison gaz-charbon repose sur l'adsorption physique, il s'agit essentiellement de condensation de molécules de gaz sur la surface du solide : ce processus est donc favorisé par une diminution de température. D'un autre côté, une température plus faible réduit l'agitation thermique, et donc augmente le temps d'équilibre de sorption ;

- en ce qui concerne l'étude des isothermes d'adsorption pour la liaison CO₂-charbon, plusieurs modèles classiques ont été étudiés, et le modèle le plus simple de Langmuir s'ajuste aux données expérimentales avec un très bon coefficient de corrélation. La chaleur d'adsorption évaluée pour le CO₂ est comprise entre 20 et 30 kJ mol⁻¹, ce qui confirme que la liaison CO₂-charbon est une liaison physique ;

- la modélisation de cinétique de sorption à partir d'un modèle unipore a permis d'estimer un coefficient de diffusion de CO₂ dans le charbon de l'ordre de 10⁻¹² m² s⁻¹, qui peut servir de référence dans les modèles numériques de stockage de gaz dans le charbon. Cette faible valeur montre le besoin de résoudre le problème d'accessibilité des veines de charbon au gaz injecté. Par ailleurs, l'énergie d'activation du CO₂ à 25 °C a été estimée à 18 kJ mol⁻¹, montrant que peu d'énergie est nécessaire pour son adsorption, dès lors que le gaz se trouve en contact avec la structure interne du charbon.



Relation entre la capacité d'adsorption du CO₂ et du méthane pour certains charbons français en fonction de leur teneur en matières volatiles.

#1

Faisabilité technique et économique

Afin d'évaluer sur le plan technique la capacité de stockage du CO₂, plusieurs scénarios ont été étudiés, permettant d'estimer des capacités de stockage de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de tonnes de CO₂ dans chacun des deux secteurs étudiés.

Les résultats obtenus sont très encourageants. Par exemple, ils montrent, selon les hypothèses retenues (extension de la zone concernées, nombre de veines concernées, accessibilité du charbon), une capacité théorique pour stocker pendant une à plusieurs décennies les émissions de CO₂ des centrales thermiques situées à proximité des sites étudiés.

Diverses simulations économiques ont été mises en œuvre sur cette même centrale thermique qui produit environ 3 000 GWh et émet près de 3 Mt_{CO₂/an}. Une revue bibliographique a permis d'établir un coût global du système de l'ordre de 85 €₂₀₀₇/t CO₂, incluant l'ensemble de la chaîne, depuis le captage du CO₂ (qui constitue l'essentiel des coûts) jusqu'au stockage et à la surveillance, avec une hypothèse de captage par absorption sur les amines (MEA).

RÉFÉRENCES

Charrière D., Pokryszka Z., Behra P. *Study of coal surface characteristics for CO₂ geological storage*, International conference on coal and organic petrology, 22-27 september 2008, Oviedo.

Bonijoly D., Ha Duong M., Leynet A., Bonneville A., Broseta D., Fradet A., Le Gallo Y., Munier G., Lagny C., Lagneau V., Nedelec B., Pokryszka Z. *et al.* : METSTOR: a GIS to look for potential CO₂ storage zones in France 9th International conference on greenhouse gas technologies (GHGT 9), 20 novembre 2008, Washington, USA.

Charrière D., Pokryszka Z., Behra Ph., Effect of pressure and temperature on diffusion of CO₂ and CH₄ into coal from the Lorraine basin (France). Article soumis à la revue *International Journal of Coal Geology* en décembre 2008.

Il s'agit plutôt d'une estimation haute, et le coût pourrait être réduit jusqu'à des valeurs proches de 35 €₂₀₀₇/t CO₂ avec des hypothèses moins prudentes et en utilisant des techniques de captage plus innovantes au lieu de l'adsorption sur les amines (MEA).

Conclusions et perspectives

Les principaux résultats obtenus encouragent à la poursuite des recherches pour la mise en œuvre de stockage au sein d'horizons houillers. Les éléments scientifiques et économiques tendent à confirmer la faisabilité du processus, tout en identifiant que le

principal verrou technologique à lever sera vraisemblablement la diffusion du CO₂ au sein du massif.

Il reste donc à mieux quantifier ce dernier aspect, ainsi que la cinétique du phénomène, par des démarches menées parallèlement en laboratoire et *in situ*. Un intérêt tout particulier est à porter à la configuration d'une injection de CO₂ au sein d'un gisement déjà riche en CH₄ (phénomène d'adsorption-désorption). L'objectif est de valoriser le méthane comme une ressource énergétique (Enhanced Coal Bed Methane- ECBM).

ABSTRACT

Since 2006, the VELCO₂ project initiated by INERIS studied the geological storage of CO₂ in unminable coal seams. Two coal basins have been identified for a possible storage in France: Lorraine basin and Arc basin in Provence. Coal samples originated from these basins were selected to perform CO₂ and CH₄ sorption experiments with a suspension magnetic balance at INERIS.

Several conclusions may be made: (i) CO₂ is twice more adsorbed than CH₄, (ii) the moisture of coal is a parameter that negatively influences the adsorption capacity of gases, (iii) the sorption capacity of CO₂ on coal decreases with increasing temperature, but the sorption kinetics is accelerated. Experiments have shown that the interaction between coal and CO₂ is essentially a physical sorption and that the diffusion coefficient of CO₂ is about 10⁻¹² m² s⁻¹.

From laboratory results, CO₂ capacity storage has been evaluated for the two areas studied. These estimations are promising and show that the storage of CO₂ emitted by nearby energy facilities would be feasible for one to several decades. The feasibility was also studied from the economic point of view. All elements investigated show the interest of studying further this way of storing CO₂ - provided we success in enhancing the diffusivity of CO₂ within coal. High sorption potential of CO₂ also suggests that it will be possible to recover methane that is initially adsorbed in coal (Enhanced Coal Bed Methane ECBM).

Évaluation de l'impact mécanique d'un stockage de CO₂ dans un aquifère du bassin parisien

{ A. Thoraval }

Le projet GéoCarbone-PICOREF avait pour objectif de mener les études nécessaires pour sélectionner des sites adaptés au premier stockage géologique de CO₂ en France. Financé par l'ANR et coordonné par l'Institut Français du Pétrole (IFP), il s'est déroulé de 2006 à 2008 et a réuni 9 partenaires. Il a traité deux voies potentiellement favorables au stockage que sont l'injection de CO₂ en gisement d'hydrocarbures dépleted et l'injection en aquifère.

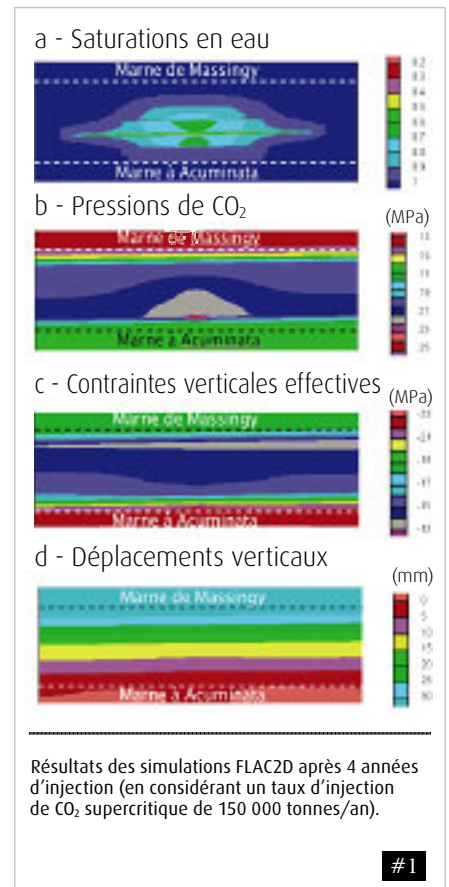
Le programme de travail prévu dans le cadre du volet « aquifère » comprend : la construction du modèle géologique ; des simulations de l'injection dans le réservoir ; des simulations de type « transport réactif » rendant compte des phénomènes d'interaction gaz-eau-minéraux dans le réservoir ; des simulations de l'impact mécanique des variations de pressions dans le réservoir ; l'identification des risques liés à l'injection de CO₂, qu'ils concernent la couverture, les puits, les installations de surface ou l'environnement.

Les travaux présentés se concentrent sur l'évaluation de l'impact mécanique de l'injection de CO₂ au sein d'un aquifère profond du bassin de Paris. Il s'agit plus précisément de quantifier les changements du champ de contrainte induits par les variations de pression de pore, ainsi que la déformation associée du réservoir et du recouvrement (ou couverture). Ces variations des contraintes pourraient induire des ruptures dans le réservoir ou son recouvrement, ainsi que le rejou de discontinuités rocheuses présentes.

Simulations réalisées à l'aide d'un modèle 2D biphasique avec le code FLAC2D

La géométrie du modèle correspond à un log simplifié de 11 couches homogènes s'étalant verticalement des marnes de Massingy jusqu'aux marnes à Acuminata. On simule une injection dans la couche d'oolithe blanche en imposant un débit de 150 000 tonnes de CO₂ supercritique par an pendant 4 ans. La simulation se poursuit ensuite, jusqu'à 10 ans après avoir interrompu l'injection. Le modèle permet de quantifier les variations de saturation et de pressions de pore (eau et CO₂), les changements du champ de contrainte induits par cette variation, ainsi que la déformation associée du réservoir (figure 1).

La démarche mise en œuvre pour évaluer l'impact mécanique de l'injection ne se limite pas au calcul classiquement réalisé d'une succession d'équilibres mécaniques consécutivement à la modification des pressions interstitielles dont les variations sont calculées par un autre modèle (dit « réservoir »). Il s'agit ici d'une modélisation couplant véritablement hydraulique et mécanique. Toutefois, les limites de l'outil utilisé nous ont contraints à opter pour une approche bidimensionnelle 2D (en déformations planes) et, par la suite, à estimer la valeur d'un débit équivalent à imposer dans le modèle permettant de retrouver, dans le plan 2D, une évolution des pressions des fluides et des degrés de saturation comparables à ceux obtenus avec un modèle 3D.



RÉFÉRENCES

Thoraval A., 2008. *Évaluation de l'impact d'un stockage de CO₂ dans un aquifère du bassin parisien sur l'intégrité mécanique des formations hôtes et du recouvrement, une contribution au programme ANR GEOCARBONE PICOREF*. Séance technique CFMR Géomécanique et stockage de CO₂. 23 octobre 2008, Paris.

Thoraval A., 2008. *Impact mécanique d'un stockage de CO₂ dans un aquifère du bassin parisien*. Contribution au programme ANR GEOCARBONE PICOREF. Rapport d'étude INERIS DRS-08-71084-04295A, 35 p. + 3 annexes.

Brosse É., Badinier G., Blanchard F., Caspard E., Collin P.-Y., Delmas J., Dezayes C., Dufournet A., Durst P., Fillacier S., Garcia D., Grataloup S., Hanot F., Hasanov V., Houel P., Kervévan C., Lansiaert M., Lescanne M., Menjot A., Monnet M., Mouglin P., Nedelec B., Poutrel A., Rachez X., Renoux P., Rigollet C., Ruffier-Meray V., Thimon I., Thoraval A., Vidal-Gilbert S., 2009. *Selection and characterization of geological sites able to host a pilot-scale CO₂ storage in the Paris Basin (PICOREF)*. À paraître prochainement dans la revue Oil & Gas Science and Technology.

Les principaux résultats obtenus dans le cas de la modalité de calcul représentant une injection de 150 000 tonnes/an de CO₂ montrent que les surpressions maximales de CO₂ et d'eau dans le réservoir atteignent respectivement 6 MPa et 5,5 MPa (après 4 ans d'injection). Les surpressions maximales dans le recouvrement marne de Massingy sont 2 fois plus faibles.

L'injection induit par ailleurs dans le réservoir une diminution maximale (après 4 ans d'injection) des contraintes effectives horizontales de 2,5 MPa et des contraintes effectives verticales de 6 MPa. Les variations sont 2 fois plus faibles dans le recouvrement. Compte tenu des estimations faites pour les valeurs de résistance des roches en traction et en cisaillement, aucune rupture n'est mise en évidence par le modèle dans le réservoir ou dans le recouvrement ni durant la phase d'injection de CO₂ ni postérieurement à celle-ci. Le risque de cisaillement des discontinuités rocheuses est également exclu, même si l'on suppose qu'elles ont une cohésion nulle et un angle de frottement de 30°.

On constate que les pressions, les variations de contraintes effectives et les déplacements augmentent logiquement lorsque l'on double le débit d'injection. Toutefois même dans ce cas, le modèle ne révèle aucune rupture dans la matrice rocheuse et aucun cisaille-

ment des discontinuités présentes, quelle que soit leur orientation. Une augmentation encore plus importante du débit d'injection (de l'ordre de 600 000 tonnes/an) pourrait toutefois induire un cisaillement des discontinuités orientées défavorablement (de 20° à 40° avec la verticale) et dont l'angle de frottement serait réduit du fait, par exemple, d'un remplissage argileux.

Ces résultats sont rassurants quant à la faisabilité du stockage sur le site étudié, et suggèrent des conditions à respecter en termes de pression et de débit pour éviter le risque de fracture et de cisaillement tant dans la roche hôte que dans le recouvrement.

Il faut toutefois souligner que les simulations réalisées se basent sur un certain nombre de simplifications, à commencer par celles déjà signalées conduisant à supposer que le site puisse être représenté par un modèle 2D à 11 couches homogènes. Par ailleurs, les interactions chimiques des fluides entre eux (l'eau et le CO₂, contrairement à la réalité, sont supposés non miscibles) et avec la matrice rocheuse ont été négligées. Dans les faits, le CO₂ dissous, acide, est susceptible de modifier non seulement la composition chimique de la saumure mais également la porosité matricielle des roches calcaires ou ses propriétés mécaniques.

ABSTRACT

Evaluation of the impact of CO₂ storage in an aquifer of the Paris Basin on the mechanical integrity of the reservoir and caprock formations.

The objective of PICOREF project was to select and characterize geological sites where CO₂ storage in permeable reservoir could be tested at pilot scale. INERIS has contributed to that project by evaluating the mechanical impact of CO₂ injection (about 150 kt per year) into a deep saline aquifer (Dogger). As the modelling work was achieved before the results of the reservoir-engineering model were available, it was decided to test a full-coupled approach where effective stresses, total strains and pore pressure are resolved in the same set of «hydro-mechanical» equations. The two-dimensional mechanical FLAC2D code, and especially the two-phase flow option, was used for these simulations. Due to the 2-D nature of the model, an equivalent flow rate had to be calculated in order to return the same pressure and saturation values as those obtained in 3-D. No chemical interaction between fluid and mineral phases was taken into account in the simulation. The main results are the following, after the 4-years period of injection: 66 MPa and 5,5 MPa are the maximum overpressure values reached in the reservoir, respectively for CO₂ and water phase; horizontal and vertical effective stress variations are respectively 2,5 MPa and 6 MPa; the maximum induced vertical displacement reaches 3 cm, at the top of the reservoir ; no rock-mass failure is computed either for the reservoir or for the caprocks during the injection period and after ; the risk of fractures shearing is null, if one assumes that their friction angle is larger than 30°.

Publications

Liste des articles parus dans les revues à comité de lecture ou « proceedings » à diffusion large, entre le 30 juin 2008 et le 31 juillet 2009.

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

Risques chroniques

2008

PERY A.R.R., GUST M., VOLLAT B., MONS R., RAMIL M., FINK G., TERNES T., GARRIC J. Fluoxetine effects assessment on the life cycle of aquatic invertebrates. *Chemosphere*, 2008, vol. 73, n° 3, p. 300-304.

DOORNAERT B., **DUCHENE L.**, **BOUDET C.** Proposition d'une méthode empirique de construction de valeurs toxicologiques de référence pour des effets sensibilisants après une exposition cutanée. *Environnement Risques & Santé*, 2008, vol. 7, n° 4, p. 285-292.

MOLINA-MOLINA J.M., ESCANDE A., PILLON A., GOMEZ E., PAKDEL F., CAVAILLES V., OLEA N., **AIT-AISSA S.**, BALAGUER P. Profiling of benzophenone derivatives using fish and human estrogen receptor-specific in vitro bioassays. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2008, vol. 232, n° 3, p. 384-395.

MOURIEC K., PELLEGRINI E., **BRION F.**, ANGLADE I., PAKDEL F., KAH O. Aromatase is expressed in progenitor cells in the brain of adult zebrafish. *Cybiurn*, 2008, vol. 32, n° 2 suppl., p. 28-30.

AMODEO T., **DUTOUQUET C.**, TENEGAL, GUIZARD B., MASKROT H., **LE BIHAN O.**, **FREJAFON E.** On-line monitoring of composite nanoparticles synthesized in a pre-industrial laser pyrolysis reactor using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2008, vol. 63, n° 10, p. 1183-1190.

BESSAGNET B., MENUT L., **AYMOZ G.**, CHEPFER H., VAUTARD R. Modeling dust emissions and transport within Europe: the Ukraine march 2007 event. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2008, vol. 113, n° D15, art. n° D15202.

SANCHEZ W., **PICCINI B.**, DITCHE J.M., **PORCHER J.M.** Assessment of seasonal variability of biomarkers in three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus L.*) from a low contaminated stream: implication for environmental biomonitoring. *Environment International*, 2008, vol. 34, n° 6, p. 791-798.

PERY A.R.R., GEFARD A., CONRAD A., MONS R., GARRIC J. Assessing the risk of metal mixtures in contaminated sediments on *Chironomus riparius* based on cytosolic accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, vol. 71, n° 3, p. 869-873.

DELERY L., **CHIAPPINI L.**, **CIOLELLA A.** Les pressings : exposition au tétrachloroéthylène et risques sanitaires. *Environnement Risques & Santé*, 2008, vol. 7, n° 5, p. 331-340.

HOLLINGSWORTH A., ENGELEN R.J., TEXTOR C., BENEDETTI A., BOUCHER O., CHEVALLIER F., DETHOF A., ELBERN H., ESKEH H., FLEMMING J., GRANIER C., KAISER J.W., MORCRETTE J.J., RAYNER P., PEUCH V.H., **ROUIL L.**, SCHULTZ M.G., SIMMONS A.J. Toward a monitoring and forecasting system for atmospheric composition: the GEMS project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, vol. 89, n° 8, p. 1147-1164.

KINANI S., BOUCHONNET S., BOURCIER S., CREUSOT N., **PORCHER J.M.**, **AIT-AISSA S.** Extraction and purification procedures for simultaneous quantification of phenolic xenoestrogens and steroid estrogens in river sediment by gas chromatography/ion trap mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2008, vol. 22, n° 22, p. 3651-3661.

AMANN M., DERWENT D., FORSBERG B., HANNINEN O., HURLEY F., KRZYZANOWSKI M., DE LEEUW F., LIU S.J., **MANDIN C.**, SCHNEIDER J., SCHWARZE P., SIMPSON D. Health risks of ozone from long-range transboundary air pollution. Copenhagen: World Health Organisation, 2008, 93 p.

SMITH T.J., **BOIS F.Y.**, LIN Y.S., **BROCHOT C.**, **MICALLEF S.**, KIM D., KELSEY K.T. Quantifying heterogeneity in exposure-risk relationships using exhaled breath biomarkers for 1,3-butadiene exposure. *Journal of Breath Research*, 2008, vol. 2, n° 3, art. 037018.

WOODRUFF T.J., ZEISE L., AXELRAD D.A., GUYTON K.Z., JANSSEN S., MILLER M., MILLER G.G., SCHWARTZ J.M., ALEXEEFF G., ANDERSON H., BIRNBAUM L., **BOIS F.**, COGLIANO V.J., CROFTON K., EULING S.Y., FOSTER P.M.D., GERMOLEC D.R., GRAY E., HATTIS D.B., KYLE A.D., LUEBKE R.W., LUSTER M.I., PORTIER C., RICE D.C., SOLOMON G., VANDENBERG J., ZOELLER R.T. Moving upstream: evaluating adverse upstream end points for improved risk assessment and decision-making. *Environmental Health Perspectives*, 2008, vol. 116, n° 11, p. 1568-1575.

PERY A.

Évaluation du risque écotoxicologique dans les milieux aquatiques à partir d'expérimentations de laboratoire. Perspectives offertes par la modélisation. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 2008, n° 9, p. 101-110.

ELGRABLI D., ABELLA-GALLART S., ROBIDEL F., ROGERIEUX F., BOCZKOWSKI J., LACROIX G.

Induction of apoptosis and absence of inflammation in rat lung after intratracheal instillation of multiwalled carbon nanotubes. *Toxicology*, 2008, vol. 253, n° 1-3, p. 131-136.

KESMINIENE A., EVRARD A.S., IVANOV V.K., MALAKHOVA I. V., KURTINAITIS J., STENGREVICAS A., TEKKELE M., ANSPAUGH L.R., BOUVILLE A., CHEKIN S., CHUMAK V.V., DROZDOVITCH V., GAPANOVICH V., GOLOVANOV I., **HUBERT P.**, ILLICHEV S. V., KHAIT S. E., KRYUCHKOV V. P., MACEIKA E., MAKSYOUTOV M., MIRKHAIDAROV A. K., POLYAKOV S., SHCHUKINA N., TENET V., TSEKHOVICH T. I., TSYKALO A., TUKOV A. R., CARDIS E.

Risk of hematological malignancies among Chernobyl liquidators. *Radiation Research*, 2008, vol. 170, n° 6, pp. 721-735.

MALHERBE L., CARDENAS G., COLIN P., YAHYAOUI A.

Using different spatial scale measurements in a geostatistically based approach for mapping atmospheric nitrogen dioxide concentrations. Application to the French Centre region. *Environmetrics*, 2008, vol. 19, n° 7, pp. 751-764.

MANDIN C., PERNELET-JOLY V., LE MOULLEC Y., MILLET M., ALARY R., GLORENNEC P.

Qualité de l'air dans les parcs de stationnement couverts : données disponibles, problématique et proposition de valeurs de gestion. *Pollution Atmosphérique*, 2008, n° 198-199, pp. 149-159.

VAUTARD R., SCHAAP M., BERGSTROM R., **BESSAGNET B.**, BRANDT J., BUILTJES P.J.H., CHRISTENSEN J.H., CUVELIER C., FOLTESCU V., GRAF A., KERSCHBAUMER A., KROL M., ROBERTS P., ROUIL L., STERN R., TARRASON L., THUNIS P., VIGNATI E., WIND P.
Skill and uncertainty of a regional air quality model ensemble. *Atmospheric Environment*. [accepté pour publication 24/09/2008]

DULIO V., MORIN A.

Reporting requirements for priority substances. QUEVAUVILLER P., BORCHERS U., THOMPSON C., SIMONART T. (Eds.). *The water framework directive. Ecological and chemical status monitoring*. London: John Wiley & Sons, 2008, pp. 389-408. (Water Quality Measurements)

SLOBODNIK J., **DULIO V.**

NORMAN - Network of Reference Laboratories for Monitoring of Emerging Substances. QUEVAUVILLER P., BORCHERS U., THOMPSON C., SIMONART T. (Eds.). *The water framework directive. Ecological and chemical status monitoring*. London: John Wiley & Sons, 2008, pp. 357-369. (Water Quality Measurements)

BILLOIR E., DELIGNETTE-MULLER M.L., **PERY A.R.R., CHARLES S.**

A bayesian approach to analyse ecotoxicological data. *Environmental Science & Technology*, 2008, vol. 42, n° 23, pp. 8978-8984.

AMMARI M., JACQUET A., LECOMTE A., SAKLY M., ABDELMELEK H., DE SEZE R.

Effect of head-only sub-chronic and chronic exposure to 900-MHz GSM electromagnetic fields on spatial memory in rats. *Brain Injury*, 2008, vol. 22, n° 13-14, pp. 1021-1029.

ELGRABLI D., FLORIANI M., ABELLA-GALLART S., MEUNIER L., GAMEZ C., DELALAIN P., ROGERIEUX F., BOCZKOWSKI J., LACROIX G.

Biodistribution and clearance of instilled carbon nanotubes in rat lung. *Particle and Fibre Toxicology*, 2008, vol. 5, art. n° 20.

DABO D.

Evaluation de l'impact environnemental des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) utilisés en technique routière. Thèse de doctorat de l'École des mines de Paris. Présentée et soutenue publiquement le 19 décembre 2008.

AMMARI M.

Effets des radiofréquences type GSM ou UMTS sur le comportement, le stress oxydant et le métabolisme oxydatif cérébral chez le rat. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII Denis Diderot. Présentée et soutenue publiquement le 25 novembre 2008.

ELGRABLI D.

Toxicité et clairance pulmonaires des nanotubes de carbone. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII Denis Diderot. Présentée et soutenue publiquement le 1er décembre 2008.

FAGAUT Y.

A thermal desorption method for determining atmospheric Semi-Volatile Organic Compound concentrations. Thèse de doctorat de l'Université d'Hertfordshire (UK). Présentée et soutenue publiquement le 23 janvier 2008.

AMODEO T.

Caractérisation de l'interaction d'aérosols avec un plasma induit par laser : application à la métrologie de nano-particules manufacturées. Thèse de doctorat de l'Université de Picardie. Présentée et soutenue publiquement le 9 octobre 2008.

2009

DENYS S., TACK K., CABOCHE J., DELALAIN P.

Bioaccessibility, solid phase distribution, and speciation of Sb in soils and in digestive fluids.

Chemosphere, 2009, vol. 74, n° 5, pp. 711-716.

BADREDDINE R., FRANCOIS D.

Assessment of the PCDD/F fate from MSWI residue used in road construction in France.

Chemosphere, 2009, vol. 74, n° 3, pp. 363-369.

VIVANCO M.G., PALOMINO I., VAUTARD R., BESSAGNET B., MARTIN F., MENUT L., JIMENEZ S.

Multi-year assessment of photochemical air quality simulation over Spain.

Environmental Modelling and Software, 2009, vol. 4, n° 1, pp. 63-73.

ROUIL L., HONORE C., VAUTARD R., BEEKMANN M., BESSAGNET B., MALHERBE L., MELEUX F., DUFOUR A., ELICHEGARAY C., FLAUD J.M., MENUT L., MARTIN D., PEUCH A., PEUCH V.H., POISSON N.

PREV'AIR: an operational forecasting and mapping system for air quality in Europe.

Bulletin of the American Meteorological Society. [accepté pour publication en 2009]

MANDIN C.

Santé, confort, qualité de l'air.

AFEX. Construire pour un développement durable. Paris : AFEX, 2009, pp. 42-46.

DELERY L., CICOLELLA A.

Expositions professionnelles et environnementales aux endotoxines émises en milieu agricole et industriel : revue de la littérature.

Environnement Risques & Santé, 2009, vol. 8, n° 1, p. 35-45.

DE MEIJ A., THUNIS P., BESSAGNET B., CUVELIER C.

The sensitivity of the CHIMERE model to emissions reduction scenarios on air quality in Northern Italy.

Atmospheric Environment, 2009, vol. 43, n° 11, p. 1897-1907.

CHIAPPINI L., DELERY L., LEOZ-GARZIANDIA E., BROUARD B., FAGAULT Y.

A first french assessment of population exposure to tetrachloroethylene from small dry cleaning facilities.

Indoor Air, 2009, vol. 19, n° 3, pp. 226-233.

BOIS F.

GNU MCSim: bayesian statistical inference for SBML-coded systems biology models.

Bioinformatics, 2009, vol. 25, n° 11, p. 1453-1454.

TONG S.K., MOURIEC K., KUO M.W., PELLEGRINI E., GUEGUEN M.M., BRION F., KAH O., CHUNG B.C.

A cyp19a1b-GFP (aromatase B) transgenic zebrafish line that expresses GFP in radial glial cells.

Genesis, 2009, vol. 47, n° 2, p. 67-73.

BENARD A., ROSE J., HAZEMANN J.L., PROUX O., TROTIGNON L., BORSCHNECK D., NONAT A., CHATEAU L., BOTTERO J.Y.

Modelling of Pb release during Portland cement alteration.

Advances in Cement Research, 2009, vol. 21, n° 1, p. 1-10.

SANCHEZ W., PORCHER J.M.

Fish biomarkers for environmental monitoring within the Water Framework Directive of the European Union.

TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2009, vol. 28, n° 2, p. 150-158.

STRUB M.P., LEPOT B., MORIN A.

Metrological aspects of collaborative field trials, including coping with unexpected events.

TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2009, vol. 28, n° 2, p. 245-261.

AL FARAJ A., CIESLAR K., LACROIX G., GAILLARD S., CANET-SOULAS E., CREMILLIEUX Y.

In vivo imaging of carbon nanotube biodistribution using magnetic resonance imaging.

Nano Letters, 2009, vol. 9, n° 3, p. 1023-1027.

COLLET S.

Les émissions de polluants par les foyers domestiques.

Pollution Atmosphérique, n° spécial mars 2009, p. 83-90.

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.

Pollution Atmosphérique, n° spécial mars 2009, p. 121-133.

MANDIN C., EZRATTY V.

Combustibles solides, qualité de l'air intérieur et santé : une problématique majeure dans les pays en voie de développement.

Pollution Atmosphérique, n° spécial mars 2009, p. 161-166.

FRABOULET I., DURIF M., MALHERBE L.

Ambient air pollution associated to domestic wood burning heating systems.

Pollution Atmosphérique, n° spécial mars 2009, p. 167-168.

DANIAU C., DOR F., DENYS S., FLOCH-BARNEAUD A., DAB W.

Problèmes posés par la définition de l'état de référence des sols en santé environnementale.

Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2009, n° 54, p. 70-77.

PERY A., HENEGAR A., MOMBELLI E.

Maximum-likelihood estimation of predictive uncertainty in probabilistic QSAR modeling.

QSAR & Combinatorial Science, 2009, vol. 28, n° 3, p. 338-344.

KAH O., PELLEGRINI E., MOURIEC K., DIOTEL N., ANGLADE I., VAILLANT C., THIEULANT M.L., TONG S.K., BRION F., CHUNG B.C., PAKDEL F.

Oestrogènes et neurogénèse : de nouvelles fonctions pour une vieille hormone. Leçons tirées du poisson zèbre.

Journal de la Société de Biologie, 2009, vol. 203, n° 1, p. 29-38.

SANCHEZ W., PORCHER J.M.

Utilisation des biomarqueurs pour la caractérisation de l'état écotoxicologique des masses d'eau.

Techniques Sciences et Méthodes, 2009, n° 5, p. 29-38.

LANONE S., **ROGERIEUX F.**, GEYS J., DUPONT A., **MAILLOT-MARECHAL E.**, BOCZKOWSKI J., **LACROIX G.**, HOET P.
Comparative toxicity of 24 manufactured nanoparticles in human alveolar epithelial and macrophage cell lines.
Particle and Fibre Toxicology, 2009, vol. 6, n° 14.

DE WAAL P.P., LEAL M.C., GARCIA-LOPEZ A., LIARTE S., DE JONGE H., **HINFRAY N.**, **BRION F.**, SCHULZ R.W., BOGERD J.
Oestrogen-induced androgen insufficiency results in a reduction of proliferation and differentiation of spermatogonia in the zebrafish testis.
Journal of Endocrinology, 2009, vol. 202, p. 287-297.

PINEL-MARIE M.L., SPARFEL L., **DESMOTS S.**, FARDEL O.
Aryl hydrocarbon receptor-dependent induction of the NADPH oxidase subunit NCF1/p47 (phox) expression leading to priming of human macrophage oxidative burst.
Free Radical Biology and Medicine [accepté pour publication 18/06/2009].

CICOLLELA A.
L'évaluation des risques environnementaux.
BOURDILLON F. *Traité de prévention*. Paris : Flammarion, 2009.

DE GUILLEBON B., **LEMAZURIER E.**, SILLION B.
Quelle recherche pour accompagner la mise en œuvre de REACH ?
Actualité Chimique, 2009, n° 327-328, p. 4-7.

Risques accidentels

2008

HEBRARD J., LACOME J.M.
Evaluation of two-phase flow models for accidental release and comparison with experimental data.
Proceedings of the 11th International conference multiphase flow in industrial plant (MFIP 2008), 7-10 september 2008, Palermo, Italy, p. 747-754.

BRACONNIER R., CHAINEAUX J., TRIOLET J., FONTAINE J.R., SALLE B.
Mesures du flux d'évaporation de liquides volatils dans des ambiances de travail.
Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 2008, n° 212, p. 61-71.

LE COZE J.C.
Complexity and learning from accidents.
SWEDISH RESCUE SERVICES AGENCY. *Learning from accidents: an anthology based on thoughts and ideas from young research fellows*. Karlstad : SRSA, 2008, p. 161-193.

JANES A., CARSON D., ACCORSI A., CHAINEAUX J., TRIBOUILLOY B., MORAINVILLERS D.
Correlation between self-ignition of a dust layer on a hot surface and in baskets in an oven.
Journal of Hazardous Materials, 2008, vol. 159, n° 2-3, p. 528-535.

LANTERNIER B., LYONNET P., TOSCANO R.
Mechanical component reliability, hazard proportionnal model.
Mécanique & Industries, 2008, vol. 9, n° 5, p. 397-405.

PRATS A.
Analyse environnementale.
Techniques de l'Ingénieur, 2008, n° G5002, 5 p.

DAUBECH J.
Accélération des flammes de prémélange gazeux sous l'effet d'un gradient de réactivité.
Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans. Présentée et soutenue publiquement le 18 juin 2008.

BRONNER C.
Utilisation de données opérationnelles pour l'aide à la décision en situations accidentelles.
Thèse de doctorat de l'Université Paris V René Descartes. Présentée et soutenue publiquement le 30 juin 2008.

VIGNES A.
Développement de nouvelles méthodologies d'évaluation des risques accidentels liés à la production et l'utilisation de nanoparticules.
Thèse de doctorat de l'INPL. Présentée et soutenue publiquement le 13 octobre 2008.

2009

TERVONEN T., LINKOV I., FIGUEIRA J.R., STEEVENS J., CHAPPELL M., MERAD M.

Risk-based classification system of nanomaterials.

Journal of Nanoparticle Research, 2009, vol. 11, n° 4, p. 757-766.

SHUYAN W., XIANG L., HUILIN L., BOUILLARD J., QIAOQUN S., SHUAI W.

Simulations of flow behavior of fuel particles in a conceptual helium-cooled spout fluidized bed nuclear reactor.

Nuclear Engineering and Design, 2009, vol. 239, n° 1, p. 106-115.

RIVIERE C., MARLAIR G.

BIOSAFUEL, a pre-diagnosis tool of risks pertaining to biofuels chains.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, vol. 22, n° 2, p. 228-236.

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.

Chemical Physics Letters, 2009, vol. 467, n° 4-6, p. 407-411.

SHUYAN W., LIJIE Y., HUILIN L., LONG Y., BOUILLARD J., ZHENHUA H.

Numerical analysis of interphase heat and mass transfer of cluster in a circulating fluidized bed.

Powder Technology, 2009, vol. 189, n° 1, p. 87-96.

VENETSANOS A.G., PAPANIKOLAOU E., DELICHATSIOS M., GARCIA J., HANSEN O.R., HEITSCH M., HUSER A., JAHN W., JORDAN T., LACOME J.M., LEDIN H.S., MAKAROV D., MIDDHA P., STUDER E., TCHOUVELEV A.V., TEODORCZYK A., VERBECKE F., VAN DER VOORT M.M.

An inter-comparison exercise on the capabilities of CFD models to predict the short and long term distribution and mixing of hydrogen in a garage.

International Journal of Hydrogen Energy [accepté pour publication 15/01/2009].

NGUYEN Q.B., MEBARKI A., AMI SAADA R., MERCIER F., REIMERINGER M.

Integrated probabilistic framework for domino effect and risk analysis.

Advances in Engineering Software, 2009, vol. 40, n° 9, p. 892-901.

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.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, vol. 22, n° 4, p. 408-416.

MEBARKI A., NGUYEN Q.B., MERCIER F.

Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part II: Projectile trajectory and probability of impact.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, vol. 22, n° 4, p. 417-425.

DUPONT L.

Ammonia solutions explosivity.

Process Safety Progress, 2009, vol. 28, n° 1, p. 36-44.

CIAME (Dir.), AUGÉ-BLUM I., BAYART M., WAHL M., BENOIT G., BENOIT E., CAUFFRIEZ L., CHARPENTIER P., CHOVIN A., CICCOTELLI J., CONRARD B., DRANGUET J.M., FAE E., GENON-CATALOT D., THIRIET J.M., WEEEXSTEEN J.
Réseaux de terrain. Critères de sûreté de fonctionnement. Hermes, 2009, 243 p. (Traité IC2, série systèmes automatisés).

PROUST C., DAUBECH J., LEPRETTE E.

Differentiated routes for the simulation of the consequences of explosions.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, vol. 22, n° 3, p. 288-294.

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, 2009, vol. 166, n° 2-3, p. 916-924.

Risques du sol et du sous-sol

2008

LOPEZ P., THORAVAL A., RAHMANI I., BUZZI O., BOULON M.

Advances in constitutive modelling of jointed rock hydro mechanical interactions at laboratory scale.

Studia Geotechnica et Mechanica, 2008, n° 1-2, p. 223-233.

LAOUAFA F., KAZMIERCZAK J.B., ARMAND G.

Three-dimensional and time stepping modelling of the whole Meuse Haute-Marne URL.

Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2008, vol. 33, supplement 1, p. S448-S456.

AL HEIB M.

State of the art of the prediction methods of short and long-term ground movements (subsidence and sinkhole) for the mines in France.

MICHEL T., FOURNIER H. (Eds.). Coal geology research progress. Nova Science Publishers: 2008, p. 53-76.

CAPPA F., GUGLIELMI Y., RUTQVIST J., TSANG C.F., THORAVAL A.

Estimation of fracture flow parameters through numerical analysis of hydromechanical pressure pulses.

Water Resources Research, 2008, vol. 44, art. n° W11408.

CHAMBON R., DARVE F., LAOUAFA F.

Incremental constitutive relations for soils.

HICHER P.Y., SHAO J.F. (Eds.). Constitutive modeling of soils and rocks. London: ISTE and John Wiley & Sons, 2008, p. 211-260.

KAZMIERCZAK J.B., LAOUAFA F.,
ARMAND G.

Intérêt d'une modélisation tridimensionnelle phasée dans le cas d'un ouvrage souterrain complexe : exemple du laboratoire expérimental souterrain de l'ANDRA à Bure. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 2008, n° 208, p. 259-264.

WASSERMANN J., SENFAUTE G.,
AMITRANO D., HOMAND F.

Evidence of dilatant and non-dilatant damage processes in oolitic iron ore: P-wave velocity and acoustic emission analyses. *Geophysical Journal International* [accepté pour publication 28/10/2008].

CLEMENT C.

Reconnaissance et auscultation des contraintes et déformations d'un versant rocheux instable sous sollicitation thermique. *Thèse de doctorat de l'INPL. Présentée et soutenue publiquement le 28 octobre 2008.*

2009

BALLAND C., MOREL J., ARMAND G.,
PETITIT W.

Ultrasonic velocity survey in Callovo-Oxfordian argillaceous rock during shaft excavation.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, vol. 46, n° 1, p. 69-79.

CLEMENT C., MERRIEN-SOUKATCOFF V.,
DUNNER C., GUNZBURGER Y.

Stress measurement by overcoring at shallow depths in a rock slope : scattering of input data and results.

Rock Mechanics and Rock Engineering [accepté pour publication en 2009].

GUEGUEN Y., DEFFONTAINES B., FRUNEAU B.,
AL HEIB M., DE MICHELE M., RAUCOULES D.,
GUISE Y., PLANCHENAULT J.

Monitoring of the residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and persistent scatterer interferometry (Northern France).

Journal of Applied Geophysics [accepté pour publication 08/02/2009].

BLAISE B., CIACOMOTTO J., TRIBA M.,
TOULHOAT P., PIOTTO M., EMSLEY L.,
SEGALAT L., DUMAS M., ELENA B.

Metabolic Profiling Strategy of *Caenorhabditis elegans* by Whole-Organism Nuclear Magnetic Resonance.

Journal of Proteome Research, 2009, vol. 8, n° 5, p. 2542-2550.

ASLANIAN D., MOULIN M., OLIVET J.L.,
NTERNEHR P., MATIAS L., BACHE F.,
RABINEAU M., NOUZE H., KLINGELHOEFER F.,
CONTRUCCI I., LABAILS C.

Brazilian and African passive margins of the central segment of the South Atlantic Ocean: Kinematic constraints.

Tectonophysics, 2009, vol. 468, n° 1-4, p. 98-112.

LAOUAFA F., PRUNIER F., DARVE F.

3D bifurcation analysis in geomaterials. Investigation of the second order work criterion.

European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2009, vol. 13, n° 2, p. 135-147.

PRUNIER F., **LAOUAFA F., LIGNON S., DARVE F.**
Bifurcation modeling in geomaterials: from the second-order work criterion to spectral analyses. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2009, vol. 33, n° 9, p. 1169-1202.

PRUNIER F., NICOT F., DARVE F., **LAOUAFA F.,**
LIGNON S.

Three-dimensional multiscale bifurcation analysis of granular media.

Journal of Engineering Mechanics, 2009, vol. 135, n° 6, p. 493-509.

BONIJOLY D., HA DUONG M., LEYNET A.,
BONNEVILLE A., BROSETA D., FRADET A.,
LE GALLO Y., MUNIER G., **LAGNY C.,**
LAGNEAU V., AUZENDE A.L., BERTHIAUD J.,
BIALKOWSKI A., BOSSIE-CODREANU D., BROSSE
E., BUREAU G., **CAMPOS A.S., FILLACIER S.,**
NEDELEC B., POKRYSZKA Z., RAMBOURG D.,
RIGOLLET C., **ROUX P., SAYSSET S.**

METSTOR: a GIS to look for potential CO₂ storage zones in France.

Energy Procedia, 2009, vol. 1, n° 1, p. 2809-2816.

GRATALOUP S., BONIJOLY D., BROSSE E.,
DREUX R., GARCIA D., HASANOV V.,
LESCANNE M., RENOUX P., **THORAVAL A.**

A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: case of the Paris Basin.

Energy Procedia, 2009, vol. 1, n° 1, p. 2929-2936.

FABRIOL H., BECQUEY M., HUGUET F.,
LESCANNE M., PIRONON J., **POKRYSZKA Z.,**
HOANG D.V.

Results of investigations to design a monitoring program for a CO₂ storage project in the Paris Basin (France)

Energy Procedia, 2009, vol. 1, n° 1, p. 2285-2291.

CHARMOILLE A., BINET S., BERTRAND C.,
GUGLIELMI Y., MUDRY J.

Hydraulic interactions between fractures and bedding planes in a carbonate aquifer studied by means of experimentally induced water-table fluctuations (Coaraze experimental site, southeastern France).

Hydrogeology Journal [accepté pour publication 07/04/2009].

IDRIS J., **AL HEIB M., VERDEL T.**

Numerical modelling of masonry joints degradation in built tunnels.

Tunnelling and Underground Space Technology [accepté pour publication 14/05/2009].

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, p. 142-154.



Sources Mixtes

Groupe de produits issu de forêts
 bien gérées, de sources contrôlées
 et de bois ou fibres recyclés.
 www.fsc.org Cert no. FCBA-COC-000067
 © 1996 Forest Stewardship Council



ISSN 1765-1379 - Dépôt légal : novembre 2009

Imprimé sur Symbol Freelifife sans chlore issu de forêts gérées durablement.



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, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer.



*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