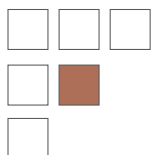


RAPPORT SCIENTIFIQUE 2007-2008



INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*



Sommaire

1 Avant-propos
Vincent Laffèche, Directeur général

3 Éditorial
Pierre Toulhoat, Directeur scientifique

6 Stratégie de recherche et organisation

8 Panorama 2007-2008 des principaux faits marquants

11 Accords signés par l'INERIS

12 EU-VRI : une expertise européenne collective et pluridisciplinaire au service de la gestion intégrée des risques

15 Une politique doctorale plus ambitieuse

17 Le Conseil scientifique

18 Les Commissions scientifiques

20 Programme 189

21 Programmes de recherche soutenus par l'ANR

22 L'INERIS, partenaire de 24 programmes européens

23 Indicateurs du Contrat d'objectifs 2006-2010

24 Vie scientifique 2007-2008 Principaux résultats

26 Substances et produits chimiques

28 Les modèles toxicocinétiques physiologiques (PBPK)

30 Effets du cuivre sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques

34 Contexte : REACH, les enjeux de la recherche

36 La modélisation QSAR

38 Atelier de Réflexion Prospective REACH

41 Vers la prédiction des propriétés d'explosibilité des substances chimiques par les outils de la chimie quantique et les méthodes statistiques QSPR

46 Approche multi-biomarqueurs pour la surveillance des écosystèmes aquatiques

50 La présence de nanotubes de carbone dans l'environnement présente-t-elle un risque pour notre santé ?

53 Téléphonie mobile et neurotoxicité sur le système nerveux central

58 Risques technologiques et pollutions

60 La recherche et l'innovation au cœur des défis de l'hydrogène, vecteur d'énergie

62 **Transfert et caractérisation des contaminants**
Caractérisation chimique de la fraction polaire des particules dans l'air ambiant

65 Épisodes de pollution particulaire en Europe au printemps 2007

67 **Systèmes industriels complexes**
La prise en compte des facteurs organisationnels dans la maîtrise des risques

70 *Expertise - Logistique des marchandises dangereuses. Vers une évaluation globale des risques*

76 Modélisation du couplage incendie-ventilation en tunnel par une approche 3D

80 *Recherche partenariale - Évaluer les conséquences d'un incendie d'entrepôt : le Projet FLUMilag*

85 **Procédés et nouvelles technologies**
La sécurité de l'hydrogène

88 *Expertise - Projet DRIVE : étude expérimentale et numérique pour l'évaluation des risques liés à l'hydrogène*

93 Développement d'une méthodologie pour la conduite en sécurité d'un réacteur continu et intensifié

98 Risques liés à l'après-mine, aux stockages souterrains et risques naturels

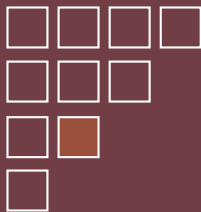
100 Captage, transport et stockage du CO₂

102 Développement d'une méthodologie de modélisation de l'endommagement du recouvrement des cavités dans le sel

105 Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection des cavités souterraines

109 Stockage géologique du CO₂ : capacité de stockage et surveillance des sites

113 Publications



AVANT-PROPOS

VINCENT LAFLÈCHE



DIRECTEUR GÉNÉRAL

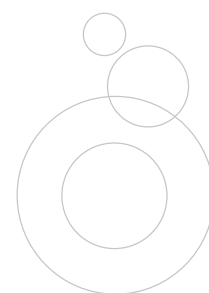
« **L**'innovation et la mise au point de nouvelles technologies sont indispensables pour faire face aux multiples défis que nous posent les exigences du développement durable. »

Cette analyse a largement marqué le Contrat d'objectifs de l'INERIS signé en septembre 2006. Elle met au cœur des missions de l'INERIS l'accompagnement de ce processus d'innovation qui consiste à caractériser et évaluer les risques à un stade précoce de la conception de nouveaux produits ou filières pour qu'ils soient directement sûrs et propres.

Une autre priorité a également présidé à l'élaboration du Contrat d'objectifs, mise en exergue par la délégation de parlementaires de la Commission « Développement durable et aménagement du territoire » au cours de leur visite à l'INERIS en décembre 2005. En soulignant le fait que le développement durable incluait une participation accrue des citoyens à la prise de décision publique, les parlementaires ont en effet encouragé l'Institut à développer la capacité de ses experts et chercheurs à participer à des débats publics.

Plus tard, le Grenelle de l'Environnement a conforté la volonté de l'INERIS de s'engager fermement dans cette voie. Ainsi, nous avons organisé, en 2008, des réunions mensuelles avec des représentants d'associations de consommateurs et d'associations de défense de l'environnement. Conçues autour de thématiques scientifiques très pointues, elles se veulent des lieux d'échanges et de partage pour construire, dans la durée, des relations de confiance. Cet exercice nouveau, qui va bien au-delà de la vulgarisation, est également riche d'enseignements pour les experts de l'INERIS, plus aguerris aux congrès scientifiques et au dialogue avec les gestionnaires des risques (entreprises et ministères). Enfin, ces réunions nous ont aussi convaincus que partager avec les différentes parties prenantes les résultats d'une expertise ou de travaux de recherche imposait préalablement un échange approfondi sur la formulation des questionnements scientifiques.

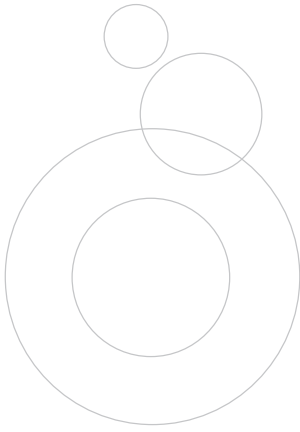
En s'appuyant sur les conclusions du séminaire annuel de notre Conseil scientifique et des trois commissions scientifiques spécialisées, l'INERIS a proposé à son Conseil d'administration du 29 mai 2008 de réfléchir à l'évolution de sa « gouvernance scientifique ». Elle consisterait à ouvrir à l'ensemble des parties prenantes une instance de dialogue, dont la forme reste encore à définir, qui jouerait un rôle décisif dans la définition de nos priorités dans les champs scientifiques et techniques.



“ **I**nnovation and the development of new technologies are essential to face the multiple challenges posed to us by the demands of sustainable development”. This analysis greatly marked the INERIS Objectives Contract signed in September 2006. It places the accompaniment of this process of innovation, which consists of characterizing and assessing risks at an early stage in the design of new products or activities so that they are directly safe and clean, at the heart of INERIS's missions.

Another priority also presided over the development of the Objectives Contract, highlighted by the delegation of parliamentarians from the “Sustainable development and land use planning” Commission during their visit to INERIS in December 2005. While emphasizing that sustainable development included increased participation by citizens in public decision making, they in fact encouraged the Institute to develop the ability of its experts and researchers to participate in public debates.

Later, the ‘Grenelle’ on the Environment¹ strengthened INERIS's wish to embark firmly on this path. For this reason, in 2008, we organized monthly meetings with representatives of consumer and environmental protection associations. Designed around very precise scientific themes, these meetings are intended to be places for discussion and sharing in order to build trusting relationships over time. This new practice, which goes far beyond extension, is also rich in lessons for INERIS's experts, who are more experienced with scientific congresses and dialogue with risk managers (companies and ministries). Lastly, these meetings also convinced us that sharing the results of an assessment or research work with the different stakeholders first required a deeper exchange on the formulation of scientific questions.



Cette évolution se retrouve au sein du Conseil Supérieur de la Recherche et de la Technologie (CSRT). En effet, en septembre dernier, la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Valérie Pécresse, a souhaité élargir la composition du CSRT en attribuant trois sièges supplémentaires à des membres issus du milieu associatif. Une mesure inscrite dans les conclusions du rapport du Comité Opérationnel « Recherche » (issu du Grenelle de l'Environnement) qu'elle avait mis en place avec Jean-Louis Borloo, ministre d'État chargé de l'Écologie, Comité auquel l'INERIS a activement participé.

La mise en place de l'Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES), chargée d'évaluer les établissements publics ayant des activités de recherche, modifiera également la « gouvernance scientifique » de l'Institut. Ainsi, nous réfléchissons à la création d'un Comité de visite (Visiting Committee). Constitué d'experts extérieurs, sa mission consisterait - en s'appuyant sur les travaux des trois commissions scientifiques spécialisées - à évaluer de manière globale l'activité scientifique de l'INERIS, tout en tenant compte de l'importance que revêtent pour l'Institut les activités d'expertise pour les pouvoirs publics et pour les entreprises.

Il est désormais acquis que les défis à relever pour parvenir à un développement durable relèvent nécessairement d'une participation accrue des citoyens à la décision publique. En tant qu'acteur scientifique et organisme d'expertise de premier plan, il appartient à l'INERIS de créer les conditions favorables d'un tel dialogue pour faire émerger les questions à traiter par la recherche et se positionner en force de propositions pour en faciliter la résolution.

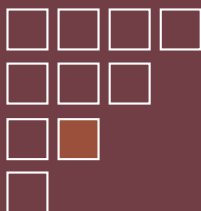
Based on the conclusions of our Scientific Council's annual seminar and of our three scientific commissions, INERIS proposed, at its Board meeting of May 29, 2008, to reflect on the evolution of its "scientific governance". This would consist of opening a place for dialogue to all stakeholders, the form of which still remains to be defined, which would play a decisive role in defining our priorities in the scientific and technical fields.

This evolution can be found at the level of the High Council for Research and Technology (Conseil Supérieur de la Recherche et de la Technologie - CSRT). Indeed, last September, the minister of Research and Higher Education, Valérie Pécresse, wished to broaden the composition of the CSRT by allocating three additional seats to members coming from associations. A measure was recorded in the conclusions of the report by the Research Operational Committee (from the Grenelle on the Environment) which she had established with Jean-Louis Borloo, minister of State responsible for Ecology, Committee in which INERIS has actively participated.

The establishment of the Agency for the Evaluation of Research and Higher Education (Agence d'Évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur - AERES), responsible for evaluating public establishments which have research activities, will also modify the Institute's "scientific governance". For this reason, we are considering creating a Visiting Committee. Made up of outside experts, its mission would consist - based on the work of our three specialized scientific committees - of globally evaluating INERIS's scientific activity while also taking the importance to the Institute of activities to assess public powers and businesses into account.

It is now granted that the challenges to overcome in order to achieve sustainable development necessarily come from increased participation of citizens in public decision-making. As a first-rate scientific player and assessment entity, it falls to INERIS to create conditions favorable to such a dialogue so as to cause the emergence of questions which can be addressed through research, and in order to place itself in a position, armed with proposals, to facilitate the resolution of these questions.

¹ "Grenelle" refers to the government sponsored multi-party process by which a set of recommendations to redefine France's environment policy was developed.



ÉDITORIAL

PIERRE TOULHOAT



DIRECTEUR SCIENTIFIQUE

Le Grenelle de l'Environnement a été un événement majeur pour l'INERIS en 2007. Après la présentation des conclusions fin octobre, l'INERIS s'est immédiatement impliqué dans différents « Comités Opérationnels », dont celui consacré à la recherche. L'année 2008 est celle de la concrétisation, à travers un projet de loi attendu pour l'automne. Dans ce contexte, l'INERIS est de plus en plus sollicité, et son activité devrait continuer à croître en 2009, notamment sur le volet « Santé Environnement ». Ainsi, la proposition de création d'un Pôle National Applicatif en Toxicologie et Écotoxicologie en Sud-Picardie figure dans les conclusions du rapport du Comité Opérationnel « Recherche ». Face à ces défis, il est nécessaire d'articuler toutes les dynamiques en jouant pleinement la complémentarité des acteurs et l'implication de toutes les parties prenantes. Grâce à une politique d'ouverture volontariste, l'INERIS peut aujourd'hui capitaliser sur des alliances solides dont certaines ont acquis une dimension nouvelle en 2007.

Tout d'abord, l'INERIS a renforcé ses liens avec trois des acteurs majeurs de la recherche, du transfert et de la formation en Picardie. Une équipe mixte de recherche, PERITOX, a été créée avec l'Université de Picardie Jules Verne. Par ailleurs, la signature du Contrat de Projet État-Région a confirmé l'intérêt stratégique pour la Région de la mise en place de la plate-forme ANIMEX, co-développée avec l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais. La collaboration scientifique avec l'Université de Technologie de Compiègne prend elle aussi un nouveau tournant, notamment par le biais de la fondation universitaire que l'UTC a créé le 25 septembre dernier et dont l'INERIS est l'un des tous premiers membres fondateurs.

Au plan national, l'Institut a étendu ses coopérations avec le CEA et l'IRSN au thème de la nanotoxicologie, dans la perspective d'une participation de ces deux établissements au Pôle National Applicatif. L'INERIS joue également un rôle de plus en plus important dans l'animation et la prospective de la recherche. Il est ainsi à l'origine de la création du réseau ANTIOPES, qui a permis de rassembler les intervenants nationaux de la recherche en toxicologie environnementale, avec l'INSERM, le CEA, l'INRA, et les principaux acteurs du milieu académique (CNRS et Universités). Une démarche analogue est en cours, en partenariat étroit avec le Cemagref dans le domaine de l'écotoxicologie. L'Agence Nationale de la Recherche (ANR) a retenu, fin 2007, la proposition de l'INERIS « Pro-Reach », atelier de réflexion prospective (ARP) dont l'objectif est de définir la feuille de route des recherches nécessaires à l'accompagnement du règlement REACH.


« L'INERIS joue un rôle de plus en plus important dans l'animation et la prospective de la recherche. »



The 'Grenelle' on the Environment was a major event for INERIS in 2007. After the presentation of findings in late October, INERIS became immediately involved in various "Operational Committees -COMOP", including one devoted to research. The year 2008 has been a year of fulfillment and achievement, primarily in the form of a critical bill expected in the fall. In this context, INERIS' involvement is increasingly called upon, and its activities should continue to grow in 2009, notably in the area of "Environmental Health". Hence, the proposal to establish a National Application Centre in Ecotoxicology and Toxicology in southern Picardy prominently featured in the conclusions of the report of the "Research" COMOP.

Faced with these challenges, it is necessary to articulate all the dynamics by fully highlighting the complementarity of players and the involvement of all stakeholders. Thanks to a proactive policy of openness, INERIS is now in a position to capitalise on strong alliances, some of which took on a new dimension in 2007. Firstly, INERIS has strengthened its ties with three major players in the areas of research, knowledge transfer and training in Picardy. A joint research team, PERITOX was established with the University of Picardy Jules Verne. Moreover, the signing of the State-Region Project Contract has confirmed the strategic interest for the Region for the establishment of the ANIMEX platform, co-developed with the LaSalle Beauvais Polytechnic Institute. Scientific collaboration with the Compiègne University of Technology (Université de Technologie de Compiègne) will also take a new turn, particularly through the university foundation that UTC has recently established and of which INERIS is one of the first founding members.

Nationally, INERIS has expanded its cooperation with the CEA (French Atomic Energy Agency) and IRSN (French National Research and Safety Institute) on the nanotoxicology subject, with the pers-



« Des succès importants
ont été obtenus dans
les premiers appels
à projets du 7^e PCRDT. »

Mais la complexité et l'ampleur des enjeux liés au développement durable posent un autre défi à la recherche, celui d'interagir sur les problématiques à l'échelle planétaire. Cet impératif incite l'INERIS à redoubler d'efforts pour optimiser et mieux structurer ses coopérations internationales. Au plan européen, les alliances permettent de s'inscrire dans un dispositif élargi : les enjeux de sécurité sanitaire et industrielle sont priorités en commun dans l'Europe à 27, et l'encadrement réglementaire devient européen. L'INERIS doit donc participer à la constitution d'une expertise européenne, que ce soit pour l'appui aux politiques publiques, ou pour le conseil aux entreprises et aux collectivités territoriales. Les efforts de l'Institut ont été récompensés en obtenant des succès importants dans les premiers appels à projets du 7^e PCRDT¹, et ce notamment grâce au GEIE² EU-VRi, coordinateur technique des projets iNTeg-Risk et ALFA-BIRD.

Cette dimension partenariale, qui imprègne fortement les activités de l'INERIS, est également mise à profit pour accroître son engagement aux côtés des entreprises, dans un contexte marqué par une accélération de l'innovation. Afin de favoriser le développement de la recherche partenariale, l'Institut s'est engagé dans la mise en place de conventions-cadres avec de grands groupes industriels, permettant le pilotage stratégique des actions de recherche, en particulier celles qui visent à prendre en compte la maîtrise des risques à un stade précoce de la conception des nouvelles filières technologiques ou énergétiques.

La maîtrise des risques passe par la surveillance des installations, secteurs ou situations à risque, ce qui implique nécessairement une compréhension des processus mis en jeu et le développement d'une capacité d'anticipation. Cette capacité d'anticipation permet, enfin, de mettre en place des stratégies de prévention. Les travaux de recherche présentés dans ce rapport mettent en évidence les différentes facettes de la démarche de l'Institut.

Ainsi, la direction des risques du sol et du sous-sol présente des travaux sur la surveillance des zones à risques liées à l'après-mine et aux cavités souterraines. Les méthodes géophysiques, en particulier l'écoute microsismique, permettent de détecter des signaux faibles, précurseurs de phénomènes d'effondrement. Afin de pouvoir les repérer, et les interpréter de manière utile pour prendre des mesures adéquates, il est nécessaire de comprendre la dynamique spatiale et temporelle des processus complexes mis en jeu. Les recherches menées sur les cavités salines illustrent la complémentarité entre la modélisation, les expériences de terrain et les connaissances acquises en laboratoire relatives aux lois de comportement des terrains. En matière d'écotoxicologie, on s'intéresse également aux « signaux faibles » détectables dans les milieux.

1 - Programme-Cadre de Recherche et de Développement Technologique.

2 - Groupement Européen d'Intérêt Économique.

pective of the participation of these two agencies in the National Application Centre. INERIS also plays an increasingly important role in providing strategic leadership and foresight for research. It has thus been an originating force in the creation of ANTIOPES (French National Network for the Development of Predictive Applications for Environmental Toxicology), which has brought together major stakeholders of research in environmental toxicology, with INSERM (French Institute of Health and Medical Research), CEA, INRA, and key players from academia (French National Scientific Research Centre-CNRS and Universities). A similar approach is underway in the field of ecotoxicology, in close partnership with Cemagref (French public research institute focusing on land and water management issues). In late 2007, the ANR (French National Research Agency) accepted the proposed INERIS "Pro-Reach" strategic forward planning workshop (atelier de réflexion prospective-ARP) whose objective is to define the roadmap for research supporting the REACH (Registration Evaluation and Authorisation of Chemicals) regulation.

But the complexity and scope of issues related to sustainable development pose a grand challenge to research, that of interacting on the issues on a global scale. This imperative is further incentive for INERIS to redouble efforts to optimise and better structure its international cooperation initiatives. At the European level, alliances allow us to be part of a larger undertaking : safety and security issues (health, industrial) are together prioritised in Europe at no. 27, with the regulatory framework becoming a European one. INERIS shall thus participate in the establishment of European expertise, whether it be in support of public policy, or advising companies and local authorities. The efforts of the Institute were rewarded in the important successes achieved in the first tendering of the Seventh Framework Programme-FP7 (7^e PCRDT)¹, particularly through the EEIG² EU-VRi, technical coordinator of the iNTeg-Risk and ALFA-BIRD projects.

This partnership dimension, permeates strongly across the activities of INERIS, which is also used to increase its engagement with companies in a context marked by an acceleration of innovation. In order to promote the development of research partnerships, the Institute has embarked on the establishment of framework agreements with major industry groups, enabling strategic research activities, particularly those designed to take into account risk control at an early stage of the design of new technology and energy sectors.

The risk control through monitoring of facilities, sectors or situations at risk, necessarily entails an understanding of the processes involved and developing a capacity for proactive anticipation. This ability to anticipate is what allows us to develop prevention strategies. The research presented in this report highlights the different facets of the Institute's approach.

Thus, the risk management of soil and subsoil involves the monitoring of risk areas related to post-mine and underground cavities. Geophysical methods, especially micro-seismic listening, enable the detection of weak signals, the precursors of collapse phenomena. In order to identify and appropriately interpret them so as to take

Les chercheurs travaillent ainsi à la mise en évidence de biomarqueurs d'exposition ou d'effets, utilisables sur le terrain, et significatifs pour appréhender les perturbations des écosystèmes et des populations. Ces études sont menées en laboratoire, mais aussi sur le terrain ou en mésocosmes.

Pour appréhender la sécurité de nouveaux produits ou de nouvelles technologies, on a souvent progressé par essais et erreurs, avec d'importants efforts expérimentaux – toujours coûteux, et parfois dangereux (essais sur explosifs), ou éthiquement délicats (essais sur animaux). La prévision *ab initio* des propriétés physico-chimiques et/ou toxicologiques des substances ou produits devient un enjeu majeur ; d'autant que le développement des outils de calcul, l'apparition de concepts et d'outils méthodologiques nouveaux permettent de prévoir les réactions chimiques les plus probables. Les équipes de l'INERIS associent au développement de ces méthodes le volet « aide à la décision », en s'appuyant sur les résultats des études *in silico*, mais aussi en capitalisant les données expérimentales existantes.

L'association étroite entre modélisation/simulation, d'une part, et expérimentation/mesure, d'autre part, est également illustrée par les travaux menés en vue de la prévision de la qualité de l'air ou par la modélisation de la ventilation dans les tunnels et son extension à des systèmes confinés. Il en est de même pour les recherches destinées à évaluer et maîtriser les risques liés aux nouveaux procédés : réacteurs chimiques et procédés « intensifiés », filière hydrogène pour les transports. Ce rapport scientifique insiste aussi sur la nécessité de qualifier les approches par des essais à grande échelle comme en attestent les premiers résultats du projet FLUMilog.

Enfin, les approches socio-techniques sont de plus en plus efficaces pour décrypter les facteurs de risque liés à l'organisation, au management et au facteur humain. Ils sont maintenant considérés, au même titre que les facteurs purement techniques, dans les causes d'accidents industriels au sein d'installations technologiquement matures, dans les pays développés et dotés d'une organisation socio-politique stable. Dans des systèmes complexes, comme celui représenté par le transport et la logistique des matières dangereuses, cette analyse permet d'optimiser le management des risques, et de contribuer à l'aide à la décision en fédérant tous les acteurs concernés autour d'objectifs négociés, de méthodologies partagées et de résultats évalués.

adequate measures, it is necessary to understand the spatial and temporal dynamics of the complex processes in play. Research on salt caverns illustrate the complementarity between modeling, field experiences and knowledge gained in the laboratory relative to behavioral laws of the land. In the field of ecotoxicology, 'weak signals' detectable in the environment is also of interest. Researchers are working towards the identification of biomarkers of exposure, or effects that may be used on the ground, and are significant to halting the disruption of ecosystems and populations. These studies are being conducted in laboratories and also in the field or mesocosm.


In trying to understand the safety of new products and new technologies, we have often progressed by trial and error, with important experimental efforts - always costly and sometimes hazardous (explosive tests), or ethically sensitive (animal testing). *Ab initio* prediction of physico chemical and/or toxicological properties of substances or products has become a major issue, especially as development of calculations tools, the emergence of new concepts and methodological tools has enabled the prediction of the most likely chemical reactions. INERIS teams are engaged in the development of these methods under the caption of "decision support", based on the results of studies performed *in silico*, but also by capitalising on existing experimental data.

The close association between modelling/simulation, on the one hand, and testing/measurement, on the other hand, is also illustrated by the work done to predict the quality of air or modelling of ventilation in tunnels and its extension to confined systems. The same goes for research to evaluate and control risks associated with new processes: chemical reactors and "intensified" processes, hydrogen line for transport. This scientific report also stresses the need to qualify the approaches of large-scale tests as demonstrated by the initial results of the FLUMilog project.

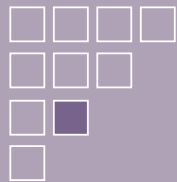
Finally, socio-technical approaches are increasingly effective in deciphering the risk factors related to the organisation, to management and to the human factor, now regarded as bearing equal weight as compared to purely technical factors in the causes of industrial accidents within technologically mature facilities in developed countries having a stable socio-political structure. In complex systems, as represented by the transport and logistics of hazardous materials, such analysis allows the optimisation of risk management, and contributes to decision support by bringing together all stakeholders around common negotiated goals, shared methodologies and evaluated results.



STRATÉGIE DE RECHERCHE ET ORGANISATION



→ Qu'il s'agisse de répondre aux grands enjeux de société dans les domaines des risques sanitaires, environnementaux et technologiques, ou d'accompagner les besoins d'innovation, l'INERIS se situe au cœur de l'avancée des connaissances. Ses travaux de recherche privilégient les partenariats et l'ouverture internationale et font l'objet d'une évaluation régulière pour satisfaire aux exigences d'excellence scientifique qu'il s'est fixées.



Panorama 2007-2008

des principaux faits marquants

SUCCÈS POUR LE 1^{ER} COLLOQUE DU RÉSEAU ANTIOPES

Une centaine de participants ont répondu à l'invitation du réseau ANTIOPES, pour son colloque de lancement organisé le 8 février 2008, à Paris. Créé sur proposition de l'INERIS, ANTIOPES est une infrastruc-



ture de recherche nationale en toxicologie, dont l'objectif est de contribuer à la construction d'outils et de modèles de prédiction des dangers des substances pour l'homme et les écosystèmes, grâce à une fédération de moyens, de compétences et d'équipements. Elle compte aujourd'hui près de 130 chercheurs appartenant aux grands organismes publics de recherche, à des universités et écoles, des associations d'industriels et des agences nationales. Ce colloque a été l'occasion de présenter les axes de travail dont les problématiques de biomarqueurs (identification, validation), d'outils pour l'étude des fonctions sensibles (fonction de reproduction) et la dimension intégrative de la modélisation mathématique.

LA MISE EN PLACE DU CERTES OFFICIAISÉE

Le protocole d'accord pour la création du CERTES, le Centre européen de recherche sur les technologies de l'environnement et de la sécurité, a été signé le 15 janvier 2008, entre les différents partenaires (État, Conseil régional de Picardie, Conseil général de l'Oise, Europe via le fonds FEDER, INERIS, UPJV, UTC, SDIS 60). Implanté sur un terrain de 150 ha situé sur les Communes de Rouvroy-Les-Merles et de Rocquencourt (au nord de l'Oise), le CERTES accueillera, à partir de 2012, un ensemble unique de moyens d'essais et d'expérimentation (laboratoires, plateaux techniques, simulateurs et maquettes, etc.) pour répondre aux enjeux scientifiques et techniques associés à la problématique de la sécurité industrielle.



L'ANR DONNE SON FEU VERT AU PROJET CANTO

La société SCIENOMICS et l'INERIS ont proposé le projet CANTO axé autour de l'intégration de méthodes d'analyse décisionnelle et de chimie prédictive pour l'évaluation de la toxicité, qui a été sélectionné en 2007 par l'Agence Nationale

de la Recherche. CANTO a constitué la première étape du consortium Decision Driven Intelligent Chemical Analysis Testing Strategies (DEDICATES), mis en place en 2008 par SCIENOMICS et l'INERIS. DEDICATES est conçu comme une solution stratégique d'aide à la décision pour les utilisateurs de la R & D de l'industrie de la chimie, de la pétrochimie, de la cosmétologie et de la pharmacie. Il permet, pour chaque substance, de déterminer le besoin et la nature des tests à effectuer en priorité, dans l'optique de diminuer les coûts de développement et les risques. Un séminaire de présentation du consortium a eu lieu en octobre 2007 à Paris.



che qui soutiennent des projets d'envergure internationale (dont deux Pôles de compétitivité à vocation mondiale), le besoin de développer les synergies entre les équipes autour de projets de recherche communs mais aussi de nouvelles structures à l'image du CERTES ou d'ANIMEX. Enfin, l'importance d'accroître la création de valeurs à partir de la recherche a également été soulignée afin de maintenir un haut niveau d'innovation, facteur-clé de compétitivité.

COLLOQUE 60 ANS EN PICARDIE

À l'occasion du soixantième anniversaire de l'implantation du site INERIS en Picardie, l'Institut a organisé, le 16 octobre 2007, un colloque scientifique sur le thème : « Recherche, maîtrise des risques et développement économique régional ». Plus d'une centaine de participants (Services de l'État, élus, universités, centres de recherche, pôles d'expertise, industriels) ont assisté à l'événement, soutenu par la Région Picardie. Les débats ont mis l'accent sur la nécessaire mobilisation autour des enjeux du règlement REACH, l'existence d'une dynamique régionale grâce à la présence de nombreux pôles de recher-

L'INERIS COORDINATEUR DU PROGRAMME 2-FUN

Dans le cadre du 6^e PCRDT, l'INERIS s'est vu confier la coordination du programme de recherche « 2-FUN » (Fullchain and Uncertainty approaches for assessing health risks in Future Environmental scenarios). Lancé en février 2007, 2-FUN rassemble douze partenaires issus de neuf pays européens. Son objectif est de fournir aux décideurs des méthodes et des outils avancés pour l'analyse prospective des risques sanitaires liés à l'environnement. Il permettra de définir des options de gestion prioritaires en se focalisant sur :
- la construction de scénarios environnementaux et socio-économiques sur le long terme,

- l'évaluation des effets toxiques de mélanges de produits,
- la prise en compte des populations d'enfants dans les évaluations de risques sanitaires,
- l'établissement de marges d'incertitude et d'analyses de sensibilité.

Les outils développés seront testés au cours de trois études de cas (au Portugal, en France et en Pologne) couvrant une large gamme de contextes temporels, spatiaux, sectoriels, environnementaux et sociaux.

SIGNATURE DE LA CONVENTION CIRCE

Le Plan National Santé Environnement (PNSE) a retenu parmi ses trois axes prioritaires de prévenir les pathologies d'origine environnementale et notamment les cancers. C'est dans ce contexte que l'INERIS et l'INSERM Unité 897 ont initié le projet Cancer Inégalités Régionales, Cantonales et Environnementales (CIRCE), qui a pour but d'analyser le rôle des facteurs socio-économiques et environnementaux dans les disparités géographiques de mortalité par cancer. Mené en collaboration avec quatre observatoires régionaux de la santé (Ile-de-France, Nord-Pas-de-Calais, Picardie et Rhône-Alpes), le projet a reçu le soutien de leurs conseils régionaux respectifs, officialisé par la signature d'une convention de partenariat, le 7 novembre 2007, au siège de l'INERIS. Dans une première phase, CIRCE a permis d'établir des cartes de mortalité par catégories de cancer. Il s'agit maintenant d'identifier les facteurs susceptibles d'expliquer les disparités géographiques constatées au travers de l'analyse spatiale des données socio-économiques, démographiques et d'activité professionnelle ainsi que par une analyse des données environnementales menée par l'INERIS.



LES CONCLUSIONS DE SHAPE RISK

Quatre ans après son lancement, les 18 partenaires européens du Projet SHAPE RISK (6^e PCRD) ont livré leurs conclusions. Piloté par l'INERIS, SHAPE RISK visait à améliorer la sécurité des sites industriels futurs, en tenant compte des trois composantes du risque qui interagissent entre elles : prévention des accidents majeurs, protection de l'environnement et prévention des accidents impliquant les travailleurs - chacune faisant l'objet de directives européennes : IPPC, SEVESO II, ATEX, directive cadre 89/391/CEE, etc. Les travaux de SHAPE RISK ont permis de dresser un bilan des pratiques européennes sur :

- les interactions entre les applications des directives 96/82/CE SEVESO et 96/61/CE IPPC,
 - les liens entre la prévention des risques professionnels et la prévention des risques industriels,
 - les outils informatiques utilisés dans la gestion des risques industriels,
 - les systèmes de managements intégrés : Hygiène, Sécurité, Environnement,
 - la prise en compte des conséquences environnementales suite à des accidents majeurs,
 - les stratégies de communication du risque.
- À l'issue du projet, un réseau d'experts en prévention des risques, issus de 12 pays européens, a vu le jour. Il sera chargé de donner des suites concrètes aux propositions formulées par SHAPE RISK, tant dans le domaine de l'application réglementaire que dans celui de la recherche technique et méthodologique.

COUP DE PROJECTEUR SUR LES NANOTECHNOLOGIES

Sujet sensible aux enjeux multiples, la thématique des nanoparticules a constitué le point focal de deux événements organisés en 2007 par l'INERIS. En effet, du 7 au 9 juin, l'Institut était présent au Salon Européen de la Recherche et de l'Innovation, à Paris, sur le pôle expertise du stand du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche. Un film pédagogique, réalisé

à cette occasion, a permis de présenter les caractéristiques des nanoparticules, les applications industrielles ainsi que les recherches menées par l'Institut sur la maîtrise des risques sanitaires et environnementaux liés à leur production et à leur utilisation. À la fin de l'année, un colloque intitulé « Nanotechnologies :



développement et précaution » s'est déroulé le 29 novembre, à Paris, dans le cadre du Salon Polylutec, réunissant l'ensemble des acteurs concernés (scientifiques, industriels, représentants de la société...).

LANCEMENT D'AQUAREF

Le séminaire de lancement d'AQUAREF, laboratoire national de référence de l'eau et des milieux aquatiques, s'est déroulé le 31 mai 2007, au Laboratoire National de métrologie et d'Essais. AQUAREF réunit les compétences scientifiques et techniques de cinq établissements publics : l'INERIS, coordonnateur du laboratoire, le Cemagref, l'Ifremer, le BRGM, le LNE. Ce séminaire fut l'occasion de présenter les missions AQUAREF et son rôle d'appui dans la mise en œuvre des politiques publiques, notamment la directive-cadre eau. Trois thématiques, correspondant à des axes de travail prioritaires, ont été plus particulièrement mises en relief au cours de cette journée : le développement et l'optimisation des méthodes de normalisation, l'expertise en soutien à la qualité des données, les développements scientifiques et technologiques sur les problèmes émergents. Les échanges avec les représentants des autorités publiques et intervenants techniques ont contribué à définir les besoins d'appui à la mise en œuvre des programmes de surveillance de l'eau et des milieux aquatiques et à ébaucher un programme d'actions pour les années à venir en chimie et hydrobiologie.



Emmanuel PLOT a reçu, en 2007, le prix Grammaticakis-Neumann décerné par l'Académie des Sciences Morales et Politiques, pour son ouvrage : *Quelle organisation pour la maîtrise des risques industriels majeurs ? Mécanismes cognitifs et comportements humains*, paru aux éditions L'Harmattan en 2007. Docteur en Sciences Sociales et Sciences de la Connaissance, spécialiste des systèmes de management, Emmanuel PLOT dirige au sein de l'INERIS des travaux de recherche et d'expertise orientés sur les techniques d'intervention en entreprise, le développement de solutions logicielles et l'utilisation des technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée. *Quelle organisation de la maîtrise des risques peut éviter des catastrophes telles qu'AZF, Bhopal, Tchernobyl ? Comment se prémunir contre les aléas et les situations imprévues qui caractérisent les systèmes complexes ? Quels sont les bons choix en matière de coordination, de compétences et de systèmes d'aide ? Son livre ouvre une piste pour répondre à ces questions en s'appuyant sur un état des connaissances en management de la sécurité et en sciences humaines. L'auteur considère que les solutions passent par une compréhension fine des mécanismes cognitifs des acteurs intervenant dans les installations industrielles. Ce serait à cette condition, et à cette condition seulement, qu'une organisation pourrait leur allouer les moyens dont ils ont besoin, et s'assurer qu'ils auront, au bon moment, les bons réflexes et les bons comportements.*

Création de nouvelles structures

En 2007/2008, l'INERIS a poursuivi le renforcement de ses liens partenariaux avec les autres établissements de recherche ou d'enseignement supérieur à travers la création de structures : équipe mixte, Groupement d'Intérêt Scientifique ou Fédération de recherche.

PERITOX

La complémentarité et les synergies qui existent entre l'INERIS et l'Université de Picardie Jules Verne ont conduit à la création d'une équipe mixte dédiée à la thématique périnatalité et risques toxiques (PERITOX). Elle consacrera ses travaux principalement à l'étude des effets sur le système nerveux, reproducteur et pulmonaire de l'exposition *in utero* ou dans la période néo-natale à des toxiques environnementaux. Des études cliniques chez la femme enceinte et le nourrisson, associées à des études expérimentales chez l'animal et des études *in vitro*, devraient déboucher sur le développement de modèles pharmacocinétiques et pharmacodynamiques.

des problèmes liés aux risques, en prenant en compte tous leurs aspects : scientifiques, technologiques, juridiques, économiques et sociaux. Les thèmes de recherche couverts sont les risques sismiques, climatiques, les incendies de forêt, les ressources en eau, les sols, la biodiversité, les contaminants, les déchets, et les écotechnologies. Au sein de l'INERIS ce sont essentiellement les compétences en géotechnique et en valorisation des déchets qui seront mobilisées.

les axes de développement d'ARDEVIE, on peut citer la mise au point de nouveaux matériaux à base de matières premières secondaires, l'utilisation des nanomatériaux pour le traitement des nappes contaminées ou encore la mise en sécurité de vides souterrains (anciennes mines et carrières) par comblement avec des sous-produits industriels.

PLATE-FORME NATIONALE POUR LE DÉVELOPPEMENT DE MÉTHODES ALTERNATIVES À L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE

Constituée sous la forme d'un GIS, réunissant 12 partenaires dont l'INERIS, cette plate-forme a pour objet la mise en place de méthodes alternatives permettant de réduire ou de supprimer le recours à l'animal de laboratoire, notamment dans le développement, l'évaluation et le contrôle des produits de santé et des substances chimiques.

La France rejoint ainsi les pays européens disposant d'une plate-forme nationale et réunis au sein de la plate-forme européenne ECOPA (European Consensus Platform on Alternatives).

ARDEVIE

Fruit de l'association entre l'INERIS, le CEREGE et l'Europôle de l'Arbois, le centre d'expertise sur les déchets, baptisé ARDEVIE (ARbois DEchets Valorisation Innovation Environnement) a été inauguré le 14 septembre 2007. Il a pour mission de conduire des recherches sur le comportement à long terme des déchets, assister les industriels et les collectivités pour la validation de leurs projets de valorisation ou d'élimination de déchets et de mettre à la disposition de l'administration des outils permettant de valider les processus et méthodologies mis en œuvre dans le cadre de la politique des déchets. Parmi

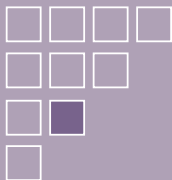
ECCOREV

L'INERIS est membre de la Fédération de recherche Ecosystèmes Continentaux et Risques Environnementaux ECCOREV, qui regroupe de nombreux organismes et universités implantés dans la Région PACA (CNRS, CEA, INRA, Cemagref, IRSN, IRD, Université d'Aix-Marseille, etc.). ECCOREV initiera des programmes de recherche interdisciplinaires tournés vers la résolution



> Inauguration du centre d'expertise sur les déchets ARDEVIE.

#1



Accords signés par l'INERIS

En 2007/2008, l'INERIS a renforcé ses partenariats et formalisé de nouvelles collaborations avec les organismes suivants.

ADEME

Arrivé à échéance, l'accord-cadre de collaboration a été reconduit dans le but d'approfondir des thématiques émergentes comme la qualité de l'air intérieur, l'analyse des risques des technologies de captage et de stockage du CO₂ ainsi que ceux liés à l'utilisation de l'hydrogène-énergie.

UTC

En renouvelant leur collaboration, l'INERIS et l'Université de Technologie de Compiègne, souhaitent créer une véritable dynamique régionale autour de projets de recherche communs portant sur le génie des procédés, la toxicologie, la biomécanique, le génie biomédical ou encore le management des systèmes organisationnels.

ANDRA

Le nouvel accord s'inscrit dans le cadre de la loi de programme du 28 juin 2006 sur la gestion durable des matières et des déchets radioactifs. Les axes de travail concernent le comportement thermo-hydropneumatique des ouvrages souterrains, du milieu géologique et des barrières ouvrages ; l'analyse et l'évaluation des risques liés à l'exploitation d'un stockage des déchets radioactifs à vie longue ; l'observation et la surveillance des

installations ; la surveillance et l'évaluation des risques liés aux toxiques chimiques et l'impact sanitaire et environnemental des installations.

MÉTÉO FRANCE

Une convention a été signée fixant les modalités d'une coopération en situation accidentelle d'urgence caractérisée par l'émission de polluants chimiques (non nucléaires) dans l'atmosphère en France métropolitaine et dans les DOM-TOM.

ISL

Les domaines de cette coopération initiée avec l'Institut franco-allemand Saint-Louis ont trait principalement à l'étude des explosifs artisanaux, à l'imagerie active sur les sites d'incendie, à la modélisation des explosions et de leurs impacts sur le bâti, à la réactivité et la caractérisation des nanomatériaux, et à la détection et la caractérisation des particules par la technologie LIBS (Laser Induce Breakdown Spectroscopy).

INVS

En mettant à profit leur complémentarité d'action en toxicologie et en épidémiologie, les deux instituts s'engagent, en renouvelant leur accord, à développer une approche multidisciplinaire de veille et

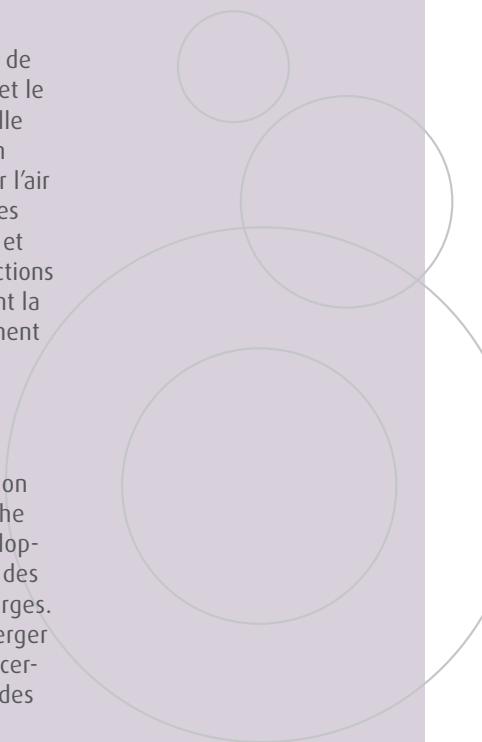
de vigilance, en s'appuyant sur les compétences de l'INERIS dans l'analyse des risques sanitaires et environnementaux et celles de l'InVS en matière de veille sanitaire et d'observation. Ils visent aussi la mise en place d'un système de veille et d'alerte, y compris en temps réel lors de situations d'urgence.

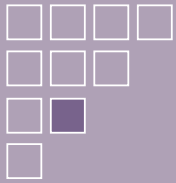
CSTB

En lien avec les priorités identifiées par le Grenelle de l'environnement, l'INERIS et le CSTB ont signé une nouvelle convention de coopération portant principalement sur l'air intérieur, la certification des matériaux nanocomposés et sur le développement d'actions à l'international concernant la sécurité incendie, notamment en milieu souterrain.

PNRI

L'INERIS est l'un des huit signataires de la convention de partenariat de recherche visant à favoriser le développement du Pôle National des Risques Industriels, à Bourges. L'objectif est de faire émerger des projets communs concernant notamment l'étude des phénomènes d'explosion et d'incendie, l'hydrogène vecteur d'énergie, la sûreté de fonctionnement et la gestion de crise.





EU-VRi : une expertise européenne collective et pluridisciplinaire au service de la gestion intégrée des risques

L'expertise et la recherche se situent aujourd'hui dans un contexte européen et international. C'est la raison pour laquelle, le 6 novembre 2006, l'INERIS a créé l'Institut Européen pour une Gestion Intégrée des Risques (EU-VRi, pour European Virtual Institute for Integrated Risk Management) en collaboration avec quatre partenaires. Objectif : rassembler les meilleures compétences européennes en évaluation des risques pour faire face à une demande sociétale en forte croissance.

Cette nouvelle structure de recherche, dont le siège est situé à Stuttgart, a pu être bâtie grâce à un partenariat solide avec la fondation Steinbeis, l'un des piliers allemands de la recherche industrielle/partenaire. Les trois autres membres fondateurs sont la société belge Technologica Group, spécialiste des matériaux avancés et des risques associés, la fondation hongroise Bay Zoltán, spécialisée dans le développement technologique industriel, ainsi qu'une unité de recherche de l'Université de Stuttgart (ZIRN) qui s'intéresse aux aspects sociaux des risques, à l'interface entre les aspects techniques, psychologiques, sociaux et politiques. Dès sa première année de fonctionnement, EU-VRi a intégré plus de trente membres associés et s'est attelé à répondre à plusieurs appels à projets du 7^e PCRD¹, avec, pour fil conducteur, une anticipation des risques émergents que peuvent générer le développement de nouveaux procédés ou de technologies nouvelles.

Les efforts ont porté leurs fruits puisqu'EU-VRi affiche à son palmarès la coordination du projet ALFA-BIRD (Alternative Fuels and Biofuels for Aircraft Development) qui a débuté le 1^{er} juillet 2008. Ce grand projet de recherche européen pour une alternative « renouvelable » aux carburants du transport aérien s'inscrit dans la priorité thématique "Transport (including aeronautics)",

7.1.6 *Pioneering the air transport of the future*. Il est un modèle de recherche en partenariat avec l'industrie (avioneurs, motoristes, producteurs de carburants), cofinancée par les pouvoirs publics. Le principal défi de ce projet est de pouvoir remplacer à terme le kérosène par du biocarburant. Les solutions les plus prometteuses seront donc étudiées, des classiques (les carburants synthétiques) au plus innovatrices, à base de nouvelles molécules organiques de 3^e génération.

La participation de l'INERIS se focalise sur des travaux d'analyse détaillée de cinq nouveaux carburants. Des tests en conditions réelles seront réalisés pour vérifier les propriétés physico-chimiques, y compris en combustion, permettant de s'assurer de la compatibilité du carburant avec les systèmes avion et moteur. En outre, l'INERIS se consacrera à l'évaluation des performances de ces nouveaux carburants en prenant en compte les aspects économiques, environnementaux et techniques, les critères étant d'améliorer l'indépendance énergétique, de réduire l'émission de gaz à effet de serre, et de diversifier l'approvisionnement énergétique en Europe.

Par ailleurs, le nouveau groupement coordonne également le projet européen de gestion intégrée des risques, iNTeg-Risk. Ce projet est un modèle de défragmentation de la recherche avec un consortium de soixante-trois partenaires, et un budget total de presque 20 M€. Il s'inscrit sur le thème "3.1-3 *Integrated Risk Management for Industrial Systems*" du programme NMP. L'objectif d'iNTeg-Risk est d'élaborer le cadre de référence et les outils communs pour traiter de manière cohérente et harmonisée les risques émergents liés au développement de technologies industrielles nouvelles ou de nouveaux procédés industriels. iNTeg-Risk a adopté comme point de départ dix-sept cas concrets de risques émergents qui seront examinés par les experts du projet, capitalisant ainsi les résultats pour

¹ Le septième Programme-Cadre de Recherche et de Développement Technologique constitue le principal instrument de financement de la recherche de l'UE. Il s'étend de 2007 à 2013.

atteindre l'objectif. Ces cas concernent, entre autres, les risques liés à l'utilisation intensive des nanotechnologies dans l'industrie, le captage et le stockage du dioxyde de carbone, l'externalisation d'activités sensibles ou importantes pour la sécurité. Grâce à l'approche harmonisée et aux outils validés qui seront développés au cours des quatre ans et demi du projet, l'impact attendu est principalement un accès plus rapide aux marchés communautaires pour l'industrie européenne innovante, en même temps qu'une meilleure maîtrise des risques.

Enfin, EU-VRi intervient sur un autre projet, NANODEVICE concernant l'industrialisation des technologies de détection et de mesure des nanoparticules.

Toujours avec pour objectif de soutenir la recher-

che industrielle, EU-VRi a apporté son appui à la Fédération Européenne des Aérosols pour mettre en place une campagne de tests sur l'utilisation de « mousses à haut foisonnement » dans le stockage des générateurs d'aérosols. Ce projet a réuni des industriels de la cosmétique au côté de compagnies d'assurances et de fabricants de systèmes d'extinction d'incendie.

Enfin, EU-VRi a réalisé, pour le compte de la Commission européenne, l'étude F-Seveso dont l'objectif est de dresser un bilan de l'application de la directive SEVESO II en vue de préparer une nouvelle version de cette directive portant sur la prévention des risques industriels majeurs (Rapport disponible sous <http://www.f-seveso.eu-vri.eu/>)

Institut Européen pour une Gestion Intégrée des Risques - EU-VRi

<http://www.eu-vri.eu>

DATE DE CRÉATION : 6 novembre 2006

STATUT : Groupement Européen d'Intérêt Économique (GEIE)

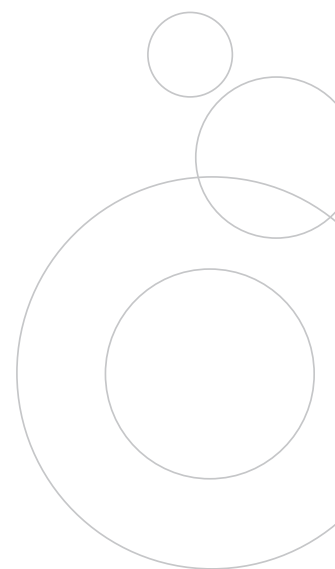
MEMBRES FONDATEURS : INERIS (France), Fondation Steinbeis Transfer Center Advanced Risk Technologies (Allemagne), Technologica Group c.v. (Belgique), Bay Zoltán Institute (Hongrie), Université de Stuttgart - ZIRN (Allemagne).

OBJECTIFS : développer la recherche collaborative européenne, principalement partenariale, et renforcer l'expertise dans l'évaluation intégrée des risques avec, comme axe prioritaire, la gestion des risques émergents.

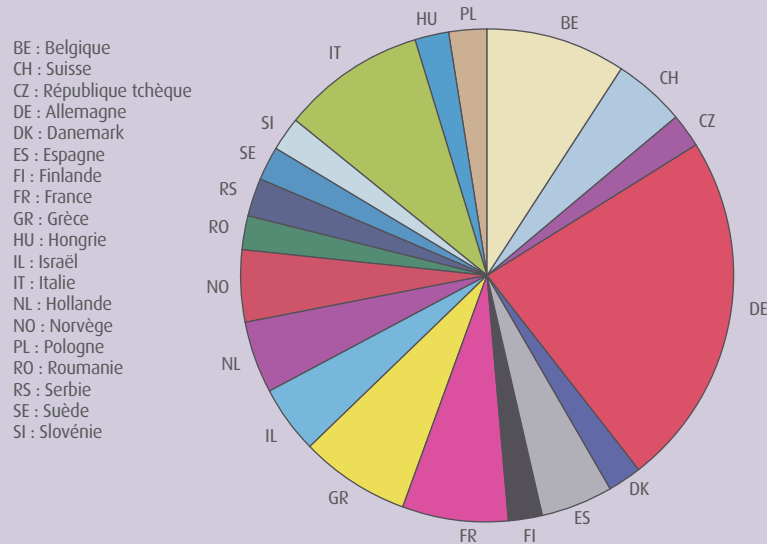
MISSIONS :

- Proposer des activités de service dans le cadre de contrats avec des industriels, des autorités publiques ou avec la Commission européenne.
- Faciliter la mise en relation des entreprises ou regroupement d'entreprises avec les acteurs de la recherche.
- Favoriser la mobilité des chercheurs entre les membres du GEIE et l'industrie.
- Identifier les besoins et les priorités en termes de Recherche et Développement dans le domaine d'expertise du GEIE.
- Soutenir la mise en place de consortiums permettant de faire converger les stratégies de R & D avec les besoins de l'industrie et jouer un rôle de facilitateur et accompagnateur dans le montage de projets de recherche partenariale.
- Constituer un centre de ressources, de diffusion d'informations et de valorisation des résultats de R & D.

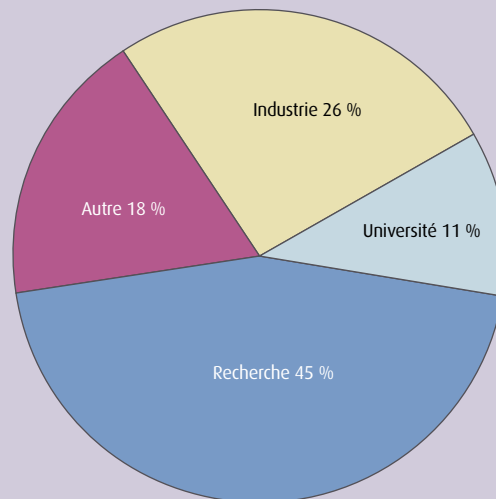
Les premiers succès remportés par EU-VRi, sur plusieurs projets d'envergure, représentaient à fin 2007 un volume total d'environ **30 millions d'euros**, répartis entre les membres du GEIE.



Répartition des membres d'EU-VRi par pays

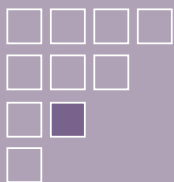


Activités des membres



■ ■ ■ SUMMARY

Organized as a European Economic Interest Grouping (EEIG), the European Virtual Institute for integrated Risk Management (EU-VRi) has been established in november 2006 by five founding members (INERIS, Steinbeis Foundation, Technologica Group, BZF, ZIRN - University of Stuttgart). EU-VRi provides services to industry, research community and/or public authorities and connects individual industrial compagny or network companies - often acting as a research broker. In addition, EU-VRi facilitates the mobility of researchers between research and industries, and it acts as a vehicle to create efficient consortia to address the R&D needs and gaps identified in above and support research collaboration. In 2007, more than 30 members joined the EEIG coming from research (45%), industry (26%), academia (11%) and other (18%). EU-VRi has managed to set up a number of important projects : iNTeg-Risk (Early Recognition, monitoring and integrated management of emerging, new technology related risks) ; ALFA-BIRD (Alternative fuels and biofuels for aircraft development) ; NANODEVICE (Novel concepts, methods and technologies for the production of portable, easy-to-use devices for the measurement and analysis of airborne engineered nanoparticles in workplace air) ; F-Seveso (Study of the effectiveness of the SEVESO II Directive) ; HEF Project (Technical support to aerosol industry to set up a test campaign for fire protection using high expansion foam).



Une politique doctorale plus ambitieuse

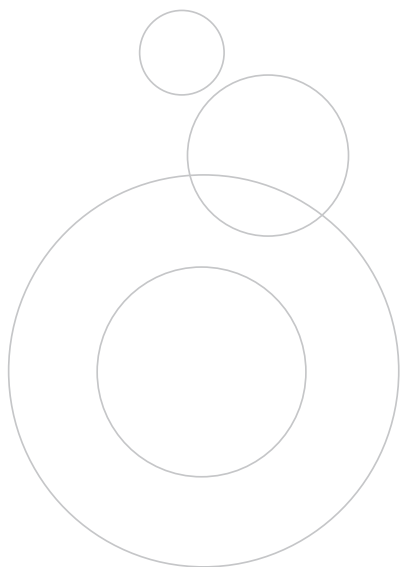
L'approfondissement des connaissances et la recherche de nouveaux savoir-faire sont indispensables à l'instauration d'un développement durable et aux besoins d'innovation qui en découlent. En effet, seule une base scientifique solide, fondée sur une approche interdisciplinaire, permet d'apporter une réponse pertinente aux problèmes de plus en plus complexes et évolutifs qui se posent en termes de dégradation de l'environnement et de la santé. Dans ce contexte, la formation des jeunes chercheurs est un élément moteur et l'INERIS, en tant qu'organisme scientifique, est conscient de sa responsabilité en matière de diffusion, de partage et de transfert des savoirs. Cet engagement est inscrit dans son Contrat d'objectifs 2006-2010 qui traduit la volonté de l'Institut de proposer aux jeunes chercheurs des parcours professionnels attractifs et de maintenir un encadrement scientifique de qualité.

Ainsi, l'Institut accueille en permanence une cinquantaine de doctorants et finance ou co-finance, chaque année, une dizaine de nouvelles thèses, réalisées, pour un tiers, à temps plein au sein même de ses laboratoires de Verneuil-en-Halatte, et pour les deux tiers, à temps partagés avec d'autres laboratoires universitaires partenaires. Les travaux des doctorants apportent une contribution importante à la production scientifique de l'INERIS et lui permettent de bénéficier de compétences complémentaires pour accompagner le développement de ses activités de recherche tout en favorisant le renouvellement des approches. Par ailleurs, l'accueil de jeunes chercheurs constitue un levier, d'une part, pour resserrer les liens avec le tissu académique et, d'autre part, pour accroître le rayonnement scientifique de l'Institut, tout particulièrement à l'international.

Pour donner une nouvelle impulsion à sa politique doctorale, l'INERIS s'est engagé, fin 2007, dans la mise en place d'une nouvelle procédure de gestion des thèses. La mesure principale a porté sur les modalités de recrutement des doctorants. Ainsi, un Appel à Candidatures a été ouvert de janvier à avril 2008. Seize sujets de thèse ont été proposés ayant pour finalité d'apporter des réponses à des enjeux majeurs.

Soucieux d'améliorer l'intégration des doctorants et de valoriser leurs travaux, l'Institut les réunit chaque année à l'occasion d'une journée d'information et d'échanges, durant laquelle ils présentent l'avancement de leur recherche. En 2008, plus de quatre-vingts participants ont assisté à cet événement qui s'est déroulé le 18 janvier en présence de représentants de l'INERIS mais aussi des membres de son Conseil et de ses Commissions scientifiques et de représentants de laboratoires universitaires partenaires.

Parallèlement, l'INERIS encourage ses chercheurs confirmés à obtenir l'habilitation à diriger des recherches (HDR) afin d'offrir un potentiel d'encadrement de qualité. En 2007, deux personnes ont ainsi obtenu leur HDR et une troisième a été recrutée portant à onze le nombre d'ingénieurs/chercheurs titulaires d'une HDR. Initialement conçue comme une voie d'accès au corps des professeurs des universités, l'HDR fait aujourd'hui référence dans l'ensemble du monde de la recherche. En consacrant le haut niveau scientifique du candidat, elle est clairement une preuve de la reconnaissance par les pairs et, pour l'INERIS, un moyen de renforcer son ancrage dans le milieu académique.



Les sujets de thèses de l'Appel à Candidatures 2008

RISQUES ACCIDENTELS

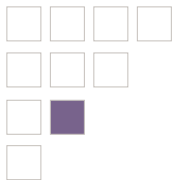
- Étude de rejets diphasiques d'ammoniac à l'intérieur d'un confinement : essais expérimentaux - modélisation numérique.
- Étude expérimentale des structures de types capacités et bâtimentaires à l'effondrement et à l'explosion.
- Modélisation cinétique et moléculaire de l'évolution de la stabilité et de la dangerosité de deux produits organiques au cours du processus de peroxydation.
- Optimisation du dimensionnement d'événements de sécurité pour systèmes chimiques non tempérés : approches expérimentales et modélisation.

RISQUES CHRONIQUES

- Application de la spectroscopie de plasma induit par laser (LIBS) pour la caractérisation physico-chimique de nanoparticules manufacturées ; contrôle de procédé et de niveaux de confinement.
- Biodisponibilité des substances perturbatrices endocriniennes dans l'environnement aquatique.
- Déséquilibre de la balance androgènes/oestrogènes dans le mécanisme de perturbation endocrinienne et de la cancérogénèse hormono-dépendante - DYSHORMO.
- Effets des perturbateurs endocriniens sur la biosynthèse des hormones stéroïdiennes dans les gonades de poisson.
- Étude de la composition chimique de la composante organique des particules secondaires en site réel et en atmosphère simulée.
- Les émissions de composés azotés entre terre et mer : évolutions et impacts sur la qualité de l'air.
- Utilisation des marqueurs de diversité génétique dans un contexte de biosurveillance des milieux aquatiques.

RISQUES DU SOL ET DU SOUS-SOL

- Analyse et modélisation couplées-multiphysiques de l'évolution spatio-temporelle de cavités de dissolution.
- Apport de la surveillance microsismique continue en champ proche pour la détection de mécanismes et signes précurseurs d'instabilités gravitaires. Application aux affaissements et effondrements miniers.
- Étude des impacts économiques des mesures de gestion des risques de mouvement de terrain.
- Étude des mécanismes de production et de transfert de gaz dans un contexte hydrogéologique post-minier.
- Prise en compte de l'interaction sol-structure dans l'étude des mouvements de terrain : approche expérimentale et théorique.



Le Conseil scientifique

**Président
du Conseil scientifique**
(En cours de nomination)

EMMANUEL LEDOUX

Vice-Président du Conseil
Conseiller Scientifique
Directeur de Recherche
École des Mines de Paris

VÉRONIQUE BACH

Professeur des Universités
Physiologie Humaine
Université de Picardie Jules Verne

CHRISTIAN BLAISE

Chercheur scientifique
Responsable de l'Unité de Toxicologie Aquatique
Section Recherche sur les Écosystèmes Fluviaux
Environnement Canada - Région du Québec
Centre Saint-Laurent
Section Biologie de l'Environnement

ALAIN DESROCHES

Professeur
Co-directeur du Pôle Santé et
Biotechnologies
École Centrale Paris

PHILIPPE GARRIGUES

Directeur de Recherche CNRS
Directeur Centre de Recherche en Chimie Moléculaire
UMR 5472 CNRS
Université de Bordeaux I

ANDRÉ GROSMAITRE

Directeur Santé-Sécurité-Environnement et Développement Durable
TOTAL

GILLES KIMMERLIN

Conseiller Scientifique
Mission Relations Institutionnelles et
Communication
Direction de la Recherche
Gaz de France

PATRICK LANDAIS

Directeur Scientifique
ANDRA

ANDRÉ LAURENT

Professeur
Laboratoire des Sciences du Génie Chimique -
CNRS
École Nationale Supérieure des Industries
Chimiques Nancy - INPL

JACQUES LECLAIRE

Direction des Sciences du Vivant
L'ORÉAL

JOSEPH LEWI

HENRY LONDICHE

Directeur de recherche
Centre SITE
École des Mines de Saint-Étienne

JEAN-PIERRE MAGNAN

Directeur Technique Géotechnique
Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées

FRANCELYNE MARANO

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

NEIL MITCHISON

European Commission
Edinburgh

JEAN-MARIE MUR

MARC PANET

Expert international en géotechnique

NIGEL RILEY

Health & Safety Executive
Hazardous Installations

ALAIN WEILL

Chef du Département Interactions Océan-Terre-
Atmosphère
Centre d'Études des Environnements Terrestre
et Planétaires

Invités permanents au Conseil

Christian DELVOSALLE

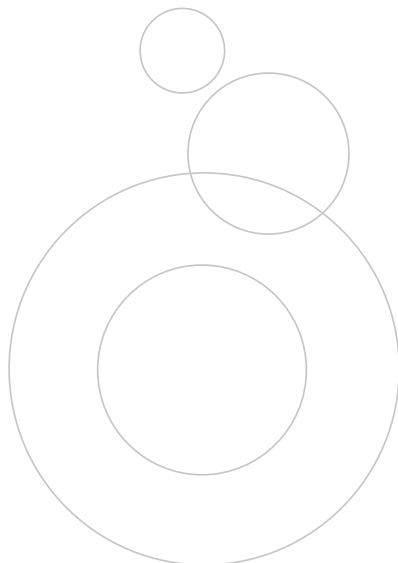
Président de la commission Risques
accidentels
Faculté Polytechnique de Mons

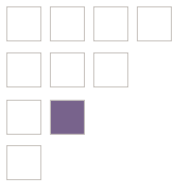
Patrick FLAMMARION

Président de la commission Risques
chroniques
Office National de l'Eau et des Milieux
Aquatiques

Jean-Louis DURVILLE

Président de la commission Risques
sol et sous-sol
Conseil Général des Ponts et Chaussées





Commission scientifique Risques chroniques

PATRICK FLAMMARION

Président

Directeur scientifique délégué à la recherche
Direction de l'action scientifique et technique
Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA)

SCOTT ALTMANN

Vice-Président

Chef du service Transfert des Radionucléides
Direction Scientifique
ANDRA

JORGE-BERNARDO BOCZKOWSKI

Inserm U700

JEAN-CHARLES BOUTONNET

Chef du Département Toxicologie et Environnement
Direction Sécurité Environnement Produit
ARKEMA France

MARIE-THÉRÈSE BRONDEAU

Chef du Département Polluants et Santé
INRS

PIERRE-ANDRÉ CABANES

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

CLAUDE CASELLAS

Professeur
UMR 5569 Hydrosociences
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)

FRANÇOIS GALGANI

Laboratoire Environnement Ressources
IFREMER

HANS LUNDBERG

International Director,
IVL Swedish Environmental Research Institute

EMMANUEL MASSÉ

Chef du bureau Politique industrielle, recherche et innovation
Direction Générale du Trésor et de la Politique Économique
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi

PIERRE MOSZKOWICZ

Directeur du Laboratoire d'Analyse Environnementale des Procédés et des Systèmes Industriels
Institut National des Sciences Appliquées

ERIC PARENT

Laboratoire de Gestion des Risques en Sciences de l'Environnement
École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

LAURENT ROSSO

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

DIMOSTHENIS A. SARIGIANNIS

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

ROBERT VAUTARD

Directeur du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Commission Risques acciden

CHRISTIAN DELVOSALLE

Président

Professeur
Faculté Polytechnique de Mons

JACQUES VALANCOGNE

Vice-Président

Responsable de l'Unité Maîtrise des Risques Système
RATP

JEAN CHAPELAIN

Chargé de mission
École Nationale Supérieure des Officiers de Sapeurs Pompiers

DENIS DUVAL

Chargé de mission à la Sécurité Industrielle
TOTAL

JEAN-MARIE FLAUS

Professeur des Universités
Laboratoire d'Automatique de Grenoble
École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble

FRANCK GUARNIERI

Directeur
Pôle Cindyniques
École des Mines de Paris

PHILIPPE KLEIN

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

scientifique tels

PIERRE-ETIENNE LABEAU

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

JEAN-PAUL LACOURSIÈRE

Professeur
Département de génie chimique
Université de Sherbrooke (Québec)

MICHEL LLORY

Institut d'Analyse Organisationnelle (IAO)

ABDELHAMID NAZIH

Service Sûreté Nucléaire
EADS ASTRIUM

LAURENT PERRIN

Maître de Conférences
École Nationale Supérieure des Industries
Chimiques de Nancy

CHRISTOPHE RENIER

Directeur d'Objectifs Infrastructures
Gaz de France

ISABELLE SOCHET

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de
Bourges

RICHARD TURCOTTE

Chef du Département Recherche-
Développement (Explosifs)
Canadian Explosives Research Laboratory
CANMET
Natural Resources Canada

Commission scientifique Risques sol et sous-sol

JEAN-LOUIS DURVILLE

Président
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

Chef de la section MYRRHA-Design
Département Physique des Réacteurs
et MYRRHA
Centre d'Étude de l'Énergie Nucléaire
(SCK-CEN) (Belgique)

GILBERT CASTANIER

Chef de la Division Géologie
Géotechnique
Service Qualité des Réalisations
EDF Branche Energies

OLIVIER DAVID

Inspection Générale des Carrières
Mairie de Paris

DENIS FABRE

Professeur
CNAM

ALAIN GUILLOUX

Président-Directeur-Général
TERRASOL

YVES GUISE

Directeur Technique du Département
de Prévention et de Sécurité Minière
BRGM

LYESSE LALOU

Laboratoire de mécanique des sols
École Polytechnique Fédérale de Lausanne
(Suisse)

PATRICK LEBON

Adjoint au Directeur Scientifique
ANDRA

HORMOZ MODARESSI

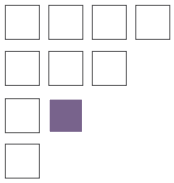
Chef du Service Aménagement
et Risques Naturels
BRGM

HENRI MOLLERON

Directeur Environnement
Groupe COLAS
Président-Directeur-Général
COLAS Environnement et Recyclage

JEAN-FRANÇOIS THIMUS

Professeur
Université Catholique de Louvain



Programme 189

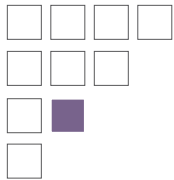
Liste au 31 décembre 2007

des programmes de recherche en cours

- Sécurité intrinsèque des réactions chimiques (INTENS)
- Évaluation et prévention des risques accidentels et chroniques liés à la production et l'utilisation de nanoparticules – (NANORIS)
- Utilisation des diagrammes d'influence (réseaux bayésiens) dans la méthodologie d'analyse des risques pour les installations industrielles (DIRIS)
- Libération accidentelle des produits dangereux transportés par canalisation (LACAN)
- Safe use of energy as an energy carrier (HYSAFE)
- Sécurité des biocarburants
- Évaluation globale des risques technologiques liés au transport et à l'utilisation de produits chimiques (GLOBAL)
- Étude de l'impact de projectiles sur des installations voisines. Effets dominos (IMFRA)
- Évaluation du risque d'inflammation d'atmosphères explosives par phénomène électrostatique en milieu industriel (BESP)
- Recherche sur les Propriétés et l'activité de composés explosifs (REPLACE)
- Prédiction des mécanismes d'accélération de la combustion dans les atmosphères explosives (EXPRESS)
- Développement d'une plate-forme d'outils d'évaluation des conséquences de phénomènes dangereux susceptibles de survenir sur un site industriel (EPHEDRA)
- Améliorer des méthodes d'estimation prospective de l'exposition aux polluants des populations résidant autour d'une installation classée pour la protection de l'environnement - ICPE
- Le cycle de l'eau dans l'incendie industriel (O2Feu)
- Réalité virtuelle au service du management des risques et des « Facteurs Humains »
- Approche d'évaluation de la maîtrise des risques d'accidents majeurs intégrant les dimensions techniques, organisationnelles et facteurs humains (MIRIAM)
- Knowledge management pour la gestion des risques (KMGR)
- Acceptabilité et gouvernance des risques en gestion préventive (ACCEPTRIS)
- Utilisation des biomarqueurs dans un contexte de multipollution
- Perturbateurs endocriniens dans l'environnement : caractérisation à l'aide d'outils *in vitro*
- Étude des effets des perturbateurs endocriniens sur le développement précoce des poissons
- Évaluation de l'impact des perturbateurs endocriniens sur les milieux aquatiques
- Enzymes de la stéroïdogenèse chez *Danio Rerio*
- Plasticité génomique et toxicité des perturbateurs endocriniens
- Intégration des modèles toxicocinétiques et toxicodynamiques pour les expositions multiples
- Développement du pôle de neurotoxicologie à l'INERIS
- Nouvelles cibles cellulaires et moléculaires des HAP : identification, validation et modélisation du risque cancérigène
- Toxicité locale et systémique des nanoparticules (NANOTOX)
- Exposition humaine aux particules ultra-fines
- Métrologie et toxicologie des nanoparticules et des particules ultrafines (NANORIS)
- Contribution des granules intrapolliniques à l'allergénicité des pollens ; modulation par les polluants atmosphériques
- LIDAR UV/IR multipolluants appliqué à la caractérisation de nouveaux polluants gazeux ainsi qu'à la validation de modèles d'émissions diffuses
- Prise en compte d'observations tridimensionnelles pour l'évaluation et l'amélioration de modèles de chimie-transport atmosphérique
- Intégration probabiliste pour l'assimilation statistique de données d'observation dans les modèles de qualité de l'air
- Impact radiatif des aérosols sur le climat européen. Étude des rétroactions sur la chimie atmosphérique
- Valorisation des déchets : identification des mécanismes physiques, chimiques et biologiques et de leur influence sur le relargage des polluants
- Modélisation du comportement et de l'impact des déchets sur les sols dans le scénario de stockage ou de valorisation
- Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés et à double porosité à partir d'essais *in situ* et de modélisation
- Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection et la reconnaissance des cavités souterraines
- Changement climatique et comportement des sols et des structures
- Interactions eau-roche sur le comportement à long terme de cavités
- Phénoménologie des instabilités géologiques en grand et signes précurseurs

Programmes de recherche soutenus par l'Agence nationale de la recherche - ANR

2005	
Acronyme	Titre du programme
NANOTOX	Toxicologie des nanoparticules : influence de la taille, de la composition chimique et de la réactivité de surface sur leurs effets pulmonaires et rénaux
PAISA	Pollution atmosphérique, inégalités sociales de santé et asthme
GALERNE	Gaz et liquides évaporants et risques de nuisances environnementales et humaines
GEOCARBONE PICOREF	Pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France
GEOCARBONE MONITORING	Surveillance et monitoring du stockage géologique du CO ₂
DRIVE	Données expérimentales pour l'évaluation des risques hydrogène, la validation d'outils numériques et l'édition de référentiels
STABROCK	Impact des changements climatiques sur la stabilisation des fronts rocheux : observation, expérimentation et modélisation
ARGIC	Analyse du retrait/gonflement et de ses incidences sur les constructions
Biocalcis	Préindustrialisation d'un procédé de consolidation de sols par biocalcification <i>in situ</i>
2006	
RespINTtox	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 transport en souterrain
REALEX	Évaluation des risques et de la menace, analyse de situation et expertise en temps réel pour la gestion des crises NRBC
ASPIC	Aide par la simulation à la protection des infrastructures critiques
SRIP	Emploi des moyens robotisés pour prévenir et traiter les incidents
CHARCO	Expérimentation et modélisation de l'échange de gaz dans les charbons en vue d'un stockage du CO ₂
SOCECO₂	Économie et sociologie de la filière capture et stockage géologique 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>
BIOMAP	Analyse environnementale, socio-technico-économique et évaluation des risques des filières bioénergies : applications pratiques à différentes problématiques
PROPSÉD	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-CO2	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
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
NANOSEP	Procédés d'agrégation et de séparation des nanoparticules
QUAD_BBC	Qualité d'air intérieur et systèmes de ventilation dans les bâtiments à basse consommation d'énergie

* Pour 2008, la liste comprend les programmes retenus à la date du 1^{er} septembre 2008, plusieurs programmes étant encore en cours d'évaluation.

Programme coordonné par l'INERIS.

L'INERIS, partenaire de 24 programmes européens au 1^{er} septembre 2008

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
HYPER	Installations permitting guidance for hydrogen and fuel cells stationary applications
EAQC-WISE	European analytical quality control in support of the water framework directive via the water information system for Europe
SUMATECS⁽¹⁾	Sustainable management of trace element contaminated soils
CITYZEN	megaCITY - Zoom for the ENvironment»
PREDICT - IV	Profiling the toxicity of new drugs : non animal approach integrating toxicodynamics and biokinetics
IMPULSE	Integrated multiscale process units with locally structured elements
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
HYSAFE	Safety of hydrogen as an energy carrier
GEMS	Global and regional earth-system monitoring using satellite and <i>in situ</i> data
PROMOTE	Promote GMES Service Element Atmosphere
NANOSAFE2	Safe production and use of nanomaterials
VIRTUALIS	Virtual reality and human factor applications 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 an monitoring
FLOMINET⁽²⁾	Flooding management of underground coal

* Contrat en cours de signature

Programme coordonné par l'INERIS.

(1) Programme ERA-NET (FP7)

(2) Programme RFCS (fonds de recherche charbon-acier)

Indicateurs du Contrat d'objectifs 2006-2010

	2004	2005	2006	2007
Nombre total de publications	201	269	295	318
Nombre de publications dans des revues à Comité de lecture	53	54	68	68
Nombre de communications dans les congrès	163	194	237	285
Productivité de la recherche sur fonds publics (nombre de publications pour 100 k€ de fonds publics)	2,4	3,2	3,2	3,0
Financements de la recherche de l'INERIS par des sources publiques autres que le Programme 189 (k€)	2 683	2 258	2 399	3 310
Chiffre d'affaires en recherche partenariale (k€)	6 403 ¹	6 273 ¹	5 562	3 527
Nombre de brevets (au 31 décembre)	4	4	3	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 (‰)	0,29	0,57 ³	ND	ND
- Part européenne (UE 27) de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,04	0,08 ³	ND	ND
- Part mondiale de publications scientifiques de l'INERIS, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)	0,01	0,03 ³	ND	ND
Contribution de l'INERIS à la reconnaissance scientifique des opérateurs du Programme 189 ²				
- Part mondiale de citations reçues par les publications de l'INERIS et indice d'impact relatif à 2 ans, toutes disciplines confondues, en compte fractionnaire (‰)				
• Part mondiale de citations	0,01	ND	ND	ND
• Indice d'impact relatif à 2 ans ⁴	0,96	ND	ND	ND

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	16	0,34
• Coordinations	4	0,33	2	0,51

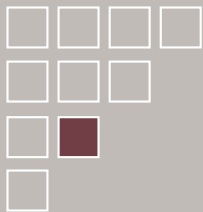
1 - Valeurs indicatives, les outils de mesure n'ayant été mis en place qu'en 2006.

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 février 2007, issues de la base CORDIS.



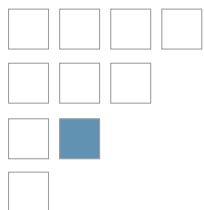
VIE SCIENTIFIQUE 2007-2008

PRINCIPAUX RÉSULTATS



■	SUBSTANCES ET PRODUITS CHIMIQUES	26
■	RISQUES TECHNOLOGIQUES ET POLLUTIONS	58
■	RISQUES LIÉS À L'APRÈS-MINE, AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ET RISQUES NATURELS	98
■	PUBLICATIONS	113





SUBSTANCES ET PRODUITS CHIMIQUES

- Progresser dans la compréhension des effets sur la santé et l'environnement associés à certains risques émergents : perturbateurs endocriniens, particules ultrafines, champs électromagnétiques...
- Développer des méthodes pour prédire les dangers des substances et évaluer les impacts en s'attachant principalement à la mise au point :
 - de biomarqueurs des impacts sur les milieux à diverses échelles du vivant (ensemble d'une population animale, individu, niveaux cellulaire et infra cellulaire) ;
 - de modèles de toxicocinétique visant à prédire les relations dose-effets aux faibles doses ;
 - de nouveaux « outils alternatifs » à l'expérimentation animale (tests *in vitro* et approche analyse prédictive des structures moléculaires QSAR) que promeut le règlement REACH.

Les modèles toxicocinétiques physiologiques (PBPK)

Les évaluations des risques chimiques permettent d'estimer dans quelle mesure les individus ou les populations peuvent être affectés par leur exposition à des produits chimiques présents dans l'environnement ou les lieux de travail. En l'absence de données quantitatives pour l'homme, ce processus fait souvent appel à des données animales ou obtenues *in vitro* pour estimer les effets potentiels sur la santé humaine.

Afin de réduire les incertitudes liées à ces extrapolations, des efforts considérables ont été mis en œuvre pour développer des modèles toxicocinétiques physiologiques (PBPK) utilisables pour des évaluations de risques quantitatives.

En décrivant la cinétique d'un produit chimique à partir d'une structure physiologique réaliste, un modèle PBPK validé permet d'effectuer les extrapolations dose élevée/dose faible, dose/mode d'exposition, et inter-espèces nécessaires pour évaluer le risque pour l'homme sur la base d'études toxicologiques sur les animaux. Même si le recours aux données de pharmacocinétique n'est pas explicitement demandé par REACh, il est spécifié textuellement dans l'Annexe I, 1.0.2 du règlement, que « l'évaluation des dangers pour l'homme considèrera le profil toxicocinétique ».

Le savoir-faire développé par l'INERIS dans ce domaine a permis d'élaborer plusieurs modèles PBPK humains calibrés, concernant notamment le butadiène, le trichloréthylène, le tetrachloréthylène, le benzène, la dioxine et les nanoparticules. La cinétique des métabolites de ces composés est aussi prise en compte. En effet, ils peuvent donner lieu à des effets bien plus drastiques que le composé d'origine. De plus, l'INERIS a montré l'intérêt de l'analyse bayésienne pour estimer les nombreux paramètres des modèles PBPK et prendre en compte l'incertitude et la variabilité inhérentes aux données toxicocinétiques, une démarche devenue indispensable dans l'évaluation des risques.

L'INERIS développe actuellement une nouvelle thématique de recherche, visant à utiliser les modèles PBPK pour intégrer les données des approches alternatives à l'expérimentation animale (QSARs, « omics », test *in vitro*), ce qui devrait générer des outils incontournables dans le cadre de l'application de REACh.

→ TÉMOIGNAGE

Weihseh Chiu,
Environmental Health Scientist
US Environmental Protection Agency

« Les données, les outils et les méthodes mis au point par l'INERIS ont joué un rôle important pour faire évoluer les évaluations de risques réalisées par l'EPA, en particulier dans le domaine de la toxicocinétique. Par exemple, l'INERIS a fourni des données originales de toxicocinétique chez l'humain pour le trichloréthylène et le tétrachloréthylène. Ce travail a reposé sur les données recueillies lors de l'exposition de volontaires à des concentrations beaucoup moins élevées que celles utilisées dans les précédentes études et plus proches des concentrations environnementales. Par ailleurs, l'approche bayésienne développée par l'INERIS - qui combine les données toxicocinétiques et les modèles physiologiques pharmacocinétiques (dits PBPK) - s'est révélée particulièrement novatrice et les résultats de telles analyses ont servi de support à plusieurs évaluations de risques mises en œuvre par l'EPA, concernant notamment le trichloréthylène, le tétrachloréthylène et le dichlorométhane. L'approche bayésienne permet une estimation très fine de l'incertitude et de la variabilité des données toxicocinétiques, ce qui est particulièrement important dans le cas des polluants environnementaux pour lesquels il est souvent nécessaire d'analyser conjointement des données provenant de plusieurs études. Cette approche s'appuie aussi sur des hypothèses sous-jacentes transparentes et explicites, avantage considérable pour envisager son application dans un cadre réglementaire. Enfin, le logiciel de statistiques MCSim, dont l'INERIS assure l'opérationnalité, est actuellement l'un des meilleurs outils disponibles et il serait difficile pour l'EPA de s'en passer. Son développement en open source est un autre atout qui nous a permis d'adapter les performances de ce logiciel à nos besoins. »



Physiological toxicokinetic models

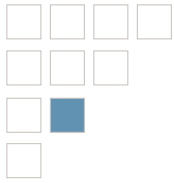
Chemical risk assessments make it possible to evaluate the extent to which individuals or populations may be affected by exposure to the chemical products present in the environment or the workplace. In the absence of quantitative data for humans, this process often uses animal or *in vitro* data to estimate potential effects on human health. In order to reduce the uncertainties related to these extrapolations, considerable efforts have been made to develop physiological toxicokinetic models (PBPK) for application in quantitative risk assessments. By describing the kinetics of a chemical product from a realistic physiological structure, a validated PBPK model makes it possible to perform the high-to-low-dose, dose-route, and interspecies extrapolations needed to evaluate human risk based on toxicological studies on animals. Although the use of pharmacokinetic data is not explicitly required by REACH, it is textually specified in Appendix I, 1.0.2 of the regulation that "the assessment of dangers for humans will consider the toxicokinetic profile". The knowledge developed by INERIS in this field has enabled the development of several calibrated human PBPK models, concerning butadiene, trichloroethylene, tetrachloroethylene, benzene, dioxin and nanoparticles in particular. The kinetics of the metabolites of these compounds are also taken into account. Indeed, they may give rise to much more drastic effects than the original compound. Moreover, INERIS has demonstrated the interest of Bayesian analysis to estimate the many parameters of PBPK models and take the uncertainty and variability inherent to the toxicokinetic data into account, an approach which has become vital in risk assessment. INERIS is currently developing a new research theme seeking to use PBPK models to integrate the data from alternative approaches into animal experimentation (QSARs, "omics", *in vitro* test), which should generate essential instruments in the framework of REACH application.

→ TESTIMONY

Weihseh Chiu, *Environmental Health Scientist*
US Environmental Protection Agency

"The data, methods, and tools developed by INERIS have been instrumental in advancing EPA risk assessments, particularly in the area of toxicokinetics. For instance, INERIS provided human toxicokinetic data from experimental exposures of trichloroethylene (TRI) and tetrachloroethylene (TETRA) at concentrations an order of magnitude lower than previously published studies, reducing the uncertainty in extrapolating to environmental exposures. In addition, the Bayesian methods for combining population toxicokinetics and physiologically-based pharmacokinetic models have been pioneered by INERIS, and the results of such analyses are being incorporated into several EPA assessments, including those for TRI, TETRA, and dichloromethane. These methods allow the rigorous analysis of uncertainty and variability in toxicokinetics, particularly when, as is the case for many environmental contaminants, data from multiple studies need to be analyzed together. Also, the Bayesian methodology is transparent in its underlying assumptions, an important consideration for regulatory applications. Finally, the MCSim software, developed by INERIS, is currently the best available tool for such analyses, and without it, it would be much more difficult for EPA to perform them. The open-source nature of the software also provides easy customizability, which has enabled EPA to adapt the software and increase its efficiency as needed."





Effets du cuivre sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques

> SANDRINE JOACHIM, ANNE MORIN, ÉRIC THYBAUD

Le cuivre est un métal largement utilisé - 15 millions de tonnes par an dans le monde - dans de nombreux secteurs industriels. Parmi ceux-ci, l'usage dans les câbles électriques et les applications électroniques représente la majeure partie (9,75 x 10⁶ tonnes/an). Les autres utilisations concernent la construction, la plomberie, l'équipement, les industries d'alliage, de peinture, de traitement du bois, mais aussi l'agriculture. Dans ce dernier secteur, le cuivre est fréquemment utilisé comme fongicide, algicide, bactéricide, herbicide et molluscide dans les milieux aquatiques.

Le cuivre est un métal essentiel, toxique à faible et à forte dose. Sa grande utilisation dans des usages dispersifs et sa toxicité connue pour de nombreux organismes ont tout naturellement conduit l'INERIS à évaluer les risques pour les écosystèmes aquatiques liés à leur contamination par ce métal.

OUTILS UTILISÉS

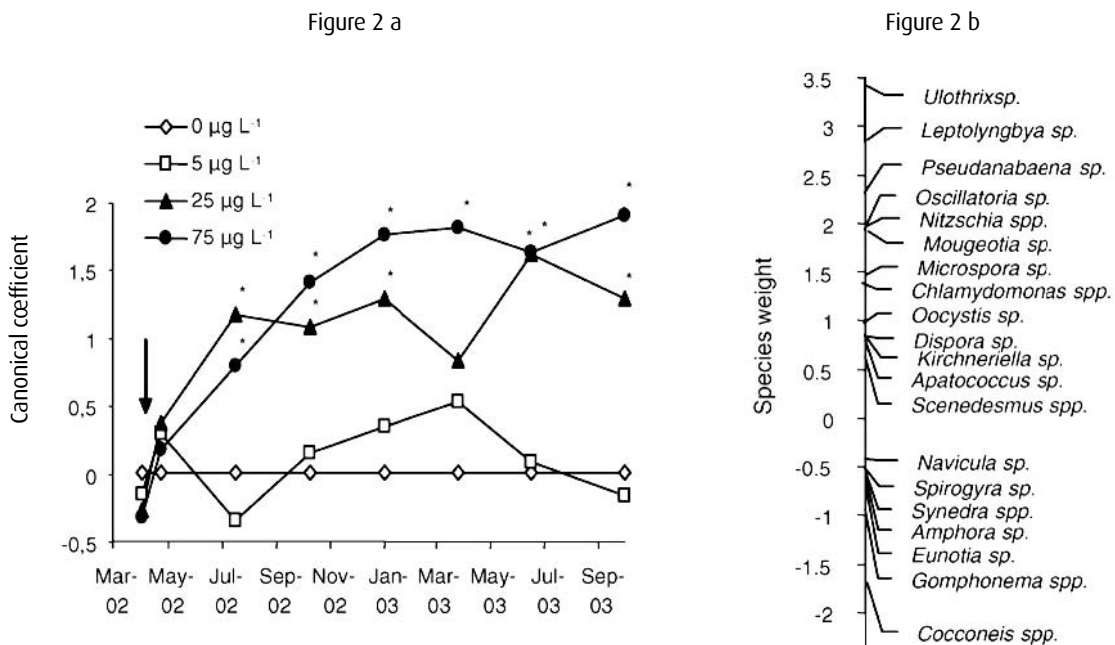
Une étude en condition semi-naturelle a donc été réalisée à l'aide de rivières expérimentales ou mésocosmes lotiques. L'intérêt de ces mésocosmes tient essentiellement au fait qu'ils combinent un certain réalisme écologique par la présence des principaux éléments constitutifs des écosystèmes naturels (sédiments, bactéries, champignons, périphyton, phytoplancton, macrophytes, invertébrés, poissons, etc.) et le contrôle des paramètres abiotiques et biotiques. Ces installations permettent d'étudier les effets des polluants à différents niveaux d'organisation biologique : organismes, populations, communautés et écosystème. Pour cette étude, douze rivières artificielles, chacune de 20 mètres de long et 1 mètre de largeur, ont été utilisées (photo 1). Le cuivre a été administré en continu sous forme de sulfate de cuivre à trois concentrations nominales (5, 25 et 75 µg/l de cuivre dissous) par groupe de trois réplicats. Trois témoins ont également été mis en place. Les travaux ont concerné :

- l'étude des effets du cuivre sur la structure des communautés de phytoplancton, de périphyton (en collaboration avec l'UMR5245 « Écologie Fonctionnelle » de Toulouse), de macrophytes, de zooplancton, de macroinvertébrés, de champignons aquatiques également en collaboration avec l'UMR5245, ainsi que sur une population de poisson, l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*).
- les effets sur le fonctionnement de l'écosystème en étudiant les effets du cuivre sur la décomposition des litières (en collaboration avec l'UMR5245), d'une part, et par une approche par modélisation qualitative des effets indirects du cuivre au sein du réseau trophique de l'écosystème en collaboration avec l'UMR7625 « Fonctionnement et Évolution des Écosystèmes » de l'ENS de Paris, d'autre part.

#1

> La plateforme mésocosmes de l'INERIS.



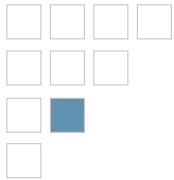


(a) Courbes de réponse principale pour le périphyton et (b) Poids des espèces d'après Roussel et al., 2007 [2]. La flèche représente le début de la contamination. Les annotations «*» indiquent qu'il y a une différence significative entre un traitement et le témoin.

RÉSULTATS

À partir d'une concentration de 25 µg/l, une diminution en abondance de plusieurs taxons de diatomées (eg : *Cocconeis* sp, *Gomphonema* sp.), de macrophytes (eg : *Lemna minor*, *Nasturtium officinale*), de champignons aquatiques (eg : *Clavariopsis aquatica*), de zooplancton (eg : *Mytilinia* sp., *Trichocerca* sp.), et de macroinvertébrés (eg : *Lymnaea* sp., *Gammarus pulex*) a été observée. Ces effets « directs » se sont ensuite propagés au sein des communautés auxquelles ces espèces appartiennent, provoquant des modifications de leur abondance relative au sein de ces communautés. Ainsi, une augmentation en abondance de plusieurs taxons a été constatée (eg : *Nitzschia* sp. chez les diatomées, *Callitriche platycarpa* chez les macrophytes, *Trichosphaerae* chez le zooplancton, *Chironomidae* chez les invertébrés). Pour chaque communauté, l'analyse des modifications structurales a été effectuée par la technique des Courbes de Réponse Principale (PRC). La PRC est une technique multivariée dérivée de l'analyse en composantes principales et spécialement conçue pour les analyses de données obtenues à partir d'expériences en micro et mésocosmes [1]. Les résultats de la PRC sont exprimés par un diagramme qui représente la déviation de la structure des communautés

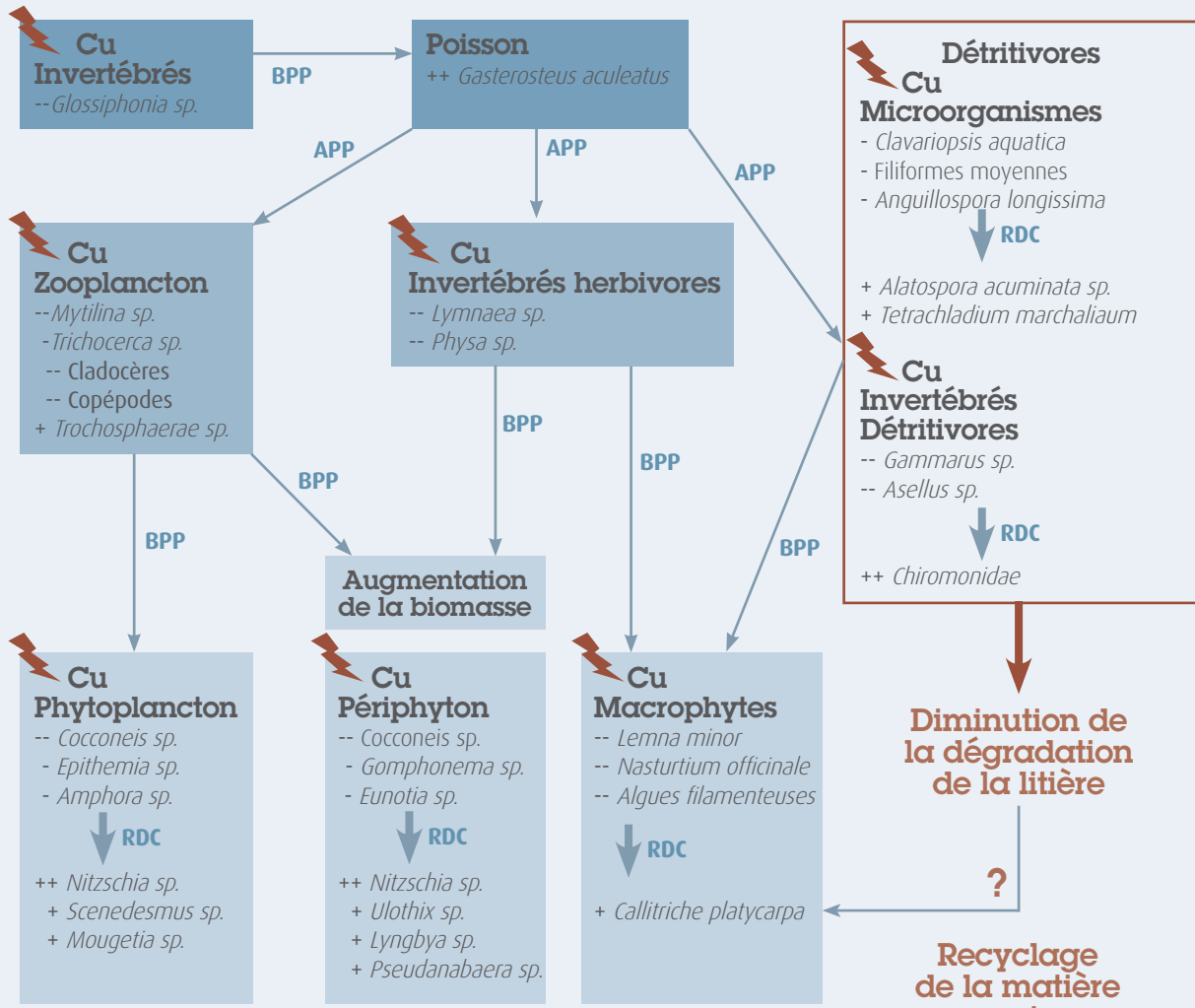
traitées par rapport à la communauté témoin (eg : communauté périphyton - figure 2a d'après [2]). Les « poids des espèces », représentés à droite du diagramme, peuvent être interprétés comme la contribution de chacune des espèces à la réponse donnée par le diagramme (figure 2b d'après [2]). Ainsi, une valeur négative élevée d'un taxon (eg : *Cocconeis* sp.) indique que ce taxon décroît dans les canaux contaminés à 25 et 75 µg/l et inversement pour une valeur positive (eg : *Ulothrix* sp.). Les effets statistiquement significatifs du traitement, sont ensuite testés en utilisant des tests de permutation de Monte Carlo couplés à des tests de Williams [2]. Grâce à ces résultats, une NOEC communauté (Concentration sans effet pour la communauté) peut être obtenue. Cette dernière a été fixée à 4 µg/l (concentration mesurée à la concentration nominale de 5 µg/l) pour l'ensemble des communautés (périphyton, phytoplancton, macrophytes, zooplancton, macroinvertébrés et champignons aquatiques). En parallèle à ces effets observés au sein des communautés, des altérations des relations entre les différentes communautés ont également été relevées. Ainsi, par exemple, la forte diminution en abondance de certains taxons de zooplancton et de macroinvertébrés brouteurs s'est traduite par une augmentation considérable de la biomasse du



périphyton très probablement par une diminution de la pression de prédation^[14], (figure 3). De même, les relations entre producteurs primaires, consommateurs et détritvres semblent également perturbées au-delà d'une concentration de 25 µg/l. En effet, un effet direct sur les invertébrés détritvres a été observé provoquant une diminution de la dégradation de la litière^[15]. Par ailleurs, un phénomène de redondance fonctionnelle chez les champignons détritvres a également été mis en évidence car, la composition de leur communauté a été affectée alors que leur fonctionnement est resté identique^[16] (figure 3). L'effet global du cuivre à l'échelle de l'écosystème a ensuite été modélisé grâce à un modèle théori-

que basé sur l'analyse en boucles. Ce dernier est basé sur les interactions trophiques de type prédateur-proie et permet de réaliser des prédictions qualitatives sur les effets indirects du cuivre. La comparaison entre les prédictions et les résultats expérimentaux met en avant la dominance de certains chemins de propagation des effets à travers l'écosystème tels que le réseau périphyton => brouteurs. Cependant, certains chemins n'ont pas pu être résolus de façon exacte (signe de l'effet indéterminé) à cause de nombreux autres facteurs écologiques tels que la compétition intra et inter spécifique qui intervient dans la structuration des communautés et donc de l'écosystème^[17].

#3 > Schéma des effets directs et indirects du cuivre.



⚡ Cu Effet direct du cuivre → Effet indirect du cuivre
 □ Producteurs primaires □ Consommateurs primaires □ Prédateurs
 APP : augmentation de la pression de la prédation
 BPP : baisse de la pression de la prédation
 RDC : réduction de la compétition

CONCLUSION

Cette étude a permis de caractériser les effets du cuivre sur la structure de différentes communautés aquatiques. Les résultats obtenus sont utilisables pour la caractérisation du danger du cuivre dans le cadre des procédures réglementaires d'évaluation des risques pour les écosystèmes.

En effet, l'évaluation des dangers est réalisée par la détermination de concentration prévisible sans effet pour les écosystèmes (PNEC). Celle-ci est dérivée de la NOEC par l'application d'un facteur d'incertitude. Ce dernier permet de considérer les incertitudes liées à l'extrapolation de données obtenues en laboratoire à la réalité des situations de terrain.

Il est compris entre 10 et 1000 dans le cas d'une NOEC obtenue à partir d'essais d'écotoxicité monospécifiques, et entre 1 et 5 pour des études en mésocosmes ou de terrain au cas par cas en fonction de la pertinence des données recueillies^[8].

En considérant l'ensemble de ces résultats, il est proposé d'appliquer un facteur de sécurité de 2 à la NOEC communauté. Ce facteur prend en compte le nombre de communautés étudiées, la qualité physico-chimique des eaux ainsi que la représentativité des conditions expérimentales. Une PNEC de 2 µg/l est ainsi déterminée.

Les évaluations des dangers du cuivre actuellement en cours dans les réglementations subsistantes existantes (793/93/CE), produits biocides (98/8/CE) et phytosanitaires (91/414/CE) prennent en compte l'ensemble des résultats d'essais d'écotoxicité aquatiques monospécifiques et des études en mésocosmes disponibles pour le cuivre, pour en déduire une PNEC. Les résultats de la présente étude en mésocosmes ont été considérés de bonne qualité et utilisés dans la détermination de ces PNECs.

□ □ ■ SUMMARY

Annually around the world, about 15 millions tons of copper are used by various activity sectors such as building, electricity, plumbing and agriculture. The aquatic environment is highly concerned by copper pollution, as it is an ultimate receptor of urban wastewater, industrial and mine effluents, agriculture run off and atmospheric deposition. One of the many characteristics of copper is that it is an essential element for organisms given that it is present in a high number of enzymes involved in metabolic processes. Nonetheless, at high concentrations, it is highly toxic to many organisms. Despite of its frequent application in natural ecosystems as an algicide, fungicide, bactericide, plant herbicide and molluscicide, few studies have been performed at the community and ecosystem levels. The ecotoxicological risk assessment and the analytical and environmental chemistry units of INERIS initiated, in 2000, a research project aimed at evaluating the effects of copper on the structure and functioning of freshwater ecosystems. A long-term lotic mesocosms experiment was thus carried on in 20 m long channels, under continuous environmentally realistic concentrations of copper (0, 5, 25 and 75 µg/l) for 18 months. Community structure of phytoplankton, periphyton, macrophytes, zooplankton, macroinvertebrates, emerging insects, aquatic hyphomycetes and population dynamics of three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*) were monitored. Copper effects on ecosystem functioning were studied through (1) leaf decomposition processes and (2) the building up of a food web model.

Principal Response Curve analyses, showed that copper at 25 and 75 µg/l altered the structure of all communities. Functioning of the leaf decomposition was also altered. Aquatic hyphomycetes showed functional redundancy in their ability to degrade leaf litter. The food web model based on functional groups qualitatively analysed with loop analyses showed that direct effects of copper propagated within the trophic levels and lead to indirect positive or negative effects. Factors other than predator-prey interactions probably played an important role in the observed community/ecosystem responses (intra-inter competition, tolerance, seasonal benefit, habitat availability, external invasion, access to more resources such as light or nutrient).

This study highlighted the importance of studying both ecosystem structure and function. Further research on functional endpoints and food web modelling seems necessary. Considering all the results, a NOEAEC of 4 µg/l was set up for freshwater ecosystems. This value can contribute to the estimation of the copper threshold value for regulatory matters.

[RÉFÉRENCES

- [1] Van den Brink P.-J., Ter Braak C.J.F., 1999. *Principal response curves: analysis of time-dependent multivariate responses of a biological community to stress*. Environmental Toxicology and Chemistry 18, 138-148.
- [2] Roussel H., Ten-Hage L., Le Cohu R., Joachim S., Gauthier L., Bonzom J.-M., 2007. *A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: Primary producers community responses*. Aquatic Toxicology 81 (2), 168-182.
- [3] Roussel H., Joachim S., Bonzom J.-M., Gauthier L. *A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: Invertebrates community responses*. Aquatic Toxicology (à paraître).
- [4] Roussel H., Joachim S., Lamothe S., Palluel O., Gauthier L., Bonzom J.-M., 2007. *A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: Individual and population responses of three-spined sticklebacks (Gasterosteus aculeatus)*. Aquatic Toxicology 82 (4), 272-280.
- [5] Roussel H., Chauvet E., Bonzom J.-M., 2008. *Alteration of leaf decomposition process in copper contaminated freshwater mesocosms*. Environmental Toxicology and Chemistry 27 (3), 637-644.
- [6] Roussel H., Chauvet E., Joachim S., Bonzom J.-M. *Structural and functional approaches to assess leaf decomposer communities' responses to copper exposure in experimental stream*. (soumis au Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences).
- [7] Roussel H., Hulot F., Joachim S., Gauthier L., Bonzom J.-M. *Food web model to investigate copper toxicity on freshwater ecosystems*. (En cours de préparation).
- [8] TGD (2000). *Technical Guidance Document on Risk Assessment*. Part II, European Commission, 328 p.

REACH, les enjeux de la recherche

Avec les dizaines de milliers de substances à enregistrer, dont mille à deux mille « très préoccupantes » à évaluer de façon approfondie (Cancérogènes, Mutagènes, Reprotoxiques, Persistants, Bioaccumulables et, de façon moins évidente, perturbateurs endocriniens...), REACH pose plusieurs défis aux sciences du vivant en toxicologie et écotoxicologie. Le premier renvoie à la disponibilité à court terme des ressources scientifiques existantes. En effet, il est nécessaire d'accroître le nombre d'experts capables de mettre en œuvre des outils et méthodologies très pointus, de même qu'un effort doit être fait pour concevoir des installations aptes à la réalisation de bio-essais. Le second est un impératif d'innovation. Conséquence de la limitation des ressources, mais aussi des problèmes éthiques et de contraintes économiques, les recherches doivent mettre l'accent sur la construction de « nouveaux outils » de toxicologie prédictive, afin d'identifier les dangers des substances en s'affranchissant le plus possible de l'expérimentation animale. C'est une originalité forte du règlement REACH que de requérir explicitement de la recherche, vers des techniques *in vitro* (bio-essais sur l'atteinte à la cellule ou à son fonctionnement tracé par les gènes, les protéines et les métabolites), et les techniques de chimie prédictive (QSAR, Quantitative Structure Activity Relationship). Ces enjeux occupent une place stratégique dans les activités de l'INERIS. Ce rapport scientifique présente notamment deux contributions décrivant, d'une part, les résultats de travaux relatifs à la modélisation QSAR et, d'autre part, le rôle de l'Institut dans un atelier de réflexion prospective visant à définir précisément les thématiques de recherche à développer pour répondre aux exigences de REACH.

Les atouts et le défi

Les grandes avancées dans l'étude du fonctionnement de la cellule, de la génétique et des disciplines associées sont des acquis sur lesquels il est possible de s'appuyer. La toxicogénomique constitue l'une des voies émergentes dans ce domaine. Elle vise à étudier la réponse à un stress toxique à l'échelle de la cellule vivante en termes d'expression des gènes et des protéines, ainsi que les conséquences sur l'activité métabolique. Elle repose sur les récents développements des « omics », la génomique, la protéomique et la transcriptomique, et enfin la métabolomique. En sélectionnant certaines cellules cibles mises en culture et exposées à des toxiques, on peut espérer arriver à cette compréhension des mécanismes, et tendre vers une toxicologie prédictive, qui serait principalement basée sur l'*in vitro*.

Pour autant, le défi actuel en termes de connaissance est celui de la maîtrise des mécanismes qui conduisent de l'interaction des substances chimiques avec les molécules du vivant jusqu'aux effets systémiques redoutés au sein de l'organisme entier. Le couplage *in vivo/in vitro* reste mal fondé en termes de bases théoriques et il est toujours extrêmement hasardeux d'inférer d'une échelle du vivant à une autre (gène, cellule, organe, organisme, pathologie...).

Par exemple, deux sujets de préoccupation majeurs que sont les perturbateurs

endocriniens et les nanoparticules sont mal analysés au niveau cellulaire. La raison est, dans le premier cas, liée au fait que les « perturbations » ne sont, en fait, que l'activation (certes inappropriée) de processus que la cellule est conçue pour mettre en œuvre : il n'y a donc pas de dommage cellulaire et l'impact sur l'organisme reste à identifier. Dans le cas des nanoparticules, la difficulté est liée à un sujet d'inquiétude qu'est le franchissement des barrières entre organes. Si les exemples sont moins simples à énoncer, ce couplage *in vivo/in vitro* est à approfondir en cancérologie et peut-être plus encore en immunotoxicologie et en reprotoxicologie.

Quelques axes et une exigence de méthode

Plusieurs axes de progrès peuvent être décrits. L'avancement sur ces axes doit cependant être coordonné, car les approches, notamment expérimentales, devront être intégratives. En particulier, les progrès pris isolément sur chaque axe doivent être « validés » sur les autres. L'objectif poursuivi est, en effet, un objectif de recherche finalisée : de nouveaux outils améliorant la toxicologie prédictive, et permettant des décisions meilleures et plus fiables sur la maîtrise du risque des substances.

Un premier axe est celui du « criblage », c'est-à-dire du développement de tests *in vitro*, dans un premier temps, pour « précibler » rapidement des dangers spécifiques aux molécules, et allant vers des prédictions de plus en plus fiables, jusqu'à pouvoir ultimement constituer une méthode alternative à l'expérimentation animale. Il s'agit, en particulier, d'aller au-delà de la cytotoxicité globale pour développer des outils (empreintes « omiques », etc.) afin d'orienter sur la nature du risque induit potentiellement par l'exposition à ces molécules, sur un plan qualitatif (nature des cibles géniques) et quantitatif (réponses en fonction des conditions d'exposition).

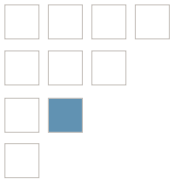
Un deuxième axe concerne le développement des outils de type « biomarqueur ».

Il peut regrouper les développements sur les biomarqueurs, changements observables aux niveaux moléculaire, biochimique, cellulaire, physiologique ou comportemental, qui permettent de prédire ou décrire l'effet d'une exposition. On peut s'intéresser - et parvenir en tout cas à distinguer - biomarqueurs d'exposition, d'effet, voire de susceptibilité.

Les biomarqueurs pourront ici être identifiés aux niveaux cellulaire ou subcellulaire, mais l'enjeu doit être de s'assurer de leur pouvoir prédictif en termes de pathologie en examinant ce qui se passe aux différents niveaux du vivant.

Un troisième axe peut regrouper les développements « *in silico* », c'est-à-dire des modélisations mathématiques à différentes échelles. Il s'agit, par exemple, des QSAR prédisant l'affinité d'une molécule pour un récepteur, mais aussi de modélisations plus systémiques de toxicodynamie, ou d'autres secteurs moins modélisés à ce jour comme le franchissement des « barrières », ou la génération de métabolites au sein de la cellule suite à une exposition (un fondement théorique à la métabolomique)... et bien sûr, le couplage entre les modélisations à ces échelles.

Un quatrième axe est celui des « modèles bioartificiels » (cocultures de cellules, « organes artificiels », modèles de barrières). Les méthodes *in vitro* classiques ne permettent d'étudier qu'un type cellulaire isolé à la fois, en prenant en compte les nombreuses interactions prédominantes dans l'*in vivo* et absentes dans l'*in vitro*. Il s'agit ici de développer des modèles biologiques permettant d'aborder *in vitro* des questions systémiques et fonctionnelles, et les interactions entre niveaux de complexité du vivant.



REACH, LES ENJEUX DE LA RECHERCHE

La modélisation QSAR

> ENRICO MOMBELLI

#1

> Lors d'une analyse QSAR les structures moléculaires des composés chimiques sont traitées mathématiquement afin d'obtenir des descripteurs moléculaires qui codent les divers éléments structuraux des substances en cours d'évaluation (exemple : topologie, géométrie, propriétés quantiques). Les valeurs numériques de ces descripteurs sont utilisées pour établir une équation qui permet de modéliser la corrélation statistique entre la variation de la structure moléculaire et l'effet toxique investigué.



FORMALISATION
MATHÉMATIQUE



DE LA STRUCTURE
MOLÉCULAIRE

- ➔ Propriétés Physico-chimiques
- ➔ Descripteurs Topologiques
- ➔ Champs moléculaires stériques et électrostatiques
- ➔ Descripteurs géométriques
- ➔ Descripteurs quantiques

La modélisation semi-empirique QSAR [(Quantitative) Structure Activity Relationship] a comme objectif la prédiction des effets d'une variation de la structure moléculaire sur l'activité biologique (exemple : relation entre structure moléculaire et propriétés mutagéniques). Cette modélisation peut être quantitative (QSAR) ou qualitative (SAR). La première stratégie de modélisation prévoit trois éléments :

- a) un ou plusieurs descripteurs de la structure moléculaire (figure 1) ;
- b) un effet à prédire ;
- c) une relation mathématique permettant de décrire la corrélation statistique entre les descripteurs moléculaires et l'effet biologique à modéliser. La relation mathématique est d'habitude établie grâce à des méthodes statistiques multivariées.

LA PREMIÈRE FORMALISATION

La première formalisation d'une activité biologique en fonction de la structure chimique est historiquement attribuée à Hansch. Dans un travail ayant fait école^[1], Hansch proposa une équation permettant de modéliser l'activité biologique en fonction de l'hydrophobicité et les caractéristiques électroniques du benzène grâce à cette relation :

$$\log (1/C)=k_1 \text{ Log } P - k_2(\text{Log } P)^2+ k_3\sigma+ k_4$$

où C est la concentration de la substance qui est nécessaire pour produire un niveau défini de réponse biologique, Log P est le logarithme du coefficient de partage entre l'n-octanol et l'eau, σ est le paramètre d'Hammett et k_1-k_4 sont des constantes. Le paramètre d'Hammett est une mesure de l'effet électronique des substituants électro-capteurs ou électro-donneurs et Log P modélise la capacité d'un composé à diffuser dans les membranes lipidiques. En effet, Hansch remarqua qu'il y a une valeur optimale pour Log P : si elle est trop grande, le composé chimique restera à l'intérieur de la membrane ; si elle est

trop petite, le composé chimique restera dans la phase aqueuse.

En revanche, les modèles qualitatifs sont basés sur la reconnaissance d'alertes structurelles qui sont d'habitude associées à l'effet toxique investigué.

Un exemple d'alertes structurelles est donné sur la figure 2.

« SYSTÈMES EXPERTS »

Il existe également plusieurs logiciels commerciaux, qui sont communément qualifiés de « Systèmes Experts », et qui peuvent être regroupés en quatre catégories : QSAR prêts à l'emploi, systèmes basés sur l'implémentation informatisée de l'expertise toxicologique (reconnaissance de toxicophores), systèmes à même de définir et reconnaître de façon automatique les toxicophores, systèmes basés sur des arbres décisionnels^[2].

Dans leur globalité, les QSAR constituent une méthode alternative à l'expérimentation animale reconnue par le règlement européen REACH^[3] qui présente les avantages de réduire soit le nombre d'animaux nécessaires à l'expérimentation toxicologique soit les coûts relatifs à l'implémentation de stratégies de test^[4,5].

Cette possibilité d'utilisation réglementaire pose soit le problème de la fiabilité de ces modèles soit le problème relatif à une interprétation correcte des prédictions. Pour y répondre, l'OCDE a publié, en février 2007, un guide technique pour la validation des modèles QSAR dans un contexte réglementaire. Ce guide détaille cinq principes qui visent à établir une base commune pour une utilisation correcte des modèles QSAR lors de l'estimation de propriétés toxicologiques :

- 1/ L'effet toxicologique modélisé doit être bien défini.
- 2/ L'algorithme qui a généré les prédictions doit être transparent afin que la logique à la base de la modélisation puisse être facilement reproductible.

- 3/ L'utilisation du modèle doit être limitée à son domaine d'application. Autrement dit, les substances chimiques que le modèle peut analyser doivent avoir une structure similaire aux substances utilisées lors de sa paramétrisation.
- 4/ La prédiction doit être accompagnée par des mesures statistiques appropriées qui décrivent la robustesse, l'ajustement et la prédictivité du modèle.
- 5/ Une interprétation mécaniste du modèle doit être donnée si une telle rationalisation est possible.

Les quatre premiers critères sont impératifs pour l'acceptation des prédictions QSAR. Le cinquième reste facultatif mais son interprétation correcte permet une consolidation épistémologique de la pertinence du modèle^[6-9] qui pourrait se révéler cruciale dans un contexte réglementaire.

DES MODÈLES SEMI-EMPIRIQUES

Les QSAR sont des modèles semi-empiriques. Leur pouvoir prédictif et leur domaine d'application dépendent de la composition du jeu d'apprentissage utilisé pour calibrer le modèle. Un modèle QSAR parfait ne pourra donc pas permettre une prédiction pour toute sorte de substance et avec un niveau de précision supérieure à celui de la méthode expérimentale qui a généré les données du jeu d'apprentissage. La nécessité d'avoir accès à des bases de données de qualité, qui contiennent une proportion comparable de substances toxiques et inoffensives, est donc primordiale pour le développement de modèles QSAR ayant une bonne spécificité et sensibilité.

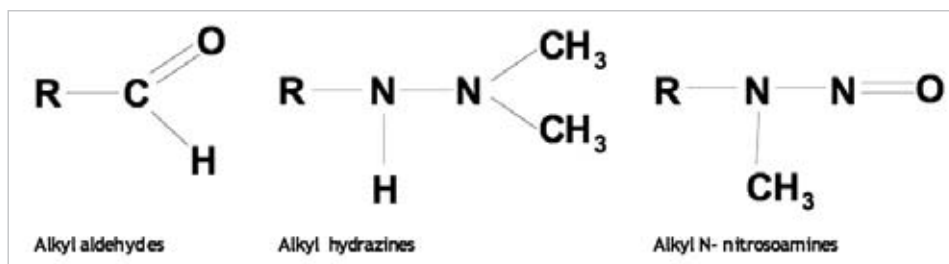
L'expertise QSAR développée à l'INERIS^[9] a mis en évidence les limites du pouvoir prédictif des

logiciels QSAR qui sont censés permettre une prédiction pour plusieurs familles chimiques. En effet, la généralisation d'un modèle QSAR pour la modélisation de catégories moléculaires qui sont très hétérogènes en termes de structure correspond à une perte de spécificité par rapport à la capacité à discriminer les molécules toxiques et les molécules inoffensives. Parallèlement à ce constat, ces études ont également révélé deux autres aspects importants : premièrement, la pleine conformité aux critères de l'OCDE n'est possible que pour une minorité des modèles et, deuxièmement, la définition rigoureuse du domaine d'application du modèle est primordiale pour une interprétation correcte des résultats.

D'un point de vue plus général, il est important de noter que la quasi-totalité des modèles QSAR disponibles en littérature ne peuvent pas modéliser la toxicité des mélanges chimiques. Pour cette raison, les efforts de recherche dans le domaine de la modélisation Structure-Activité sont en train d'étendre leur domaine d'application vers l'analyse des mélanges chimiques afin de prendre en compte les phénomènes de synergie ou d'antagonisme parmi les composants toxiques d'un mélange chimique^[10-12].

Dans un futur proche, les modèles de toxicologie prédictive *in silico* connaîtront un développement important dont les jalons les plus importants seront l'implémentation de modèles avec une prédictivité rigoureusement vérifiée pour tous les effets toxicologiques et une analyse exhaustive de ces effets pour les principales familles chimiques. La réalisation de ces objectifs suppose une collaboration étroite et efficace entre le secteur industriel, les instances réglementaires et le milieu académique.

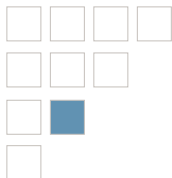
#2



> Trois alertes structurelles pour la mutagénicité d'après Ashby et Tennant^[13]. La présence de ces alertes à l'intérieur d'une molécule est souvent associée avec des propriétés mutagéniques. Leur identification lors d'un criblage virtuel d'une base de données permet d'identifier les molécules potentiellement toxiques de telle sorte qu'elles puissent servir de base à une investigation toxicologique plus approfondie (optimisation des ressources expérimentales).

[RÉFÉRENCES

- [1] Hansch C., 1969. *A quantitative approach to biochemical structure-activity relationships*. Accounts of chemical research, 2, 232-239.
- [2] Dearden J. C., 2003. *In silico prediction of drug toxicity*. Journal of Computer-Aided Molecular Design 2003, 17, 119-27.
- [3] Barratt M., 2003. *QSAR, Read-across and REACH*. Alternatives to laboratory animals, 31, 463-5.
- [4] Pedersen F., de Bruijn J., Munn S. and Van Leeuwen K., 2003. *Assessment of additional testing needs under REACH*. (http://ihcp.jrc.ec.europa.eu/docs/ecb/reach_testing_needs.pdf)
- [5] ECVAM, *REACH and the need for Intelligent Testing Strategies*. (ihcp.jrc.ec.europa.eu/docs/20051107its.pdf) Issued by the Institute for Health and Consumer Protection, 2005.
- [6] Serafimova R., Todorov M., Nedelcheva D., Pavlov T., Akahori Y., Nakai M. and Mekenyan O., 2007. *QSAR and mechanistic interpretation of estrogen receptor binding*. SAR QSAR Environ Res, 18, 389-421.
- [7] Roberts D. W., Patlewicz G., Kern P. S., Gerberick F., Kimber I., Dearman R. J., Ryan C. A., Basketter D. A. and Aptula A. O., 2007. *Mechanistic applicability domain classification of a local lymph node assay dataset for skin sensitization*. Chem Res Toxicol, 20, 1019-30.
- [8] Benigni R., Bossa C., Netzeva T. and Worth A., 2007. *Collection and Evaluation of QSAR Models for Mutagenicity and Carcinogenicity*. EUR 22623 EN. (<http://ecb.jrc.it/qsar/publications/>)
- [9] Mombelli E., 2008. *An evaluation of the predictive ability of the QSAR software packages*. DEREK, HAZARDEXPERT and TOPKAT, to describe chemically-induced skin irritation. Alternatives to laboratory animals, 36, 15-24.
- [10] Riviere J. E. and Brooks J. D., 2007. *Prediction of dermal absorption from complex chemical mixtures: incorporation of vehicle effects and interactions into a QSPR framework*. SAR QSAR Environ Res, 18, 31-44.
- [11] Wang B., Yu G., Hu H. and Wang L., 2007. *Quantitative structure-activity relationships and mixture toxicity of substituted benzaldehydes to Photobacterium phosphoreum*. Bull Environ Contam Toxicol, 78, 503-9.
- [12] Zhang L., Zhou P. J., Yang F. and Wang Z. D., 2007. *Computer-based QSARs for predicting mixture toxicity of benzene and its derivatives*. Chemosphere, 67, 396-401.
- [13] Ashby J. and Tennant R. W., 1991. *Definitive relationships among chemical structure, carcinogenicity and mutagenicity for 301 chemicals tested by the U.S. NTP*. Mutat Res, 257, 229-306.



REACH, LES ENJEUX DE LA RECHERCHE

Atelier de Réflexion Prospective REACH

> EMMANUEL LEMAZURIER

À travers le Règlement européen REACH, l'Union européenne s'est donnée l'objectif majeur de maîtriser les impacts et les risques liés aux substances chimiques sur l'homme ou sur l'environnement. La mise en œuvre de ce règlement nécessite un travail important de recherche pour faire évoluer les méthodes d'évaluation, qui sont aujourd'hui coûteuses et posent des problèmes d'éthique (expérimentation animale), mais aussi pour accélérer la mise en œuvre des nouvelles méthodes, et pour accompagner les évolutions des filières économiques utilisant des substances chimiques. Ce travail se place en amont de la connaissance et nécessite le développement d'une recherche conséquente.

PRO-REACH est un consortium de 18 partenaires - représentants de l'industrie, de la communauté scientifique et des organismes publics - rassemblés pour fournir à l'Agence Nationale de la Recherche des préconisations en termes de Recherche et Développement, nécessaires à l'accompagnement de la mise en œuvre de REACH. Ce consortium, pour mener à bien cette mission et assurer une cohérence nationale, s'est associé avec l'expertise collective du CNRS (« Substances chimiques : Quels enjeux scientifiques dans le contexte de REACH »).

UNE RÉFLEXION SUR 2 ANS

Ces partenaires se sont regroupés pour mener une réflexion sur 2 ans au sein de cinq groupes de travail.

Deux groupes de travail transversaux s'intéresseront aux aspects sociétaux de la mise en œuvre de REACH :

- Acceptabilité sociale et économique ;
- Qualification et validation rapide des méthodes d'évaluation.

Ces groupes s'attacheront à définir les outils demandés par REACH (essais, dossiers, analyses socio-économiques, protocoles d'échange de

données et besoins de recherche) tant dans le domaine de la chimie pour un développement durable, que dans le domaine des sciences sociales et économiques.

Trois autres groupes de travail s'intéresseront aux aspects scientifiques de l'évaluation *a priori* des propriétés toxicologiques et environnementales des produits et des substances :

- Besoins en recherche pour les enjeux liés à l'innovation chimique et ses risques, travail réalisé dans le cadre de l'expertise collective du CNRS ;
- Méthodes alternatives et prédictives en écotoxicologie ;
- Méthodes alternatives et prédictives en toxicologie.

L'Atelier de réflexion prospective a débuté, le 21 janvier 2008, par un Atelier de dialogue, regroupant tous les partenaires et des représentants des différentes composantes de la société. Cet atelier a permis de dégager une vision partagée des enjeux qui servent de base aux travaux des groupes de travail.

Durant la première année, les groupes de travail se sont attachés à dresser un état des lieux, d'une part des problèmes actuels et à venir, et d'autre part des opportunités.

Une première réunion de restitution a eu lieu le 6 mai 2008, suivie le 24 septembre, d'un séminaire, au CNRS, au cours duquel les cinq groupes ont présenté l'avancée de leurs travaux. À cette occasion les participants ont mis en évidence plusieurs aspects à prendre en compte dans le développement d'outils prédictifs. Ils ont insisté sur la nécessité :

- de s'appuyer sur des données d'exposition réalistes, en se basant sur des scénarii d'exposition et des analyses physico-chimiques ;
- d'élucider les effets en intégrant les différents niveaux de complexité du vivant ;
- de veiller à la bonne gestion des données (stockage, mode d'interrogation) ;
- d'opérer un changement d'échelle, en termes

de capacité d'analyse pour prendre en compte un plus grand nombre de substances.

La deuxième année sera consacrée à l'élaboration d'une stratégie scientifique à la fois en lien avec la recherche fondamentale et ancrée au niveau européen (notamment en termes de forces et de faiblesses, de retombées dans les autres domaines...). Ce travail a conduit à des préconisations sur les besoins en Recherche et Développement et sur les évolutions souhaitables pour faire sauter des verrous économiques et réglementaires éventuels. Un deuxième séminaire restituera les résultats des cinq groupes de travail et conclura les travaux de PRO-REACH.

Les travaux de PRO-REACH seront largement diffusés au travers des réseaux de ses membres et sur Internet via un site dédié à l'atelier (<http://extranet-proreach.apesa.fr>).

ANTIOPES, UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DES TRAVAUX DE TOXICOLOGIE EN FRANCE

Le Plan National Santé Environnement (PNSE) et les recommandations du Comité National d'Évaluation de la Recherche sur la thématique « Recherche sur l'animal et santé de l'homme » ont insisté sur le besoin de développer la toxicologie en France.

À l'échelle internationale, le règlement REACH va exiger l'évaluation des dangers d'une dizaine de milliers de substances chimiques. Ni les outils scientifiques, ni les capacités d'étude et recherche actuels ne suffiront à répondre à ce besoin. Il n'existe pas, en France, d'infrastructure de toxicologie expérimentale qui se consacre exclusivement à l'évaluation des dangers des substances pour l'homme et l'environnement. Dans le même temps, l'Académie Nationale des Sciences des États-Unis a proposé des axes de développement de la toxicologie qui recensent en partie les concepts et outils appropriés.

ANTIOPES est une infrastructure de recherche nationale en toxicologie expérimentale qui a été développée dans le but de répondre à ces défis. La base d'ANTIOPES est son réseau scientifique de partenaires*. Elle a pour objectifs de coupler les approches *in vitro*, *in silico* et *in vivo* et de regrouper des moyens français de recherche en toxicologie environnementale pour construire les outils de la toxicologie prédictive.

ANTIOPES permet des démarches de recherche partenariale, car les besoins dans le domaine sont partagés par les acteurs économiques, et en

particulier par les industriels producteurs et utilisateurs de substances chimiques. Cette infrastructure permet à la France de contribuer à la stratégie européenne de mise en œuvre de REACH.

Les travaux d'ANTIOPES doivent contribuer à construire des outils et modèles de prédiction des dangers des substances pour l'homme et les écosystèmes, en utilisant de moins en moins d'animaux, même sur des sujets complexes et critiques comme la cancérogenèse ou la reprotoxicité.

ANTIOPES se structure autour de l'approche systémique. Plus précisément, cette approche se forge sur la capacité à prédire, à partir d'un mécanisme cellulaire ou moléculaire, les effets sur l'organisme entier. Il s'agit donc de travailler sur le développement de biomarqueurs et de modèles aux différents niveaux du vivant (dimension trans-échelle). Six grandes problématiques sont concernées :

- Le pré-screening des molécules et les signatures biologiques :

Quelle stratégie d'évaluation toxicologique des molécules mettre en œuvre en utilisant les bases de données, les outils de décision de type QSAR et les tests bio-statistiques ?

- Développement d'outils spécifiques de prédictibilité :

Quels moyens développer pour la transposition et l'extrapolation *in vitro/in vivo* et inter-espèces ?

- Effets des faibles doses à long terme :

Quels biomarqueurs sont spécifiques à une modélisation ?

- Les effets de co-exposition :

Comment aborder les problématiques de type mélange ?

- Comprendre et évaluer la variabilité inter-individus :

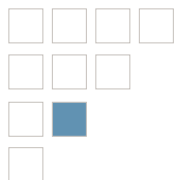
Comment évaluer la spécificité cellulaire, l'expologie et la susceptibilité de réponse aux substances toxiques inter-individus ?

- Le passage des barrières physiologiques :

Comment comprendre et modéliser les étapes du franchissement des barrières physiologiques ?

Le défi en termes de connaissance est celui de la maîtrise des mécanismes qui conduisent de l'interaction des substances chimiques avec les molécules du vivant jusqu'aux effets systémiques redoutés au sein de l'organisme entier, car le couplage *in vitro/in vivo* reste sur des bases théoriques encore mal fondées. Pour y répondre, les équipes qui travaillent aux différentes échelles du vivant doivent collaborer et avoir accès à des capacités expérimentales adaptées dans leurs domaines spécifiques.

* INERIS, Inserm, INRA, UMR CNRS 6600 Biomécanique et génie biomédical, Université de Marseille, Faculté de Médecine, IFR11, Institut LaSalle Beauvais, Université de Paris VII, CEA/Biopuces, AFSSAPS.



□ □ ■ SUMMARY

QSAR modeling in toxicology

Structure Activity Relationships are computational techniques used to predict biological activities such as toxicological effects. They are based on the "structure-function" paradigm according to which the biological effect of a molecule can be explained quantitatively (QSAR models) or qualitatively (SAR models) by considering the spatial arrangement of the atoms that constitute a molecule.

These computer-based models can be used in the framework of the REACH regulation to predict toxic properties and to help in reducing the number of animal experiments. The regulatory acceptance of QSAR predictions is therefore a topic of intense interest both for industry and regulatory agencies. The expertise carried out at the INERIS highlighted the importance of validity and predictability assessment of QSAR models in order to support a correct application of their predictions within a regulatory context.

□ □ ■ SUMMARY

Prospective workshop on REACH implementation

Through the European Regulation REACH, the European Community aims to control impacts and hazards of chemicals on human being or environment. The carrying out of this regulation needs an important research work in order to implement evaluation methods, which are still expensive today and deal with ethical enquiry (animal experimentation), but also in order to speed up the setting up of new methodologies and to go with evolutions of economical patterns using chemicals. This work takes place upstream knowledge and needs development of a weighty research. PRO-REACH is a 18 partners consortium from industry, scientific community and public organisms, gathered to provide to Agence Nationale de la Recherche research and development recommendations required to go with the carrying out of REACH.

These partners will carry on a 2 years reflection in five working groups.

Two transversal working works will deal with societal aspects of REACH setting up.

- Social and economical acceptability of REACH setting up.
- Fast qualification/validation of evaluation methods.

These working groups will take up with the definition of tools required by REACH (assays, files, social and economical analyses, data exchange protocols and research needs) as well as in the field of chemical for a sustainable development as in the field of social and economical sciences. Three working groups will deal with scientific aspects of a priori toxicological and environmental properties of products and substances :

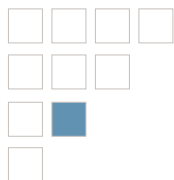
- Research needs for challenges related to chemical innovation and its risks (is taken in charge by the CNRS global expertise « chemicals : what scientific challenges in the REACH context »).
- Alternatives and predictives methods in Ecotoxicology.
- Alternatives and predictives methods in Toxicology.

The project will start by a meeting of all the partners for an "Atelier de Dialogue" with invited representatives of the different constituents of society. This meeting will allow to define a shared vision of the issues, which will be the base for the further discussions in the working groups.

A first year will then be dedicated by working groups to set up a state of the art, in one hand in term of actual and future problems, and on the other hand in term of opportunities. Results from the 5 working groups will be presented during a workshop which will be held at the end of the first year. The second year will be dedicated to prospective work. The goal will be to elaborate a scientific strategy both linked to fundamental research as well as to European level (mainly in term of strength and weakness, in term of repercussions in other fields,...). This work will lead to recommendations on REACH needs in term of research and development and on needed evolutions to blast economical and regulatory bolts. A second workshop will translate results from the 5 working groups and will conclude PRO-REACH project.

Each working group will provide two reports, the first entitled "state of the art" at the end of the first year and the second entitled "prospective" at the end of the second year. Workshops, set up in order to integrate results from the 5 working groups will be published.

PRO-REACH works will be widely disseminated through networks members and on the internet via a dedicated site.



REACH, LES ENJEUX DE LA RECHERCHE

Vers la prédiction des propriétés d'explosibilité des substances chimiques par les outils de la chimie quantique et les méthodes statistiques QSPR

> PATRICIA ROTUREAU, GUILLAUME FAYET

La réglementation européenne relative aux produits chimiques est en plein mouvement, avec le nouveau règlement REACH sur les substances chimiques qui est entré en vigueur le 1^{er} juin 2007 et le Système Général Harmonisé (SGH) de classification et d'étiquetage des produits chimiques qui devrait être appliqué en Europe en 2008. Ces réglementations impliquent la nécessité de déterminer des caractéristiques toxicologiques, écotoxicologiques mais également physico-chimiques d'environ 30 000 substances chimiques circulant en Europe. Il est totalement impensable de considérer une détermination expérimentale systématique de ces caractéristiques dans les délais d'enregistrement des substances chimiques prévus par REACH (en termes de faisabilité matérielle, coût financier et temporel). Aussi, le règlement REACH et le projet de règlement SGH font référence à d'autres moyens d'évaluation tels que les modèles (Q)SAR/(Q)SPR (relations (quantitatives) structure-activité et structure-propriété) comme méthodes alternatives à l'expérimentation. Les modèles prédictifs développés, une fois validés scientifiquement, peuvent être utilisés pour indiquer la présence ou l'absence d'une certaine propriété dangereuse. Ceci est vrai pour l'évaluation de la toxicité et de l'écotoxicité des produits (qui soulève également un problème d'éthique et nécessite d'éviter de réaliser des tests inutiles sur animaux) comme pour celle des propriétés physico-chimiques, au premier rang desquelles l'explosibilité.

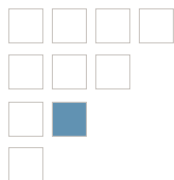
L'INERIS, expert dans la détermination expérimentale des propriétés d'explosibilité et d'inflammabilité (risques d'explosion et d'incendie) des substances chimiques condensées, a lancé, dès 2007, un programme de recherche dénommé « REPLACE : Recherche sur les Propriétés et L'Activité de Composés Explosifs » dont l'objectif principal est le développement de méthodes prédictives (alternatives ou complémentaires à l'expérimentation) pour l'évaluation de ces pro-

priétés dangereuses à caractère physico-chimique. Cette recherche, tout à fait nouvelle à l'INERIS, vise à faire évoluer les méthodes d'évaluation et proposer dans un premier temps un nouvel outil de screening pour l'évaluation de propriétés reconnues comme complexes telles que l'explosibilité, en utilisant les outils de la chimie quantique (calculs *ab initio*) et les approches de type QSPR. Le recours à de telles méthodes prédictives s'avère d'ailleurs indispensable lorsque la substance n'existe qu'en très faible quantité (impossibilité matérielle de réalisation des tests qui nécessitent une quantité notable de substance) ou lorsqu'elle présente des propriétés toxiques par exemple. Cette recherche a démarré avec une thèse intitulée « Développement de méthodes QSPR/QSAR pour la prédiction à l'échelle moléculaire de l'explosibilité et de l'inflammabilité des substances chimiques » conjointement avec le doctorant Guillaume Fayet et avec l'ENSCP (École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, équipe de modélisation des systèmes complexes).

GÉNÉRALITÉS SUR LES APPROCHES DE TYPE QSAR/QSPR

Les relations (quantitatives) structure-activité ou structure-propriété sont des méthodes prédictives des caractéristiques mesurables à partir de caractéristiques microscopiques relatives à leur structure moléculaire. La structure moléculaire de la substance (l'assemblage d'atomes liés par des liaisons chimiques dans différents agencements dans l'espace, mais également ses caractéristiques électriques et magnétiques) confère ainsi à la molécule ses propriétés intrinsèques. Ces méthodes s'appliquent en général au cas de substances pures.

Construire un modèle QSPR consiste alors à établir une relation mathématique entre une propriété donnée quantifiable et la structure moléculaire qui peut être décrite par différents paramètres



(ou descripteurs). Le modèle ainsi mis en place est du type $Propriété = f(Descripteurs)$.

Différents descripteurs sont employés pour caractériser la structure moléculaire des composés. Il peut s'agir de descripteurs^[1] :

- constitutionnels : composition élémentaire, nombre de groupements fonctionnels ;
- géométriques : distances, angles, angles dièdres ;
- topologiques : indices topologiques ;
- électroniques : charges atomiques ;
- quantiques : dureté moléculaire, électronégativité, indice d'électrophilicité.

La construction d'un modèle QSPR et sa qualité de prédiction nécessite de :

- disposer d'une base de données (importante) contenant des structures moléculaires et des données expérimentales correspondantes pour la propriété à prédire (obtenues dans les mêmes conditions expérimentales) ;
- de sélectionner des descripteurs adaptés pour la propriété à prédire.

L'obtention du modèle est réalisée à l'aide de différents outils : réseaux de neurones artificiels, algorithmes génétiques ou plus couramment à l'aide d'analyses statistiques (régressions linéaires, non linéaires, multi-linéaires). Dans ce dernier cas, le modèle peut prendre la forme d'une équation linéaire du type :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + \dots + A_nX_n$$

où Y est la propriété à prédire, X_i sont les descripteurs moléculaires et A_i les constantes associées de la régression.

Le modèle QSPR ainsi construit dépend donc de trois paramètres principaux : la base de données, les descripteurs sélectionnés et la méthode utilisée pour les corrélés.

Enfin, l'interprétation de la prédiction d'une propriété et donc l'obtention d'un modèle QSPR fiable nécessitent l'intervention du jugement d'expert dans le domaine considéré.

Bien que peu développées pour la prédiction de propriétés dangereuses comme l'explosibilité ou l'inflammabilité des substances, les relations (quantitatives) structure-propriété semblent cependant tout indiquées puisqu'il est bien connu que la présence de liaisons ou de groupements spécifiques dans la molécule constitue une première indication de ces propriétés.

PRÉDICTION DE L'EXPLOSIBILITÉ DES SUBSTANCES CHIMIQUES PAR UN MODÈLE DE TYPE QSPR

L'explosibilité d'une substance peut être caractérisée, en termes de propriétés macroscopiques, par sa sensibilité à divers stimuli mécaniques/thermiques ou par son potentiel énergétique dans la réaction de décomposition (figure 1). Aussi, l'INERIS s'est intéressé dans un premier temps à mettre en évidence des corrélations entre les structures moléculaires de 22 composés nitroaromatiques (nitrobenzène et dérivés) potentiellement explosifs et la propriété expérimentale de chaleur de décomposition (ou enthalpie de décomposition) reflétant la stabilité thermique de ces composés. Les données expérimentales de cette base de données sont issues de la littérature [2, 3].

Le développement d'un modèle QSPR a consisté à déterminer, au niveau moléculaire, les propriétés structurales et physico-chimiques de ces 22 composés nitrés^[4]. Ainsi, 14 descripteurs moléculaires de différentes natures (géométriques, électroniques) ont été calculés. Il s'agit principalement de

#1

> Principe de la construction d'un modèle QSPR pour la prédiction des propriétés d'explosibilité.

Descripteurs microscopiques

- Constitutionnels
- Topologiques
- Géométriques
- Électroniques...

Propriétés macroscopiques

- Température de décomposition
- Chaleur de décomposition...
- Sensibilité à l'impact...

Modèle QSPR

- Régressions linéaires, non linéaires, multilinéaires
- Réseaux de neurones
- Algorithmes génétiques

descripteurs issus de calculs quantiques utilisant la théorie de la fonctionnelle de la densité^[9] (DFT pour Density Functional Theory) et réalisés à l'aide du logiciel Gaussian03^[9]. La théorie de la fonctionnelle de la densité est une méthode de modélisation moléculaire quantique fondée sur le principe selon lequel il est possible de caractériser un système moléculaire par sa seule densité électronique (figure 2).

Trois types de descripteurs sont utilisés :

- descripteurs locaux caractérisant la liaison C-NO₂ : longueur de la liaison d_{C-N_v}, charge du groupement NO₂, potentiel électrostatique à mi-distance de la liaison C-N (V_{mid}) et énergie de dissociation de la liaison C-NO₂ ;
- descripteurs globaux : masse moléculaire, balance en oxygène, moment dipolaire, polarisabilité moyenne et énergie d'atomisation ;
- descripteurs issus de la DFT conceptuelle^[7] : énergies des orbitales HOMO (la plus haute occupée) et LUMO (la plus basse non occupée), électronégativité, dureté moléculaire et indice d'électrophilicité (figure 3).

Les corrélations de ces 14 descripteurs (calculés pour chacune des 22 molécules) avec la propriété de chaleur de décomposition ont été établies à partir de simples régressions linéaires : des corrélations significatives ont été mises en évidence avec la masse moléculaire (R²=0,76), la balance en oxygène (R²=0,64), l'énergie de l'orbitale LUMO (R²=0,71) et l'indice d'électrophilicité (R²=0,75) comme indiqué dans la figure 4 mais elles ne sont pas suffisantes pour prédire la propriété expérimentale.

Ces descripteurs ont alors été intégrés dans une analyse multivariable en utilisant des régressions multilinéaires à l'aide du logiciel Codessa Pro^[8].

Un premier modèle prédictif de type QSPR de la chaleur de décomposition a été obtenu à partir de 6 descripteurs issus de calculs quantiques comme indiqué dans l'équation ci-dessous et sur la figure 5^[9, 10].

$$-\Delta H = 33854\eta + 40050\omega - 1030.3a + 33785e_{HOMO} + 25.1DM - 14.0 E_{diss} + 973.2$$

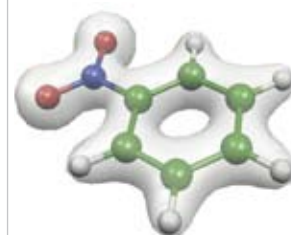
$$R^2 = 0.91, \quad R^2_{cv} = 0.84$$

Le graphique de la figure 5 représente les valeurs calculées pour l'enthalpie de décomposition en fonction des valeurs expérimentales. L'importance de la présence des groupements explosophores NO₂ est observée. En effet, ce graphique met en évidence 3 groupes de molécules distinctes, à savoir, les molécules mono, bi et tri-nitroaromatiques de notre base de données.

Le modèle QSPR développé à ce jour à partir d'une faible base de données est prometteur car non seulement corrélé (R²=0,91) mais aussi prédictif (R²_{cv}=0,84 obtenu à l'aide d'une méthode de validation croisée (*cross-validation method*)). Il montre en outre l'importance de considérer des descripteurs issus de calculs quantiques puisque la meilleure régression multilinéaire est obtenue avec ce type de descripteurs. Bien sûr, pour obtenir de meilleures corrélations, la suite de la recherche consistera à augmenter la base de données de molécules nitroaromatiques et à sélectionner d'autres types de descripteurs (de type constitutionnel, tels que le nombre de groupements NO₂ dans la molécule, et de type topologique).

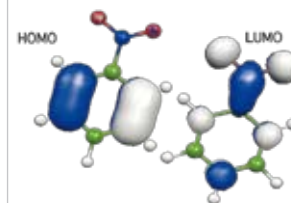
#2

> Représentation de la densité électronique pour une molécule de nitrobenzène dans son état fondamental.



#3

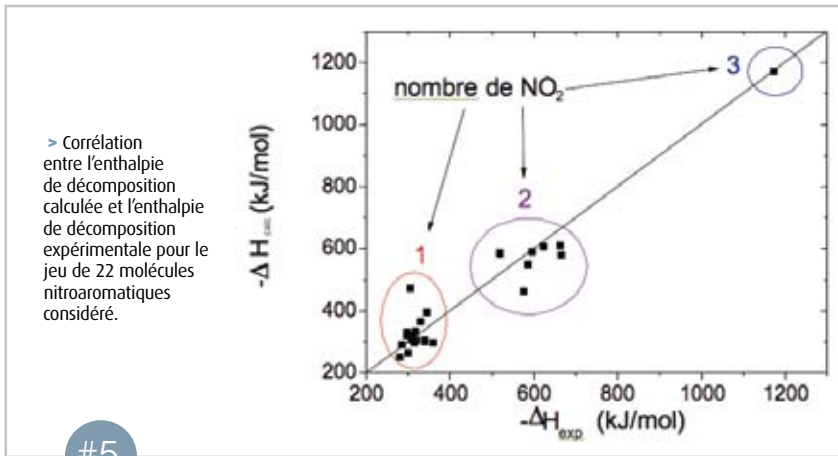
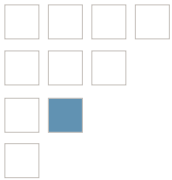
> Représentation des orbitales moléculaires HOMO et LUMO du nitrobenzène.



> Coefficients de corrélation obtenus entre l'enthalpie de décomposition expérimentale et les descripteurs moléculaires étudiés pour le jeu de 22 molécules nitroaromatiques considéré.

#4

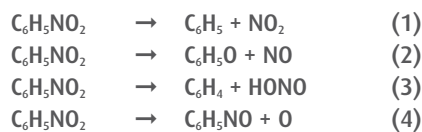
Descripteur		R ²
D _{cn}	Distance C-N	0,10
Mw	Masse moléculaire	0,76
OB	Balance en oxygène	0,64
e _{HOMO}	Énergie de la HOMO	0,35
e _{LUMO}	Énergie de la LUMO	0,71
DM	Moment dipolaire	0,10
χ	Électronégativité	0,52
η	Dureté	0,00
ω	Indice d'électrophilicité	0,75
Q _{NO2}	Charge de NO ₂	0,46
V _{mid}	Potentiel à mi-distance de la liaison C-N	0,01
a	Polarisabilité principale	0,00
E _{atom}	Énergie d'atomisation	0,21
E _{diss}	Énergie de dissociation de la liaison C-N	0,42



ÉTUDE DES MÉCANISMES DE DÉCOMPOSITION DU NITROBENZÈNE ET DE SES DÉRIVÉS

L'étude précédente indique que la chaleur de décomposition ne présente pas de corrélation significative avec l'énergie de dissociation de la liaison C-NO₂ (R²=0,42). La rupture de cette liaison est pourtant communément considérée comme l'étape limitante de la décomposition des composés nitrés. Pour comprendre cette observation, une étude théorique complète des chemins de décomposition de ces composés nitroaromatiques a été réalisée à l'aide de la DFT^[11].

Différents chemins réactionnels (parfois complexes) de décomposition des composés nitroaromatiques ont été mis en évidence tant par des études expérimentales que théoriques. Par exemple, pour le nitrobenzène^[12] :

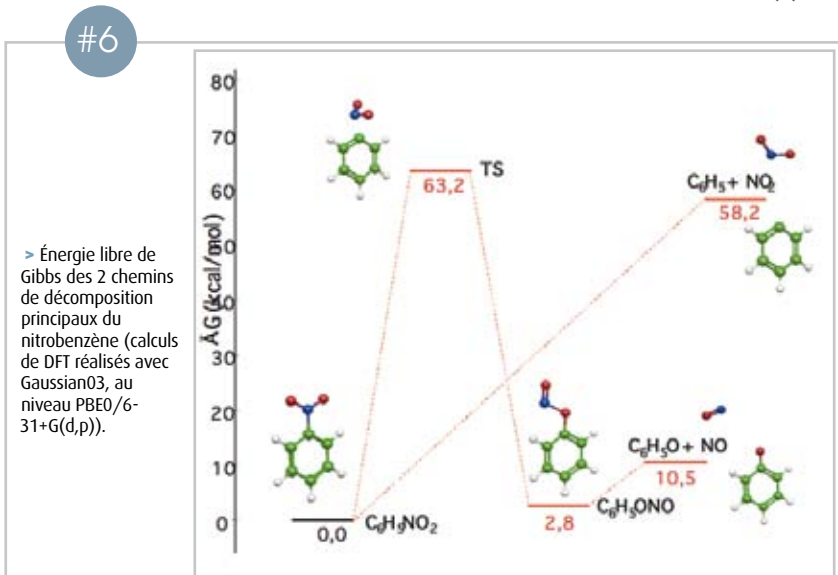


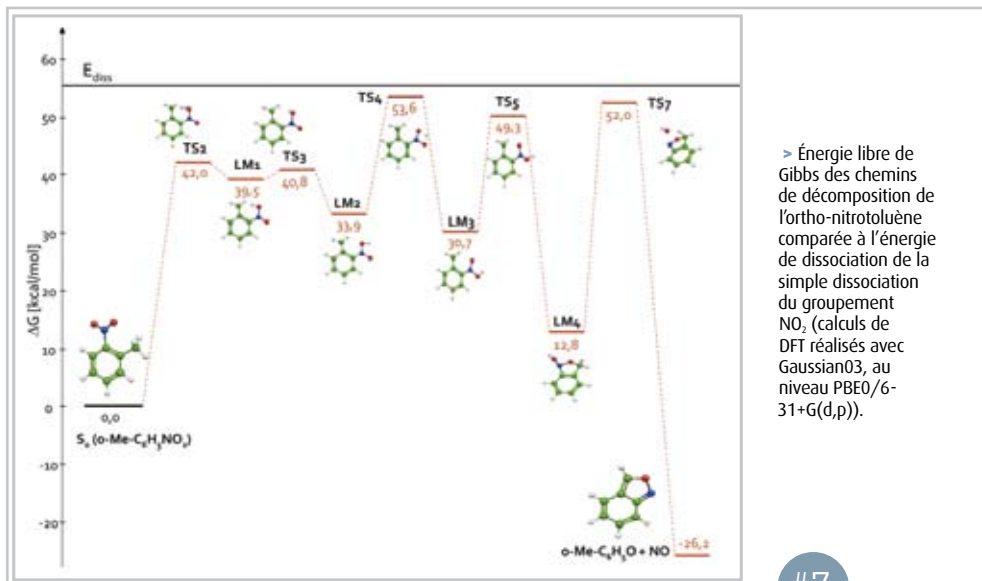
Nos travaux portent sur les deux premiers chemins qui sont les principaux chemins de décomposition en compétition dans le domaine de température de décomposition de 500K à 800K du nitrobenzène. Le premier correspond à la rupture de la liaison C-NO₂ et mène à la formation des deux radicaux C₆H₅· et NO₂·. Le second est un mécanisme en deux étapes : le nitrobenzène s'isomérise en phénylnitrite (C₆H₅ONO) puis la liaison N-O se casse pour donner les deux radicaux C₆H₅O· et NO·.

Ces deux mécanismes de décomposition du nitrobenzène ont été étudiés à l'aide des calculs de DFT. Les structures des différents réactifs, minima locaux, états de transition et produits tout le long de ces chemins ont été optimisées et les énergies correspondantes calculées (diagramme énergétique schématisé de la figure 6). Ainsi, l'énergie de dissociation du premier chemin réactionnel est très proche de l'énergie d'activation du second schéma réactionnel (inférieure à 10 kcal/mole), ce qui peut expliquer la faible corrélation de l'énergie de dissociation de la liaison C-NO₂ avec la propriété de stabilité thermique.

L'influence de la nature et de la position (ortho, méta, para) de plusieurs substituants (NH₂, OH, CH₃, COOH et NO₂) ajoutés au nitrobenzène sur ces deux chemins réactionnels a également été étudiée^[11] et on met en évidence une légère influence de la nature du substituant en positions para et ortho pour les deux chemins étudiés mais pas en position méta. Ceci est dû à l'effet de résonance qui apparaît seulement en positions para et ortho pour le groupement NO₂. Cependant, la substitution n'influence pas la compétition de ces deux chemins réactionnels, à savoir que l'énergie de dissociation correspondant à la rupture de la liaison C-NO₂ est toujours inférieure à l'énergie d'activation du deuxième chemin de décomposition envisagé.

Pour les nitrobenzènes substitués en position ortho, de nouveaux mécanismes de décomposition plus complexes apparaissent (dus à l'interaction intramoléculaire entre le substituant et le groupe NO₂). La figure 7 en est une illustration pour le cas de l'ortho-nitrotoluène^[13]. Elle montre que ce nouveau chemin réactionnel est prépondérant sur la simple dissociation du groupement NO₂ (l'énergie d'activation est cette fois inférieure à l'énergie de dissociation). Cette observation pourrait expliquer le manque de corrélation existant entre l'énergie de dissociation de la liaison C-NO₂ et l'enthalpie de décomposition, étant donné que 9 molécules parmi 22 de la base de données considérée pour le développement du modèle QSPR précédent sont substituées en position ortho (figure 7).





> Énergie libre de Gibbs des chemins de décomposition de l'ortho-nitrotoluène comparée à l'énergie de dissociation de la simple dissociation du groupement NO₂ (calculs de DFT réalisés avec Gaussian03, au niveau PBE0/6-31+G(d,p)).

#7

PERSPECTIVES

La recherche se poursuit en portant l'effort sur plusieurs axes :

- améliorer la prédictivité du modèle QSPR permettant de décrire la stabilité thermique des composés nitroaromatiques en augmentant la taille de la base de données (nitroaromatiques et autres molécules nitroalcanes...), en utilisant de nouveaux descripteurs (notamment des descripteurs topologiques) et en testant les capacités des réseaux de neurones artificiels ;
- développer d'autres modèles prédictifs permettant d'estimer d'autres propriétés relatives à

l'explosibilité des substances telle que la sensibilité à l'impact ;

- poursuivre l'étude théorique des chemins de décomposition des molécules explosibles indissociable du développement et de l'interprétation des modèles prédictifs.

[COLLABORATIONS

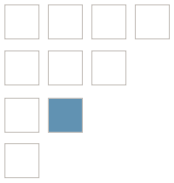
- École Nationale Supérieure de Chimie de Paris, équipe de modélisation des systèmes complexes ;
- CEA-DAM, Le Ripault (Laboratoire de Simulation des Matériaux Énergétiques).

□ □ ■ SUMMARY

The new European regulation of chemicals named REACh (for "Registration, Evaluation and Authorization of CHemicals", published by the European Commission in December 2006) implies that a tremendous number of substances (up to 30000) may require a new assessment of hazardous properties. Therefore, there is a growing interest in evaluating capabilities of predictive methods for assessing hazardous properties of chemical substances as a screening process. If Quantitative Structure-Property Relationship (QSPR) type methods have been up to now mainly devoted to screening toxic properties, their use to establish relationships between the explosibility of dangerous substances and structural, energetic or physicochemical descriptors could lead to new perspectives. This contribution focuses on the case of a series of nitroaromatic compounds, which are all expected to present more or less severe explosive properties due to the presence of the nitro group. In particular, this paper shows that we developed a QSPR model with a multilinear regression model which links correctly adequate molecular descriptors of nitroaromatic compounds with thermal stability (taken as a macroscopic property related to explosibility). In this model, the descriptors are mostly obtained by *ab initio* quantum chemical calculations. Moreover, we present a detailed theoretical investigation on the decomposition pathways of substituted nitrobenzenes using quantum chemical methods that provide pertinent information for the use of descriptors in relation with energetic aspects to access to more robust QSPR models.

[RÉFÉRENCES

- [1] M. Karelson, *Molecular Descriptors in QSAR/QSPR*. 2000, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Y.S. Duh, C. Lee, C.C. Hsu, D.R. Hwang and C.S. Kao, *Chemical incompatibility of nitrocompounds*. Journal of Hazardous Materials, 1997. 53(1-3): p. 183-194.
- [3] S.R. Saraf, W.J. Rogers and M.S. Mannan, *Prediction of reactive hazards based on molecular structure*. Journal of Hazardous Materials, 2003. 98(1-3): p. 15-29.
- [4] G. Fayet, P. Rotureau, C. Adamo and L. Joubert, *Development of a QSPR method for the prediction of chemicals explosibility*. Proceedings of Europro2007 meeting, 8-11 October 2007, Beaune, France, 2007.
- [5] R.G. Parr and W. Yang, *Density-Functional Theory of Atoms and Molecules*. 1989, New York: Oxford University Press.
- [6] *Gaussian 03, Revision B.03*, Gaussian Inc., Pittsburg, PA, USA. 2003.
- [7] P. Geerlings, F. De Proft and W. Langenaeker, *Conceptual density functional theory*. Chem. Rev., 2003. 103, p. 1793-1973.
- [8] www.codessa-pro.com.
- [9] G. Fayet, P. Rotureau, C. Adamo and L. Joubert, *Development of a QSPR method for the prediction of chemicals explosibility*. American Chemical Society meeting, 6-10 April 2008, New-Orleans, USA, 2008.
- [10] P. Rotureau and G. Fayet, *Development of predictive methods for screening explosibility properties of chemical substances*. Communication at the OECD IGUS Energetic and oxidising substances working group meeting, Stockholm (Suède), 16-18 May 2008 (see www.oecdigus.org).
- [11] G. Fayet, L. Joubert, P. Rotureau and C. Adamo, *A theoretical study of the decomposition reactions in substituted nitrobenzenes*. Journal of Physical Chemistry A, 2008. 112, p. 4054-4059.
- [12] S. Xu and M.C. Lin, *Computational Study on the Kinetics and Mechanism for the Unimolecular Decomposition of C₆H₅NO₂ and the Related C₆H₅ + NO₂ and C₆H₅O + NO Reactions*. J. Phys. Chem. B, 2005. 109, p. 8367-8373.
- [13] S.C. Chen, S.C. Xu, E. Diau and M.C. Lin, *A Computational Study on the Kinetics and Mechanism for the Unimolecular Decomposition of o-Nitrotoluene*. Journal of Physical Chemistry A, 2006. 110, p. 10130-10134.



Approche multi-biomarqueurs pour la surveillance des écosystèmes aquatiques

> WILFRIED SANCHEZ, JEAN-MARC PORCHER

La directive européenne cadre sur l'eau (Directive 2000/60/CE) propose un cadre réglementaire pour la politique de l'eau au niveau communautaire afin d'améliorer, de protéger et de prévenir les dégradations de la qualité de l'eau en Europe. Cette directive fixe pour objectif de parvenir à un bon état écologique et chimique des eaux d'ici à 2015. Pour ce faire, elle prévoit l'établissement de programmes de surveillance de la qualité des eaux portant sur la détermination de paramètres chimiques et écologiques, afin de dresser un tableau cohérent et complet de l'état des eaux en Europe. Ces deux approches, bien que complémentaires, ne permettent toutefois pas de prendre en compte la complexité de la contamination et les effets précoces de celle-ci sur les organismes. Afin de combler cette lacune, un axe majeur de recherche en écotoxicologie au cours des 25 dernières années a consisté dans le développement de biomarqueurs. Les biomarqueurs se définissent comme un changement observable ou mesurable à différents niveaux d'organisation biologique qui reflète l'exposition d'un organisme à au moins un polluant. Ces outils biologiques permettent donc d'appréhender les effets précoces de la contamination sur les organismes en prenant en considération la biodisponibilité des contaminants, leur métabolisation et les interactions entre molécules. Toutefois, afin de prendre en compte la complexité de la contamination et de ses effets, il est nécessaire de recourir à un ensemble de biomarqueurs décrivant une large gamme d'effets^[1,2].

Les travaux menés à l'INERIS s'inscrivent dans une stratégie globale sur l'utilisation des biomarqueurs dans un contexte de multi-pollution. Ils visent plus particulièrement à développer un ensemble cohérent de biomarqueurs reflétant les effets de la contamination sur différentes fonctions physiologiques d'un organisme, et à déterminer les conditions et les limites d'utilisa-

tion de ces biomarqueurs dans un contexte de biosurveillance des milieux aquatiques.

L'ÉPINOCHÉ À TROIS ÉPINES COMME ESPÈCE MODÈLE

Dans le cadre des études menées à l'INERIS, plusieurs espèces de poissons sont utilisées telles que le chevaine (*Leuciscus cephalus*), le gardon (*Rutilus rutilus*), le chabot (*Cottus gobio*) et l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*). Ces espèces sont essentiellement choisies en raison de leur large distribution dans les hydrosystèmes français et européens mais aussi en fonction des connaissances disponibles pour chaque espèce et de leur utilisation préalable comme espèce sentinelle en écotoxicologie. Dans ce contexte, l'épinoche apparaît comme un modèle biologique particulièrement intéressant. En effet, l'utilisation de cette espèce dans différentes disciplines a contribué à l'acquisition de nombreuses connaissances relatives à la biologie, à l'histoire de vie, au comportement ou encore à l'écologie de l'épinoche. De plus, la petite taille de ce poisson facilite son maintien et son utilisation dans des conditions de laboratoire. *In situ*, l'épinoche est une espèce non migratrice, largement distribuée dans l'hémisphère nord où elle colonise les milieux aquatiques continentaux, estuariens et côtiers, offrant alors la possibilité d'utiliser cette espèce dans des programmes de surveillance de l'environnement. Plus spécifiquement, différentes études ont mis en lumière la pertinence de la mesure de différents biomarqueurs chez des épinoches collectées dans les milieux naturels afin d'évaluer les effets précoces de la contamination chez le poisson^[3]. Parmi ces biomarqueurs figure la spiggin, une protéine spécifique de l'épinoche dont la synthèse est placée sous contrôle androgénique, et qui est utilisable comme marqueur d'androgénicité, offrant alors

BIOMARQUEUR	TYPE D'EFFET	MOLÉCULES DE RÉFÉRENCE
Activité 7-éthoxyrésorufine-O-dééthylase (EROD)	Biotransformation	β -naphthoflavone
Glutathion-S-transférase (GST)	Biotransformation / Stress oxydant	Prochloraz
Superoxyde Dismutase (SOD)	Stress oxydant	Cuivre
Catalase (CAT)	Stress oxydant	Cuivre
Glutathion Peroxydase (GPx)	Stress oxydant	Cuivre
Glutathion total (GSH)	Stress oxydant	Cuivre
Lipoperoxydation (TBARS)	Stress oxydant	Cadmium, Diuron
Acétylcholinestérase (AChE)	Neurotoxicité	Fénitrothion
Vitellogénine (VTG)	Perturbation endocrinienne	17 β -oestradiol
Spiggin (SPG)	Perturbation endocrinienne	17 α -méthyltestostérone

> Tableau 1 : biomarqueurs utilisés à l'INERIS pour la surveillance des milieux aquatiques. Pour chaque paramètre, le type d'effet associé et les molécules de référence utilisées pour la caractérisation des réponses sont présentés.

un avantage indéniable à l'épinoche par rapport aux autres espèces couramment employées en écotoxicologie de terrain.

DÉVELOPPEMENT ET CARACTÉRISATION DES BIOMARQUEURS EN CONDITIONS CONTRÔLÉES

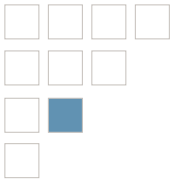
Préalablement à l'étude et l'application des biomarqueurs *in situ*, une étape permettant le développement et l'optimisation des méthodes de dosage mais également la caractérisation des biomarqueurs en conditions contrôlées s'avère nécessaire. Dans un premier temps, plusieurs dosages de biomarqueurs classiquement utilisés en écotoxicologie ont été optimisés chez différentes espèces. Parmi les biomarqueurs d'intérêts figurent des enzymes de biotransformation, des marqueurs du stress oxydant ainsi qu'un marqueur de neurotoxicité (tableau 1). De plus, afin de prendre en compte l'exposition des organismes à des polluants de type perturbateurs endocriniens, des méthodes de dosage immuno-enzymatiques ont été développées pour le dosage de la vitellogénine, un biomarqueur d'oestrogénicité chez les poissons mâles [1], mais également pour le dosage de la spiggin, un marqueur d'androgénicité spécifique des épinoches femelles [2].

Suite aux développements méthodologiques, la réponse des biomarqueurs est caractérisée, en conditions contrôlées, à l'aide de substances de référence et/ou de contaminants environnementaux (tableau 1) afin de déterminer la spécificité, la sensibilité, l'inductibilité et la réversibilité de chaque paramètre. Les données

obtenues permettent de positionner les espèces étudiées les unes par rapport aux autres sur la base de l'inductibilité ou de la sensibilité des réponses. Par exemple, l'activité EROD de l'épinoche se caractérise par un facteur maximal d'induction de 18 obtenu suite à une exposition de 72 heures à 2,7 μ M de β -naphthoflavone [6]. Ce résultat met alors en avant, chez l'épinoche, une inductibilité de l'activité EROD comparable à celle qui est rapportée chez des espèces de cyprinidés comme le chevaine et le gardon. Les résultats de ces expérimentations en conditions contrôlées permettent également d'établir un certain nombre de conditions et de limites pour l'utilisation des biomarqueurs notamment aux travers de l'étude de la réversibilité des réponses. Ils fournissent aussi une base d'interprétation des résultats acquis *in situ* en permettant de positionner ces derniers par rapport à des valeurs obtenues dans des conditions déterminées (*e.g.* induction maximale, dépuration, interaction entre inducteurs et inhibiteurs).

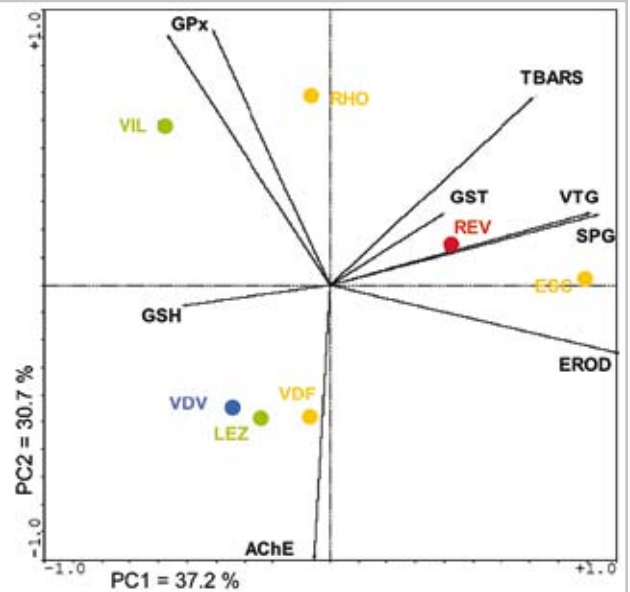
ÉVALUATION DES BIOMARQUEURS SUR LE TERRAIN

La caractérisation des biomarqueurs est également réalisée *in situ*, dans différents contextes, afin de prendre en compte la complexité du milieu et de sa contamination. Une première étape consiste à déterminer l'influence de facteurs biotiques et abiotiques sur les niveaux de base des biomarqueurs. Pour ce faire, des épinoches ont été échantillonnées mensuellement sur un site de référence pendant une période de six mois compatible avec les contraintes liées à



#1

> Analyse en Composante Principale obtenue suite à la mesure de 8 biomarqueurs sur 7 sites d'échantillonnage caractérisés par des contaminations qualitativement et quantitativement différentes. Cette analyse met en avant la complémentarité des paramètres étudiés et la relation entre les sites d'étude et la réponse des biomarqueurs. Les couleurs des sites se réfèrent à la classe d'Indice Poisson Rivière (IPR, données ONEMA).

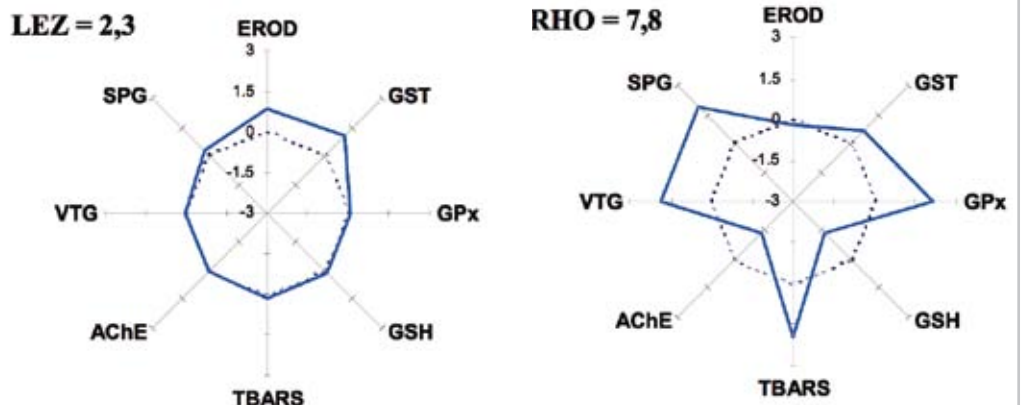


l'échantillonnage des poissons (avril à octobre). Les résultats obtenus ont mis en avant l'impérative nécessité de prendre en considération des facteurs aussi variés que le sexe des individus, leur statut reproducteur ou encore leur taille afin de pouvoir utiliser les données recueillies dans un contexte de surveillance de l'environnement. De plus, ces résultats donnent la possibilité d'édicter certaines règles d'échantillonnage permettant de limiter la variabilité des biomarqueurs en n'utilisant que des poissons adultes hors de leur période de reproduction et dans une classe de taille relativement restreinte^[7]. Forts de la connaissance d'un certain nombre de limites des biomarqueurs, ces derniers ont été mesurés chez des épinoches échantillonnées dans différents cours d'eau du Nord de la France caractérisés par des profils de contamination variés. Ce travail, réalisé en collaboration avec l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), a permis de mettre en

évidence la complémentarité des biomarqueurs sélectionnés, le pouvoir discriminant de cette batterie (figure 1) et l'intérêt de recourir à une telle approche pour la caractérisation des effets précoces de la contamination chez le poisson^[8]. De plus, la confrontation des mesures de biomarqueurs à d'autres données environnementales telles que des données qualitatives et/ou quantitatives sur la contamination du milieu, mais aussi des mesures populationnelles visant à évaluer les effets de la contamination de l'environnement au sein des populations et des communautés a permis la démonstration de l'intérêt d'une approche multi-paramétrique pour la caractérisation de la contamination des sites et des effets. Enfin, dans un objectif de synthèse et de vulgarisation des résultats obtenus, un indice écotoxicologique a été développé et validé^[9]. Cet indice qui s'appuie sur le principe d'écart à la référence édicté par la Directive européenne

#2

> Indices biomarqueurs calculés sur deux sites. La Lézarde (LEZ) est un site faiblement contaminé, peu impacté par la pollution et qui présente une valeur d'indice faible. La Rhonelle (RHO) est un site contaminé par des activités urbaines et agricoles et qui présente une réponse des biomarqueurs plus importante reflétée par une valeur d'indice biomarqueurs élevée.



cadre sur l'eau combine une valeur numérique reflétant l'intensité des effets mesurés et une représentation graphique permettant de visualiser la réponse spécifique de chaque biomarqueur. À l'image des biomarqueurs, cet indice permet la discrimination des sites sur la base de la réponse des biomarqueurs (figure 2) et apporte une information complémentaire à

celle d'autres indices classiquement utilisés pour la gestion des milieux aquatiques qui sont basés sur la contamination chimique des milieux ou sur la perturbation des communautés¹⁹. Son applicabilité dans le cadre de réseaux pérennes de surveillance des milieux aquatiques tels qu'ils sont définis par la Directive européenne cadre sur l'eau reste toutefois à valider.

☐☐■ SUMMARY

To assess the effects of contamination at low organisation levels, several studies have focused on biomarker utilization as indicators of chemical exposure and early responses of aquatic organisms. However, to evaluate the various responses to pollutant mixtures in organisms, the usefulness of a set of complementary biomarkers has been demonstrated and is now applied in environmental biomonitoring programs. In this context, the selected sentinel species appears as a critical factor for an accurate description of pollution effects in organisms. The stickleback is a pollution-tolerant fish which inhabit most aquatic ecosystems in the northern hemisphere. It has been proposed as a suitable fish species for detecting endocrine disruption induced by environmental pollutants and appears as an interesting model fish species for environmental biomonitoring. However, few data describe biomarker responses in wild stickleback populations.

In the present work, a set of biomarkers including biotransformation enzymes, oxidative stress parameters, neurotoxicity marker but also estrogenic and androgenic end-points was developed and validated.

Firstly, biomarker assays were set up in the stickleback. Indeed, several biomarkers such as EROD and acetylcholinesterase activities are classically employed in various fish species but methodological adaptation is required. Moreover, specific immuno-enzymatic assays were developed to quantify endocrine disruption biomarkers such as vitellogenin and spiggin. Secondly, this set of biochemical biomarkers was validated *in situ*. Sticklebacks collected monthly in a reference was used to determine basal level of investigated parameters but also to characterise the effects of gender and sampling season on biomarker responses. According to the results of this experiment, male and female fish from sites sampled in Autumn and characterised by various contamination levels were analysed. This study showed that biomarker responses in stickleback are valuable parameters to describe the effects of contamination in aquatic organisms. Moreover, biomarkers appear as complementary tools with other environmental parameters including chemical analysis in water and sediment but also population disturbances. In the last step, an ecotoxicological indicator was set-up to summarize biomarker responses recorded in investigated sites. This indicator allows site ranking based on biomarker measurement and provides a complementary data to other environmental indicators.

.....

[RÉFÉRENCES

[1] Van der Oost R., Goksoyr A., Celander M., Heida H., Vermeulen N.P.E., 1996. *Biomonitoring of aquatic pollution with feral eel (Anguilla anguilla). II. Biomarkers: pollution-induced biochemical responses.* Aquatic Toxicology 36, 189-222.

[2] Sanchez W., Ait-Aissa 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.

[3] Katsiadaki I., 2007. *The use of the stickleback as a sentinel and model species in ecotoxicology.* In: Östlund-Nilsson S., Mayer I., Huntingford F.A. (Eds.), *Biology of the three-spined stickleback.* CRC Press, Boca Raton, London, New York, pp. 319-351.

[4] Flammarion P., Brion F., Babut M., Garric J., Migeon B., Noury P., Thybaud E., 2000. *Induction of fish vitellogenin and alterations in testicular structure: preliminary results of estrogenic effects in chub (Leuciscus cephalus).* Ecotoxicology 9, 127-135.

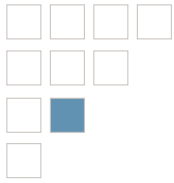
[5] Sanchez W., Goin C., Brion F., Olsson P.-E., Goksoyr A., Porcher J.-M., 2008. *A new ELISA for the three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) spiggin, using antibodies against synthetic peptide.* Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology 147, 129-137.

[6] Sanchez W., Piccini B., Porcher J.-M., 2008. *Effect of prochloraz fungicide on biotransformation enzymes and oxidative stress parameters in three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.).* Journal of Environmental Science and Health Part B: Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes, 43 (1), 65-70.

[7] Sanchez W., Piccini B., Ditche J.-M., Porcher J.-M., 2008. *Assessment of seasonal variability of biomarkers in three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) from a low contaminated stream: implication for environmental biomonitoring.* Environment International, 34 (6), 791-798.

[8] Sanchez W., Katsiadaki I., Piccini B., Ditche J.-M., Porcher J.-M., 2008. *Biomarker responses in wild three-spined stickleback (Gasterosteus aculeatus L.) as a useful tool for freshwater biomonitoring: a multiparametric approach.* Environment International, 34 (4), 490-498.

[9] Sanchez W., 2007. *Approche multi-biomarqueurs chez l'épinoche à trois épines (Gasterosteus aculeatus L.): un modèle pour la surveillance des écosystèmes aquatiques continentaux.* Thèse de doctorat du Muséum national d'Histoire Naturelle, 149p + annexes.



La présence de nanotubes de carbone dans l'environnement présente-t-elle un risque pour notre santé ?

> DAN ELGRABLI, GHISLAINE LACROIX

Par leur petite taille, un milliardième de mètre, les nanoparticules confèrent des propriétés nouvelles aux matériaux existants. Par exemple, des matériaux réputés isolants se transforment en conducteurs d'électricité, de très fines particules possèdent une forte résistance mécanique... Ainsi, plusieurs secteurs industriels tels que la cosmétologie, la micro-électronique, le bâtiment, l'automobile ont déjà des produits issus des nanotechnologies. La population risque donc d'être exposée. Lors du Grenelle de l'Environnement, il a été décidé de demander aux pouvoirs publics de réaliser un bilan coûts/avantages systématique de la mise sur le marché de produits contenant des nanoparticules ou nanomatériaux. À partir des résultats des études en cours, des dispositions seront prises pour renforcer l'information et la protection des salariés et de la population. Ces particules étant susceptibles de se trouver en suspension dans l'air, une des principales voies d'exposition à considérer dans notre environnement est la voie respiratoire. C'est dans ce contexte que nous réalisons l'étude de la toxicité de nanoparticules manufacturées et en particulier l'étude de nanotubes de carbone (NTC) introduits

dans l'appareil respiratoire. Cette particule, de quelques nanomètres de diamètre et de quelques micromètres de long, possède la forme d'un cheveu (voir photo 1) et est pressentie pour de nombreuses applications en électronique (transistor optique, microprocesseur...), aéronautique (revêtements des fusées ou combinaison des astronautes), médecine (vecteur de médicament, molécules d'aide au diagnostic de pathologies)... Ainsi, de nombreuses questions se posent. Les nanoparticules induisent-elles une réponse inflammatoire ou un stress oxydant ? Altèrent-elles ou détruisent-elles les cellules pulmonaires ? Quel est le devenir de ces particules dans le corps ? Franchissent-elles la barrière épithéliale pulmonaire ? En quelle quantité ? Migrent-elles vers d'autres compartiments biologiques ? Ont-elles la capacité d'affecter le système nerveux, immunitaire, cardiovasculaire, reproducteur ? Ce sont quelques-unes des questions auxquelles les travaux en cours au sein de l'INERIS tentent d'apporter des réponses.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

• Préparation de la suspension de NTC

En présence d'albumine de veau foetal, différentes solutions contenant des NTC (0, 0,007, 0,07, 0,7 mg/ml) ont été produites par faible sonication selon la méthode précédemment décrite [1, 2].

• Exposition des animaux

Des rats ont été instillés par voie intratrachéale avec une unique dose de 0, 1, 10 ou 100 µg de NTC à partir des solutions produites. Les animaux ont été suivis jusque six mois après l'exposition et différents paramètres biologiques ont été évalués (voir paragraphes suivants).

• Capacité respiratoire

À différents temps (1, 7, 30, 90 et 180 jours) après l'instillation de NTC, l'analyse de nombreux paramètres respiratoires (temps inspiratoire,

#1



temps expiratoire, temps de relaxation, volume courant, Penh comme indicateur de la bronchoconstriction...) a été réalisée à l'aide d'un pléthysmographe.

• Anatomopathologie

À chaque temps et chaque dose, les poumons des rats ont été extraits, coupés, colorés et observés à l'aide d'un microscope pour déceler d'éventuelles modifications pathologiques du poumon telles qu'un granulome ou une fibrose. Afin de confirmer les observations, une partie du poumon a été utilisée pour mesurer les variations du taux de collagène, un biomarqueur de la fibrose.

• Inflammation et stress oxydant

L'étude de l'inflammation et du stress oxydant a été effectuée par la quantification de biomarqueurs spécifiques. Plus précisément, la variation des taux d'ARNm des interleukines IL1 α , IL1 β , IL2, IL4, IL6 et de l'IFN γ et du TNF α a été quantifiée en biologie moléculaire par PCR quantitative et au niveau protéique par ELISA selon la technologie Luminex.

• Étude de la biodistribution et clairance

Afin de suivre le NTC étudié au sein de l'organisme, l'analyse de la liaison entre le nickel (Ni) (catalyseur de la production du NTC et présent à hauteur de 0,5 %) et le NTC a été réalisée par microscopie électronique à transmission couplée par une sonde EDX.

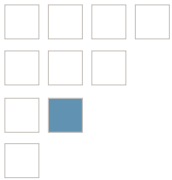
La présence de NTC dans de nombreux organes (foie, reins, rate, cœur, cerveau, poumon, testicules, ganglions, thymus) a été quantifiée par ICP-OES afin de déterminer la localisation des NTC et un éventuel passage de la barrière pulmonaire.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Des rats ont été instillés par une dose unique de 0, 1, 10 ou 100 μg de NTC. Après 1, 7, 30, 90 et 180 jours, aucune modification des capacités respiratoires n'a été observée. De même, aucune

variation des taux d'expression des biomarqueurs de l'inflammation, du stress oxydant ou de formations anatomopathologiques n'a été notée^[9]. Les premières études portant sur la toxicité des NTC par instillation intratrachéale ont montré la formation de fibrose et granulomes ainsi que l'induction de marqueurs biologiques de l'inflammation et du stress oxydant^[3, 4, 5]. Cependant, deux récents travaux réalisés par inhalation, n'ont pas permis d'observer d'inflammation ou de formation de granulomes^[6, 7]. Une hypothèse pouvant expliquer ces différences a été avancée et repose sur le fait que les NTC sont hydrophobes et donc difficiles à remettre en suspension. Ainsi, il est possible de supposer que, lors des précédentes études réalisées par instillation, de gros agglomérats, normalement non respirables, sont parvenus de façon forcée au poumon profond, engendrant inflammation et formation de granulomes. À l'INERIS, une méthode permettant la production d'une suspension de NTC ayant une relative bonne dispersion a été mise au point. Plus de 80 % des agglomérats de NTC produits ont une taille respirable (inférieure à 10 μm). Par conséquent, les résultats semblent être en accord avec cette hypothèse et ceux obtenus lors des études par inhalation.

Par ailleurs, il a été montré que le Ni restait lié au NTC dans l'organisme et donc qu'il était un bon traceur des NTC dans l'organisme^[9]. Ainsi, on a pu observer que les NTC restent présents pendant au moins 1 mois dans le poumon puis sont éliminés par un long mécanisme (37 % et 16 % des NTC sont encore présents à 3 et 6 mois). Afin de comprendre le devenir de ces particules dans l'organisme, on a recherché leur présence dans de nombreux organes. Les résultats obtenus ont montré que les NTC ne semblent pas passer la barrière pulmonaire et sont éliminés directement au sein du poumon. L'analyse de la modification chimique et physique des NTC présents pendant 15 jours dans des poumons de rats ainsi que



[RÉFÉRENCES

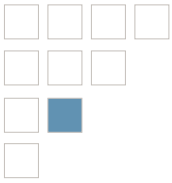
- [1]** Elgrabli D., Abella-Gallart S., Aguerre-Chariol O., Robidel F., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. 2007. *A novel and simple dispersing technique for carbon nanotubes that can be used for in vivo and in vitro studies*. EuroNanoSH. Helsinki, Finland.
- [2]** Elgrabli D., Abella-Gallart S., Aguerre-Chariol O., Robidel F., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. 2007. *Effect of BSA on carbon nanotube dispersion for in vivo and in vitro studies*. *Nanotoxicology* 1(4):266 - 278.
- [3]** Lam C.W., James J.T., McCluskey R., Hunter R.L. 2004. *Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation*. *Toxicol Sci* 77(1):126-134. Epub 2003 Sep 2026.
- [4]** Muller J., Huaux F., Moreau N., Misson P., Heilier J.-F., Delos M., Arras M., Fonseca A., Nagy J.B., Lison D. 2005. *Respiratory toxicity of multi-wall carbon nanotubes*. *Toxicology and Applied Pharmacology* 207(3):221-231.
- [5]** Shvedova A.A., Kisin E.R., Mercer R., Murray A.R., Johnson V.J., Potapovich A.I., Tyurina Y.Y., Gorelik O., Arepalli S., Schwegler-Berry D., et al. 2005. *Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice*. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5):L698-708. Epub 2005 Jun 2010.
- [6]** Li J.G., Li W.-X., Xu J.-Y., Cai X.-Q., Liu R.-L., Li Y.-J., Zhao Q.-F., Li Q.-N. 2007. *Comparative study of pathological lesions induced by multiwalled carbon nanotubes in lungs of mice by intratracheal instillation and inhalation*. *Environmental Toxicology* 22(4):415-421.
- [7]** Mitchell L.A., Gao J., Vander Wal R., Gigliotti A., Burchiel S.W., McDonald J.D. 2007. *Pulmonary and Systemic Immune Response to Inhaled Multiwalled Carbon Nanotubes*. *Toxicol Sci* 28:28.
- [8]** Elgrabli D., Floriani M., Abella-Gallart S., Gamez C., Delalain P., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. 2008. *The metal catalyst of carbon nanotube can be used as a tracer for biokinetics studies*. *Particle and Fiber Toxicology* (submitted).
- [9]** Elgrabli D., Abella-Gallart S., Robidel F., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. 2008. *Induction of apoptosis and absence of inflammation in rat lung after intratracheal instillation of multi walled carbon nanotubes*. *Toxicology* (in press).
- [10]** Elgrabli D., Floriani M., Rogerieux F., Boczkowski J., Lacroix G. 2008. *Multi walled carbon nanotubes can be eliminated by the lung: Proposition of hypothetical clearance mechanism*. International Conference on safe production and use of nanomaterials Minatec. Grenoble 3-7 novembre 2008, France (Communication orale).

l'étude de différents phénomènes biologiques et notamment de la phagocytose et de l'apoptose, a permis de proposer un mécanisme hypothétique conduisant à la clairance pulmonaire des NTC⁽¹⁰⁾. Il semblerait qu'après avoir été instillés ou inhalés, les NTC soient phagocytés par les macrophages alvéolaires puis modifiés chimiquement et clivés. Le macrophage entrerait alors en

apoptose et un second pool de cellules poursuivrait ensuite l'élimination des NTC en phagocytant les résidus des cellules apoptotiques et les NTC partiellement dégradés. La présence de nanotubes dans le poumon a été associée avec l'induction des cytochromes P450 1A1 et 2E1 suggérant un rôle possible de ces enzymes dans la clairance.

□ □ ■ SUMMARY

Carbon nanotubes (CNT) are single or multi-cylindrical graphene structures that possess diameters of a few nanometers, while the length can be up to a few nanometers. These could have unusual toxicological properties, in that they share intermediate morphological characteristics of both fibers and nanoparticles. Due to their interesting mechanical and electrical properties, they are more and more used in various industries and it is thus urgent to assess their potential toxicity. Several studies performed by intratracheal instillation showed that carbon nanotubes (CNT) induced pulmonary fibrosis, granulomas or inflammation. But, recently, two inhalation studies did not observed such pathological phenomena and suggest that granulomas could be due to the instillation of unbreathable agglomerates. In a previous study, we have described a simple method (using albumin as dispersing agent) which produced solutions containing more than 80% of agglomerate of breathable size. We report here results from intratracheal instillation of rats by 0, 1, 10 or 100 µg of multi-walled CNT (MWCNT) dispersed with albumin. After 1, 7, 30, 90, and 180 days, no inflammation, fibrosis and granuloma formation were detected. The respiratory function of animals was also unmodified. Only a dose-dependant apoptosis of alveolar macrophages was noted. These result underline the importance of controlling MWCNT agglomerate size when exposing animals, through appropriate dispersion methods. This study also showed that MWCNT can be eliminated and do not significantly cross the pulmonary barrier but are still present in lungs 6 months after a unique instillation. MWCNT appeared to be cleaved in the lung. Long-time presence of MWCNT in the lung was associated with lung induction of cytochrome P450 1A1 and 2E1 mRNA suggesting a possible role of these enzymes in MWCNT clearance. These results provide the first data of CNT biopersistence and clearance at 6 months after respiratory administration.



Téléphonie mobile et neurotoxicité sur le système nerveux central

> RENÉ DE SEZE

Les champs radiofréquences (RF) font partie de notre environnement quotidien. Depuis quelques années, l'utilisation de téléphones cellulaires émettant des RF à proximité de la tête et donc du cerveau pose le problème de l'éventuelle influence des ondes RF sur le système nerveux central (SNC).

Des travaux de recherche récents montrent des effets de champs électromagnétiques radiofréquences sur des marqueurs biochimiques dans le cerveau du rat, que ce soit concernant l'activité neuronale, la liaison de neurotransmetteurs à leurs récepteurs ou plus particulièrement le marqueur de neurotoxicité GFAP (Glial Fibrillary Acidic Protein) (O'Callaghan and Sriram, 2005 ; Ransom et al, 2003). Concernant ce dernier, son évolution peut être le signe d'une modification temporaire (inflammation) ou persistante (gliose), pouvant entraîner des conséquences physiologiques. Il est donc important d'étudier ce marqueur de neurotoxicité pour comprendre les mécanismes sous-tendant un effet et d'en mesurer l'impact (études expérimentales chez le rat).

Par ailleurs, les résultats d'études animales ne pouvant pas toujours être extrapolés à l'homme, il a paru important de rechercher chez des volontaires exposés si l'on pouvait mettre en évidence une modification de marqueurs de l'inflammation à l'aide d'examen non ou très peu invasifs (étude de biomarqueurs chez l'homme).

ÉTUDES EXPÉRIMENTALES CHEZ LE RAT

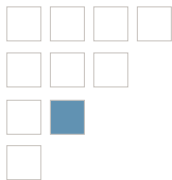
ÉTAT DES CONNAISSANCES

Lors du programme français COMOBIO, différents facteurs ont été étudiés après exposition RF à un signal 900 MHz. Suite à une cartographie complète du cerveau en suivant le métabolisme ((C14)2-déoxyglucose) et l'activité neuronale (c-Fos), Bontempi a mis en évidence une modification des deux paramètres dans différentes zones cérébrales, tant

au niveau superficiel le plus exposé (cortex frontal) que dans des structures profondes (hippocampe, cortex temporal) pour des débits d'absorption spécifique (DAS) de 1,5 et 3 W/kg. Des DAS inférieurs et supérieurs n'ont pas montré d'effet (Bontempi et al., 2002 ; 2004). D'autre part, Mausset et al. (2004) trouvent une modification des propriétés de liaison pour les neurotransmetteurs GABA, glutamate et dopamine au niveau de différentes structures cérébrales (cortex, striatum et hippocampe) et une augmentation de la protéine GFAP après une exposition de 15 min à 6 W/kg au niveau du striatum, du cortex frontal et de l'hippocampe. Ces travaux montrent une forte augmentation de la production de GFAP au niveau du cortex frontal à 2 (+300 %) et 3 jours (+200 %), une augmentation au niveau du cortex du cervelet à 3 jours (+150 %) ($p < 0,001$). Ces résultats indiquent une inflammation temporaire des zones externes du cerveau (cortex) mais pas de modification des structures profondes (hippocampe et globus pallidus du striatum). Concernant d'éventuelles modifications comportementales, malgré les effets significatifs trouvés sur la mémoire de travail chez le rat avec des impulsions de type radar par Lai (1994), les deux répliques de cette étude (Cobb et al., 2004 ; Cassel et al., 2004) ne confirment pas d'effet. De plus, dans le cadre du programme COMOBIO, Bontempi a soumis les animaux à des épreuves comportementales de mémoire de travail et de mémoire de référence après exposition selon les paramètres ayant montré des effets pour les marqueurs d'activité neuronale. Malgré cela, aucun déficit mnésique n'a été observé. Dans le même programme, Dubreuil et al. (2002, 2003) ne trouvent aucun effet sur la mémoire spatiale et l'apprentissage.

OBJECTIFS

Dans le cadre du projet européen RAMP précédemment réalisé dans les laboratoires de l'INERIS, on a reproduit l'étude de Mausset et al. (2004) pour une exposition de 15 min à 6 W/kg et suivi



l'évolution de la protéine GFAP 2, 3, 6 et 10 jours après exposition. Puis, on a étudié l'intensité et l'amplitude de cet effet après exposition semi-chronique (1 à 2 mois) et chronique (6 mois).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Système d'exposition

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 réfléchie. 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.

Les champs électromagnétiques émis sont des rayonnements radiofréquences modulés selon la norme GSM déjà utilisée dans les radiocommunications cellulaires et selon les normes du système UMTS en préparation. Les fréquences porteuses sont 900, 1800 MHz, et 1960 MHz ; la principale fréquence de répétition des impulsions est 217 Hz, avec une durée de 576 μ s.

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.

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 tissu. L'efficacité de l'antenne-boucle a ainsi été caractérisée (Lévêque et al, 2004).

Les différentes intensités ont été initialement 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 ; la valeur dans le cerveau est environ moitié moindre. En conséquence, les valeurs utilisées pour notre étude ont été choisies principalement à 1,5 ; 3 ; 4,5 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.

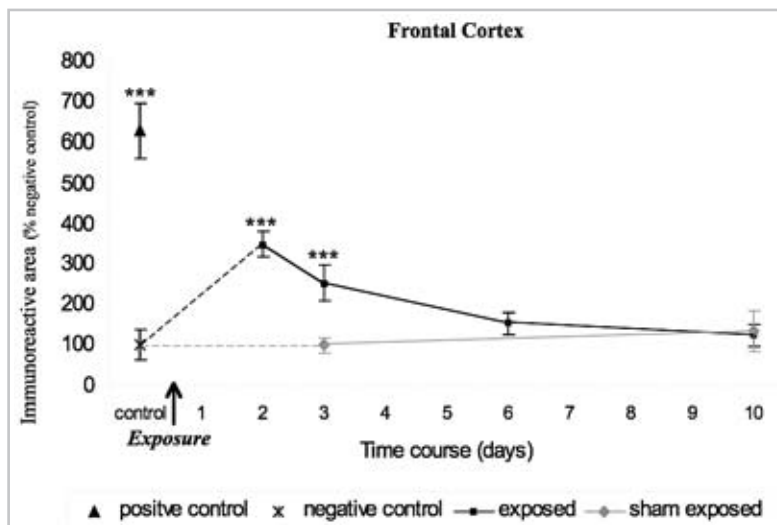
Marqueurs d'effets

Les marqueurs principaux étudiés sont la protéine c-Fos, indicateur d'activation neuronale (Kaczmarek, L., 2002) et la GFAP, protéine de structure des astrocytes, dont l'hypertrophie ou la prolifération témoigne d'un phénomène inflammatoire de type gliose. Ces marqueurs ont été étudiés par immunohistochimie et analyse d'images.

Les procédures et protocoles permettant d'étudier la neurotoxicité sont bien documentés et décrits par les organismes européens et internationaux (EPA/630/R-95/001F 1998 ; OECD 2003 ; 2004/73/EC 2004).

Parmi les indicateurs de toxicité se trouve la Protéine Acide Glieo Fibrillaire (GFAP), une protéine structurale spécifiquement produite par les cellules gliales astrocytaires du SNC. Les cellules astrocytaires jouent divers rôles au sein du cerveau : ce sont des cellules nourricières, contenant dans leur cytoplasme un stock de glycogène ; par ailleurs, elles forment la matrice cérébrale en soutenant les réseaux neuronaux et elles interviendraient dans les échanges synaptiques. Leurs dernières fonctions expliquent plus particulièrement l'intérêt porté à ces cellules dans le cadre d'une étude de toxicité. En effet, ces cellules interviennent dans le système inflammatoire spécifique du cerveau et dans le cas de mort neuronale, elles sont capables de proliférer afin de remplacer les cellules manquantes. Ce phénomène est appelé gliose.

La quantification de la protéine GFAP, du fait de sa sensibilité et de sa rapidité de réaction (Eisenbrandt, Allen et al. 1994; Eng et al., 2000; Norenberg 1994; Ridet, Privat et al. 1997), pourra ainsi donner une idée de la possible atteinte du SNC par neurotoxique. En effet, une augmentation temporaire de la GFAP peut être le signe d'une inflammation (grossissement des cellules astrocytaires) alors qu'une augmentation permanente de la quantité de cette même protéine peut refléter une augmentation du nombre de cellules gliales, signe d'une gliose, pouvant avoir de graves conséquences physiologiques et comportementales selon la zone cérébrale concernée. L'immunohistochimie spécialement dirigée contre la GFAP sur coupe de tissu permet de quantifier la protéine selon une cartographie cérébrale précise.



> Moyenne (\pm SEM) du pourcentage de GFAP marquée dans le cortex frontal cerveau de rat. Groupe contrôle positif (n = 4 ; LPS 2,5 mg/kg, i.v. injection 1ml/kg) ; groupe contrôle négatif (n = 4 ; animaux cage) ; animaux exposés (6W/kg 15min) 2, 3, 6 ou 10 jours après exposition (n = 9 chaque jour) ; animaux témoins (ou « sham-exposés ») 3 et 10 jours après exposition sham (n = 6 chaque jour). Les valeurs des contrôles positifs, des exposés et des animaux sham sont exprimées en pourcentages du contrôle négatif (***) p > 0,001.

Études paramétriques – effets cumulatifs

Les différents paramètres conditionnant un effet : dose, durée, expositions répétées, etc. ont été explorés. Deux doses ont été principalement étudiées, à deux durées différentes : 1,5 W/kg pendant 45 minutes et 6 W/kg pendant 15 minutes. Des expositions ont été répétées cinq jours par semaine pendant un à six mois.

Tests comportementaux

Les travaux antérieurs n'ont pas montré d'effets robustes d'expositions aiguës sur des tâches de mémoire spatiale ou de mémoire de rappel. Ces mêmes tests ont à nouveau été réalisés, cette fois-ci après des expositions chroniques (6 mois) ou semi-chroniques (2 mois) (Olton, D. S., 1987).

RÉSULTATS

Marqueurs d'effets

Les résultats obtenus à l'INERIS indiquent, comme ceux de Mausset et al. (2004), une augmentation de la GFAP en ce qui concerne le cortex, malgré une amplitude différente (+140 %, p<0,001) mais en différent au niveau du striatum (+250 %, p<0,001) ou de l'hippocampe (+130 %, p<0,05) pour lesquels Mausset n'avait pas trouvé d'effet. Des analyses complémentaires sont nécessaires pour expliquer ces différences.

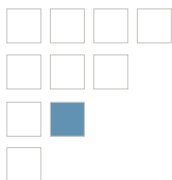
Études paramétriques – effets cumulatifs

Le c-Fos varie de façon cyclique et n'est pas dose-dépendant ; l'activation ainsi mise en évidence renseigne principalement sur la localisation cérébrale d'un effet, ce qui oriente les tests comportementaux qui pourraient éventuellement être altérés en conséquence. La GFAP est dose et durée-

dépendant ; elle indique un effet transitoire après exposition aiguë. Il n'est pas mis en évidence d'effet cumulatif après exposition répétée (l'amplitude de l'effet n'est pas augmentée), mais l'effet est dans ces conditions persistant, alors qu'il disparaît en quelques jours après une exposition aiguë. Un seuil a pu être déterminé pour une exposition aiguë : 6 W/kg, tandis qu'il existe un effet à 1,5 W/kg après une exposition chronique. Enfin, il a été déterminé qu'il existe un facteur d'échelle du débit d'absorption (DAS) entre le rat et l'homme :

DAS homme = 4 x DAS rat

L'augmentation de la GFAP traduit une réaction inflammatoire et constitue de ce fait un signe d'atteinte sanitaire qu'il faut donc mieux cerner (paramètres d'apparition –seuil–, conditions d'extrapolabilité à l'homme) pour chercher à l'éviter. Il faut cependant noter que dans les études conduites à l'INERIS, il n'a pas été observé de conséquence comportementale ni de pathologie consécutive, ce qui limite fortement l'interprétation du risque réel qui en résulte ; en effet, l'OCDE considère que la toxicité n'est avérée que lorsque plusieurs des 5 approches de neurotoxicité sont corrélées, à savoir parmi les effets anatomopathologiques, fonctionnels (c'est le cas de la GFAP, marqueur biochimique du fonctionnement du système nerveux), électrophysiologiques, comportementaux ou développementaux. Ceci revient à dire que des effets sanitaires pourraient être craints chez l'homme, si les mécanismes biologiques impliqués sont transposables, pour une valeur de DAS de 24 W/kg après une exposition aiguë, et pour 6 W/kg après des expositions répétées de façon chronique. En comparaison, le DAS maximal produit par un téléphone mobile est en moyenne de l'ordre de 0,5 W/kg.



■ RÉFÉRENCES

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

Brillaud E., Piotrowski A., de Seze R., 2007. *Effect of an acute 900 MHz GSM exposure on glia in the rat brain: A time-dependent study*. Toxicology, vol. 238, n° 1, pp. 23-33.

Ammari M., 2008b. *GFAP expression in the rat brain after a sub-chronic exposure to a 900 MHz GSM signal*. Toxicology.

Ammari M. *Head-Only sub-chronic exposure to GSM-900 MHz electromagnetic fields does not alter spatial memory in rats* (soumis, 2008c).

Brillaud E., Romanini P., Piotrowski A. and de Seze R. *Effect of a single 900 MHz GSM exposure on the rat brain activity, glia and behaviour*. European Journal of Neurosciences (soumis).

Ammari M. *Effect of a chronic GSM 900 MHz exposure on behaviour in the rat* (soumis, 2008d).

De Seze R. *Mobile phone and stress biomarkers in human volunteers*. Abstract book of the 29th Annual meeting of the bioelectromagnetics society, 10-15 June 2007, Kanazawa, Japan, pp. 107-108.

Tests comportementaux

Les effets d'expositions à un mois sur la mémoire ont montré un effet mineur qui ne s'est pas confirmé lors des études ultérieures de plus longue durée (2 et 6 mois). Les tests utilisés n'ont donc pas permis de mettre en évidence de perturbation comportementale chez le rat associée aux modifications biochimiques obtenues (Ammari et al., 2008c).

La première partie de l'étude a consisté à regarder la durée de l'effet observé sur la GFAP avec une exposition à 900 MHz. L'expression de cette protéine a été mesurée à J2, J3, J6 et J10 après une exposition aiguë unique. Les effets observés à 3 jours avec le rayonnement GSM 900 MHz disparaissent ou ne sont plus significatifs à 10 jours.

Dans une deuxième partie de l'étude, il a été recherché si un signal à une fréquence ou de type différent pouvait avoir des effets différents d'une exposition à 900 MHz. Il n'a pas été trouvé d'effet particulièrement différent d'une exposition à 1800 MHz ou UMTS, que ce soit à J3 ou à J10.

La troisième partie cherchait à mettre en évidence un effet cumulatif. Pour cela, une exposition a été pratiquée cinq jours par semaine pendant deux mois à 900 MHz, à des DAS de 1,5 W/kg et 6 W/kg. Cette partie visait aussi à déterminer le seuil d'un effet après exposition répétée. Après une exposition répétée à 900 MHz, à 1,5 W/kg, il n'y a pas d'effet comme après une exposition aiguë, et à 6 W/kg, l'effet est plus faible qu'après une exposition aiguë. On peut en déduire qu'il y a un seuil de DAS pour un effet après exposition chronique de 1,5 W/kg, et qu'il n'y a pas d'effet cumulatif à 6 W/kg.

Il a enfin été estimé si les effets observés pouvaient constituer un risque pour la santé des utilisateurs de téléphones mobiles. Compte tenu d'un facteur 4 entre le DAS calculé chez le rat et le DAS calculé chez l'homme (cf. rapport ACI 2008), il apparaît que les niveaux de DAS auxquels les utilisateurs sont exposés au niveau du cerveau sont inférieurs à ceux qui produisent une augmentation de la GFAP. Ces études sont rassurantes vis-à-vis des utilisateurs de téléphones portables quant aux dangers encourus au cours d'une communication. Une perspective de ce travail est d'étudier les effets comportementaux après exposition chronique pour voir si les faibles effets biologiques observés présentent une traduction au niveau fonctionnel. Une autre est de vérifier si une exposition chronique ne produit pas un effet persistant à 10 jours et peut-être au-delà.

CONCLUSIONS

Des dispositifs expérimentaux ont été mis en place pour l'investigation des effets des expositions aux radiofréquences à des niveaux faibles – quoique supérieurs de près d'un ordre de grandeur aux valeurs limites d'exposition recommandées. En cohérence avec d'autres résultats expérimentaux, il n'a pas été observé d'effet sur le comportement. Les effets observables se situent au niveau d'un biomarqueur des cellules gliales, la GFAP, dont la présence trace une inflammation cérébrale. On peut suspecter que cette inflammation soit un précurseur d'effets plus sérieux comme une gliose, bien que la chaîne causale en soit mal établie. C'est dans ce sens, de l'étude des mécanismes biologiques mis en œuvre par ce marqueur, que des travaux expérimentaux futurs sont à envisager.

ÉTUDE DE BIOMARQUEURS CHEZ L'HOMME

De nombreuses études épidémiologiques s'intéressent aux effets des RF 900 MHz sur l'homme, notamment en termes d'impact sur les cancers, mais les résultats obtenus restent fortement controversés (revue Repacholi, 2001).

Certains utilisateurs de téléphones portables se sont plaints de troubles, dont des maux de tête, une sensation de malaise général, des nausées ou encore des troubles du sommeil. Il semblerait que ces troubles surviennent avec l'augmentation de la durée d'utilisation des téléphones portables (Oftedal et coll., 2000). Cependant, dans la plupart des cas, l'apparition de ces symptômes serait plutôt d'origine psychosomatique (revue Repacholi, 2001).

Bien que le système endocrinien soit une cible potentielle des RF (Navakatikian, 1994 ; Lu et coll., 1981 ; Lu et coll., 1985), l'exposition chronique aux téléphones portables ne semble pas provoquer de variation significative des taux de différentes hormones, comme la mélatonine, l'hormone de croissance, la prolactine, ou les hormones sexuelles (de Seze et al., 1998 ; Djeridane et al., 2008). L'activité électrique globale du cerveau a également été mesurée chez des sujets exposés aux téléphones portables. De manière générale, l'exposition provoque des modifications du spectre de l'EEG (revue Hossman et Hermann, 2003), que ce soit pendant des tâches de mémorisation (Krause et al., 2000), au cours de discrimination d'un stimulus auditif (Eulitz et al., 1998) ou lors de certaines phases du sommeil (Huber et al., 2000 ; Borbély et al., 1999). En outre, la durée des phases de sommeil « Rapid Eye Movement » (REM) diminue lors d'une exposition nocturne (pendant 8 h) aux

téléphones cellulaires (Mann et Röschke, 1996). Les conséquences d'une exposition aux téléphones cellulaires sur les phénomènes de mémorisation et d'apprentissage sont particulièrement intéressantes. Il semble qu'une telle exposition (entre 30 min et 1 h) améliore les performances cognitives de sujets soumis à des tests de mémorisation. Cette amélioration se traduit par une augmentation de la vitesse de réaction (Preece et coll., 1999 ; Koivisto, 2000) et/ou une diminution du temps nécessaire pour réaliser des calculs arithmétiques (Koivisto, 2000).

L'exposition aux téléphones cellulaires semble provoquer des modifications de l'activité cérébrale (activité électrique du cerveau, apprentissage). Les mécanismes précis qui sous-tendent les réponses physiologiques des êtres vivants ne peuvent pas être recherchés chez l'homme. Il est donc nécessaire de trouver un bon compromis entre des études réalisées sur des modèles d'exposition *in vitro* et les études épidémiologiques. L'exposition d'animaux *in vivo* constitue un modèle nécessaire pour élucider ces mécanismes.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une étude a dosé différents biomarqueurs (BM) de stress inflammatoire dans le sang, la salive et l'air expiré chez des volontaires exposés pendant une demi-heure à un téléphone mobile. Cette étude a eu lieu en double aveugle, selon un plan d'étude

randomisé en cross-over. Les effets mesurés ont été comparés comme contrôle à un banc UV ou une exposition infra-rouge (demi-dose érythémale minimale).

RÉSULTATS

Après une exposition réelle aux champs électromagnétiques de type téléphonie mobile, l'amplitude de variation des taux d'aldéhyde et d'isoprène alvéolaires augmentent significativement par rapport à une exposition simulée. Il convient d'évoquer l'existence d'une corrélation positive entre ces deux BM. Ainsi, les tests statistiques réalisés pour les BM dosés dans l'air expiré ne sont pas indépendants. Par ailleurs, l'exposition aux champs électromagnétiques semble ne pas induire une modulation significative de l'amplitude de variation du taux des autres BM. Toutefois, nous n'avons pas la puissance nécessaire afin de conforter cette conclusion.

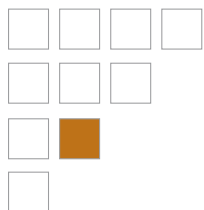
Il convient de préciser, en outre, les limites de cette analyse statistique liées : au nombre limité des sujets inclus dans l'étude, à la variabilité intra- et interindividuelle importante des taux pour la plupart des BM, et à la présence de sujets ayant des valeurs « extrêmes ». Une analyse statistique exploratoire est nécessaire pour traiter correctement les données recueillies dans cette étude. Il est aussi souhaitable, compte tenu de la dispersion observée, de réaliser des études avec un plus grand nombre de volontaires.

□ □ ■ SUMMARY

The aim of this project is to better evaluate whether radiofrequency electromagnetic fields emitted by mobile phones constitute or not a health risk for users. Two topics have been developed those last years : experimental work on rats to look for biomarkers of activation, inflammation and behaviour ; look at some biomarkers in humans after using a mobile phone.

A head only exposure set-up was used to reproduce the users exposure. Dosimetry has been performed on 250g rat model to determine the influence of different parameters (skin, skull,..). Previously, Brillaud et al. [2007] showed the existence of glial reactivity 2 days after a 15 min GSM 900 MHz acute exposure at a brain averaged SAR = 6 W/kg, but no longer after 10 days. In this work we measured GFAP expression in rats, to evaluate glial evolution up to 10 days after exposure to GSM signal for 45 min at SAR = 1,5 W/Kg and for 15 min/day at SAR = 6 W/Kg in the rat brain areas: prefrontal cortex (Pfcx), cerebellum cortex (CCx), dentate gyrus of hippocampus (DG), lateral globus pallidus of striatum (LGP), and caudate putamen (Cpu). In comparison to sham rats, rats exposed to sub-chronic GSM signal at 1,5 W/kg and 6W/Kg show a GFAP increase in different brain areas after 3 and 10 days. Given morphological differences, brain-averaged SAR in rat is equivalent to 4 times the same SAR in human brain, which prevents from extrapolating the obtained results to human. The c-Fos protein appears useful to identify reactive brain areas and orient towards adequate behavioural tests. However, its variation is limited and does not show a linear dose-response, and hence cannot be used to detect cumulative effects.

Animals were tested for a learning task just after exposure. No effect on learning or spatial memory has been seen, either for acute exposures, neither for chronic or semi-chronic exposures. Studies in volunteers showed an increase in aldehyd and alveolar isoprene, but large inter- and intra-individual variability don't guarantee the robustness of this result. More expert analysis needs to be achieved to look if a study with more volunteers would be worth to perform.



RISQUES TECHNOLOGIQUES ET POLLUTIONS

- Progresser dans la compréhension des processus de transfert des contaminants dans tous les milieux (air, eau, sol), développer des modèles robustes pour : évaluer les risques d'exposition ; alerter, évaluer et maîtriser les risques de l'échelle locale à l'échelle transfrontalière.
- Développer la mesure dans des milieux complexes (air, eau, sol), en particulier de polluants dits émergents (dont les nanoparticules), avec une exigence renforcée de qualité et de reproductibilité.
- Améliorer la quantification des effets des matières et phénomènes dangereux en évaluant les incertitudes et en perfectionnant les outils de modélisation : méthodes semi-empiriques de type QSAR et QSPR, déterministes, probabilistes.
- Mieux appréhender les systèmes industriels complexes, du point de vue des processus physiques mais aussi en prenant en compte les aspects humains et organisationnels, l'environnement des installations et les enjeux territoriaux, pour gérer les risques et faciliter la décision publique.
- Contribuer à la mise au point de procédés industriels (débouchant, par exemple, sur les biocarburants) et au développement de nouvelles technologies (hydrogène, nanomatériaux) plus sûres, en anticipant la maîtrise des risques dès la conception de ces procédés.
- Intégrer les approches et les résultats de la recherche en sciences humaines et sociales afin d'éclairer les décisions pour mieux maîtriser les risques et pollutions.

La recherche et l'innovation au cœur des défis de l'hydrogène, vecteur d'énergie

Le recours à l'hydrogène s'est imposé comme l'une des voies les plus prometteuses pour accélérer le passage à un système énergétique durable. Toutefois, en dépit du potentiel que présente l'hydrogène pour fournir une énergie propre et renouvelable, le développement à grande échelle de cette filière rencontre encore des obstacles, à la fois d'ordres technologiques, économiques et sociétaux. Convaincu que la maîtrise des risques à la source ne peut que favoriser l'émergence des nouvelles technologies liées à l'hydrogène et leur acceptation par le public, l'INERIS a engagé, dès 2002, des programmes de recherche visant à étudier les risques induits par son utilisation sous l'angle des phénomènes dangereux, des outils de modélisation, des méthodologies d'analyse des risques ou encore des principes de sécurité qui doivent être appliqués. Qu'il s'agisse des applications mobiles ou stationnaires, ses travaux ont contribué à mieux cerner les risques des procédés de fabrication et d'utilisation de l'hydrogène, et à apporter des réponses concrètes aux concepteurs afin de développer des systèmes intrinsèquement plus sûrs. Pluridisciplinaires, les recherches menées par l'Institut rendent également compte d'une grande diversité de partenariats. Onze programmes de recherche sont actuellement en cours, associant l'ensemble des acteurs de la filière autour des thématiques liées au transport et au stockage de l'hydrogène, à l'alimentation des véhicules (stations-services), aux développements autour de la pile à combustible et à la dimension sociale de la technologie hydrogène.

→ TÉMOIGNAGE

**Pascal Del Gallo, Chef de Groupe
Génération Chimique des Gaz
Centre de Recherche Claude-Delorme
Air Liquide**

« Les connaissances et les méthodes développées par l'INERIS, ainsi que son expertise reconnue dans la maîtrise des risques, contribuent à l'instauration d'une culture de sécurité et aux progrès des pratiques au sein des installations industrielles. Elles participent aussi à une meilleure prise en compte des risques dans l'innovation technologique. Ainsi, dans le cadre du développement d'un procédé industriel innovant visant à produire une énergie plus propre basée sur les technologies de l'hydrogène, nous avons fait appel à l'INERIS afin d'évaluer les risques d'un réacteur catalytique à membrane (CMR) utilisé pour la production d'hydrogène à partir de méthane. L'évaluation des risques du procédé pilote a permis d'identifier l'ensemble des situations dangereuses et de définir les conditions nécessaires pour renforcer les dispositifs de sécurité. Les causes et les conséquences de formation d'une atmosphère explosible (ATEX) dans le réacteur ont été tout particulièrement étudiées. Afin de limiter le volume des zones où une ATEX pourrait se former et de réduire les risques d'effets dominos en cas d'accident, il a été recommandé notamment de séparer les éléments d'installation ayant des potentiels de danger propres (panneau gaz, réacteur, ligne de gaz de synthèse). Le risque de fuite enflammée et donc d'incendie a également été souligné, compte tenu des températures de fonctionnement qui dépassent parfois les températures d'auto-inflammation des gaz présents. Les connaissances approfondies de l'INERIS qui portent sur l'ensemble de la chaîne phénoménologique pouvant conduire à une situation critique (fuites, formation d'atmosphère explosible, risques électrostatiques, combustion et effets associés...) ont ainsi permis de prendre en compte les contraintes de sécurité très en amont. Cette démarche est désormais incorporée dans l'approche sécurité des projets de R&D que nous menons, traitant de la production d'hydrogène par catalyse hétérogène. Cela concerne notamment le projet BioH2Gen auquel collabore l'INERIS, et à terme, en 2009, le projet LOKI R. Dans les deux cas, la démarche mise en œuvre est similaire, à savoir revue critique de l'étude HAZOP*, réalisée initialement par mes équipes, incorporation de l'approche ATEX et réalisation d'études spécifiques portant, par exemple, sur l'aspect bioéthanol dans le cadre de BioH2Gen. »

(*) HAZard OPerability study.



Research and innovation : key factors for overcoming challenges associated with hydrogen as an energy vector

The use of hydrogen has emerged as one of the most promising ways to accelerate the transition to a sustainable energy system. However, despite hydrogen's potential to provide clean and renewable energy, the large-scale development of this channel is encountering more obstacles, both technological and economic as well as societal. Convinced that controlling risks at the source can only promote the emergence of new hydrogen-related technologies and their acceptance by the public, INERIS has undertaken research programs since 2002 aiming to study the risks brought on by hydrogen use from the perspective of dangerous phenomena, modeling tools, risk analysis methodologies and safety principles which must be applied. Whether involving mobile or stationary applications, its work has contributed to better defining the risks of hydrogen production and usage methods, and providing concrete responses to designers in order to develop systems which are intrinsically safer. The multi-disciplinary research conducted by the Institut also shows a great diversity of partnerships. Eleven research programs are currently in progress which unite all of the players from this channel around themes related to hydrogen transport and storage, vehicle supply (service stations), developments surrounding fuel cells and the social dimension of hydrogen technology.

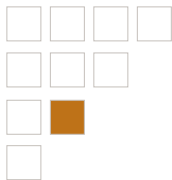
→ TESTIMONY

Pascal Del Gallo,
Head of the Chemical Gas Generation Group
Claude-Delorme Research Center
Air Liquide

"The knowledge and methods developed by INERIS as well as its recognized expertise in risk control contribute to the establishment of a culture of safety and progress for practices within industrial installations. They also play a part in better taking into account of risks in technological innovation. Thus, in the framework of developing an innovative industrial method aiming to produce cleaner energy based on hydrogen technologies, we have called on INERIS to evaluate the risks of a catalytic membrane reactor (CMR) used to produce hydrogen from methane. The assessment of risks from the pilot process made it possible to identify all dangerous situations and define the conditions necessary to strengthen security devices. In particular, the causes and consequences of forming an explosive atmosphere (ATEX) in the reactor were studied. In order to limit the volume of the zones where an ATEX could form and reduce the risks of domino effects in case of accident, it was recommended in particular to separate the installation elements having unique danger potential (gas panel, reactor, synthesis gas line). The risk of burning leak and therefore of fire was also emphasized, given operating temperatures which sometimes exceed the self-combustion temperatures of the gases present. The in-depth knowledge of INERIS pertaining to the entire phenomenological chain which may lead to a critical situation (leaks, formation of explosive atmosphere, electrostatic risks, combustion and related effects...) has thereby made it possible to take security constraints into account very far upstream. This approach is henceforth incorporated into the security approach for the R&D projects we are conducting, dealing with hydrogen production through heterogeneous catalysis. This concerns in particular the BioH2Gen project with which INERIS is collaborating, and in time, in 2009, the LOKI R. project. In both cases, the procedure implemented is similar, i.e. critical review of the HAZOP () study, initially done by my teams, incorporation of the ATEX approach and performance of specific studies pertaining, for example, to the bio-ethanol aspect in the framework of BioH2Gen."*

(*) HAZard OPerability study.





TRANSFERT ET CARACTÉRISATION DES CONTAMINANTS

Caractérisation chimique de la fraction polaire des particules dans l'air ambiant

> ALEXANDRE ALBINET, ÉVA LEOZ-GARZIANDIA

[RÉFÉRENCES

Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., Jaffrezo J.-L., 2008. *Nitrated and oxygenated derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of two French alpine valleys. Part 1: Concentrations, sources and gas/particle partitioning*. Atmospheric Environment 42, 43-54.

Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., Jaffrezo J.-L., 2008. *Nitrated and oxygenated derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of two French alpine valleys. Part 2: Particle size distribution*. Atmospheric Environment 42, 55-64.

Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., 2007. *Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitrated PAHs and oxygenated PAHs in ambient air of the Marseilles area (South of France): concentrations and sources*. Science of the Total Environment 384, 280-292.

Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., 2007. *Sampling precautions for the measurement of nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air*. Atmospheric Environment 41, 4988-4994.

Albinet A., Leoz-Garziandia E., Budzinski H., Villenave E., 2006. *Simultaneous analysis of oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons on standard reference material 1649a (urban dust) and on natural ambient air samples by gas chromatography-mass spectrometry with negative ion chemical ionisation*. Journal of Chromatography A 1121, 106-113.

Goriaux M., Jourdain B., Wortham H., Temine B., Besombes J.-L., Marchand N., Albinet A., Leoz-Garziandia E., 2006. *Field comparison of PAH measurements using a low flow denuder device and conventional sampling systems*. Environmental Science & Technology 40 (20), 6398-6404.

Les particules atmosphériques contiennent de nombreux composés organiques toxiques adsorbés à leur surface. Parmi eux, les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) émis lors des combustions incomplètes ou de la pyrolyse de la matière organique et des combustibles fossiles, ont des propriétés cancérigènes et/ou mutagènes avérées. Cependant, les produits d'oxydation de ceux-ci, les HAP nitrés (NHAP) et oxygénés (OHAP), semblent plus toxiques que leurs HAP parents, car certains d'entre eux ont été identifiés comme ayant un caractère mutagène direct. Les NHAP et les OHAP sont formés soit, durant le processus de combustion, soit par réaction dans l'atmosphère en phase gazeuse et hétérogène entre les HAP, l'ozone, et les oxydes d'azote initiés par le radical OH ou NO₃ [1, 2, 3, 4, 5].

Malgré leur caractère hautement toxique, les dérivés polaires des HAP dans l'atmosphère font l'objet de très peu de publications. Le nombre d'études concernant leur formation, leur sources ainsi que leur caractérisation dans l'air ambiant est limité.

Ainsi, l'objectif général de ce travail réalisé à l'INERIS était de caractériser chimiquement les NHAP et OHAP dans différents milieux de l'air ambiant : trafic, urbain, péri-urbain, rural et altitude. La répartition entre les phases gazeuse et particulaire de ces composés, leur répartition en fonction de la taille des particules mais aussi leur origine (primaire ou secondaire) ont été étudiées. Ce travail a été réalisé en collaboration avec le Laboratoire de Physico et Toxicochimie des systèmes naturels (LPTC) et le Laboratoire de Physico-Chimie Moléculaire (LPCM) de l'Université de Bordeaux 1, notamment en ce qui concerne la réactivité des HAP.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

CAMPAGNES DE PRÉLÈVEMENT

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, trois campagnes de prélèvements ont été réalisées sur des sites aux caractéristiques variées : urbain, péri-urbain, rural et altitude. Les deux premières

campagnes de terrain ont été réalisées au sein du programme de recherche POLLUTION des Vallées Alpines (POVA) dans les vallées de Chamonix et de la Maurienne au cours de l'hiver 2002-2003 et de l'été 2003. La dernière campagne a été réalisée dans la région de Marseille au cours de l'été 2004. Pour la réalisation des campagnes de prélèvement dans les différents milieux, les appareils suivants ont été utilisés :

- des préleveurs automatiques à haut débit équipés d'une tête de prélèvement PM₁₀ (Digitel DA-80, débit : 30 m³.h⁻¹) qui permettent de collecter la phase particulaire (filtre en fibres de quartz) et la phase gazeuse (mousse en polyuréthane) des HAP et de leurs dérivés. Avec ce type d'appareil, le pas de prélèvement de 12 h permet deux prélèvements par jour : 8 h/20 h et 20 h/8 h,
- des impacteurs en cascade (Graseby Andersen, débit : 35 m³.h⁻¹) qui permettent de séparer les particules (filtres en fibres de quartz) en fonction de leur taille (6 étages, de 50 µm à 0,39 µm, puis un filtre total : 0,01-0,39 µm). Le pas de prélèvement de 24 h a permis le prélèvement en quasi simultané avec celui des DA-80 à 8 h.

ANALYSES

Pour la réalisation des analyses issues des campagnes de prélèvement et compte tenu du nombre limité d'études existant sur les produits d'oxydation des HAP dans l'air ambiant, la première étape de ce travail a consisté à mettre au point d'une méthode d'analyse simultanée des NHAP et OHAP sur des matrices complexes, facile à mettre en œuvre et utilisable en routine.

Les échantillons collectés sur les filtres et sur les mousses en polyuréthane, ont été extraits au dichlorométhane par extraction liquide sous pression. Les extraits ont ensuite été divisés en deux fractions : l'une pour l'analyse des HAP par HPLC/Fluorescence-UV et l'autre pour l'analyse des OHAP et NHAP. Les deux fractions ont ensuite été réduites sous flux d'azote et reprises dans un volume connu d'acétonitrile pour la fraction destinée à l'analyse des HAP, et de dichlorométhane pour celle dédiée à l'analyse des OHAP et NHAP.

Enfin, l'analyse des dérivés polaires des HAP a été réalisée par chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse en mode ionisation chimique négative (GC/NICI-MS) après une étape de purification par extraction sur phase solide (alumine puis silice). Au final, 17 NHAP et 9 OHAP ont été quantifiés simultanément par ce protocole analytique.

Cette méthode a été validée par l'analyse d'un matériau de référence (SRM 1649 : poussières urbaines), les résultats obtenus sont tout à fait comparables à ceux des autres études.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

D'une manière générale, les niveaux de concentration des OHAP déterminés lors des différentes campagnes de terrain sont similaires à ceux des HAP (de 0,1 à 10 ng.m⁻³ en moyenne) tandis que les niveaux de concentration des NHAP sont de 1 à 2 ordres de grandeur inférieurs (de 1 à 100 pg.m⁻³ en moyenne). Ils sont représentatifs des caractéristiques des sites de prélèvement, les concentrations étant d'autant plus importantes que les sites sont plus proches des sources d'émission.

Les concentrations des HAP, NHAP et OHAP, déterminées en période hivernale, sont environ 10 fois plus importantes que celles déterminées en été. Ceci peut s'expliquer par la présence d'une source d'émission additionnelle de ces composés (chauffage), d'une photolyse moins importante et de conditions météorologiques favorables à une accumulation des polluants en hiver (inversions thermiques).

Les résultats obtenus ont également montré que le risque cancérigène (estimé à partir des facteurs d'équivalence toxique, FET^[6,7]) attribué aux NHAP

peut atteindre 20 % du risque total alors que seuls 5 composés étaient pris en compte dans le calcul et que les niveaux de concentration des NHAP sont de 1 à 2 ordres de grandeur inférieurs à ceux des HAP. Les OHAP n'ont pas été pris en compte dans ce calcul car aucune donnée de FET n'existe pour cette classe de composés.

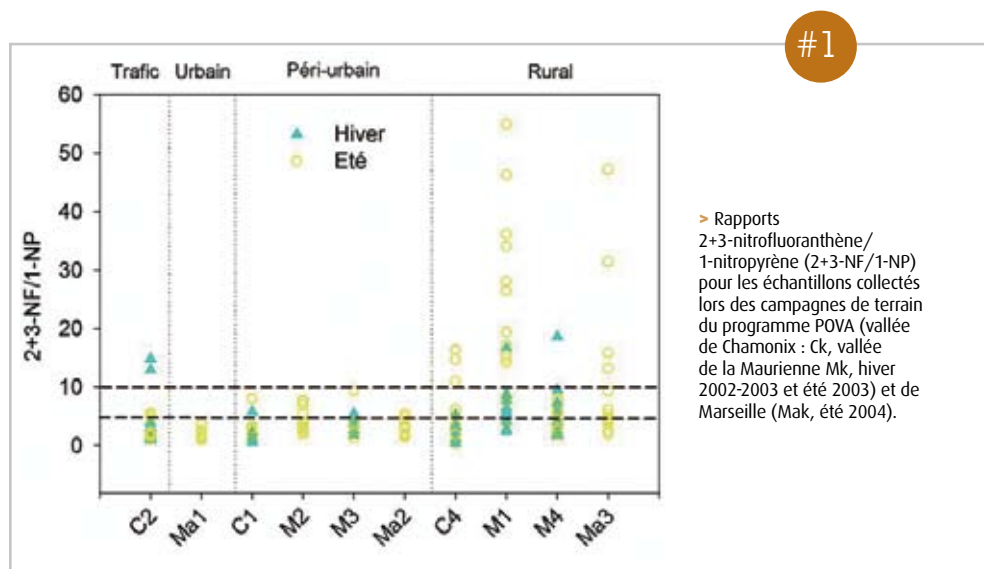
L'importance relative des sources primaires et de la formation en phase gazeuse des NHAP a été évaluée par l'étude de rapports spécifiques de NHAP. Ainsi, le rapport de concentration entre le 2-nitrofluoranthène et le 1-nitropyrène (2-NF/1NP) est généralement utilisé pour évaluer la contribution de ces deux sources^[8,9,10]. Le 2-NF est uniquement produit par réaction en phase gazeuse entre le fluoranthène et NO₂ initiée par OH le jour et par NO₃ la nuit, tandis que le 1-NP est exclusivement issu des émissions directes.

Comme nous l'observons sur la figure 1, sur les sites proches des sources de pollution, les faibles rapports observés indiquent que les NHAP ont une origine primaire forte alors que la formation des NHAP par réaction en phase gazeuse est évidente en été sur les sites ruraux éloignés des sources directes de pollution. Néanmoins, dans des conditions singulières (précipitations neigeuses, accumulation de polluants), la formation secondaire des NHAP dans l'atmosphère peut avoir lieu en hiver et même sur des sites très proches des sources de pollution. Enfin, les résultats obtenus lors des trois campagnes de terrain montrent que les réactions en phase gazeuse de jour initiées par OH sont la voie de formation prépondérante des NHAP.

Une étude approfondie des sources des NHAP et OHAP a été effectuée sur les prélèvements réalisés dans la région de Marseille, à l'été 2004.

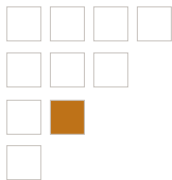
[RÉFÉRENCES

- [1] Atkinson R., Aschmann S. M., Arey J. and Carter P. L., 1989a. *Formation of ringretaining products from the OH radical-initiated reactions of benzene and toluene*. International Journal of Chemical Kinetics 21, 801-827.
- [2] Atkinson R., Aschmann S. M., Arey J., Zielinska B. and Schuetzle D., 1989b. *Gasphase atmospheric chemistry of 1- and 2-nitronaphthalene and 1,4-naphthoquinone*. Atmospheric Environment 23, 2679-2690.
- [3] Atkinson R., Arey J., Zielinska B. and Aschmann S. M., 1990. *Kinetics and nitroproducts of gas-phase OH and NO₃ radical-initiated reactions of naphthalene, fluoranthene and pyrene*. International Journal of Chemical Kinetics 22, 999-1014.
- [4] Allen J. O., Dookeran N. M., Taghizadeh K., Lafleur A. L., Smith K. A. and Sarofim A. F., 1997. *Measurement of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons associated with a size-segregated urban aerosol*. Environmental Science & Technology 31, 2064-2070.
- [5] Allen J. O. 1997. *Atmospheric partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and oxygenated PAH*. Thèse. Massachusetts Institute of Technology (MIT).



1

> Rapports 2+3-nitrofluoranthène/1-nitropyrène (2+3-NF/1-NP) pour les échantillons collectés lors des campagnes de terrain du programme POVA (vallée de Chamonix : Ck, vallée de la Maurienne Mk, hiver 2002-2003 et été 2003) et de Marseille (Mak, été 2004).



[RÉFÉRENCES

[6] Doornaert B. and Pichard A., 2003. *Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs). Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets cancérigènes : approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique-FET) et approche par mélanges. Évaluation de la relation dose-réponse pour des effets non cancérigènes : Valeurs Toxicologiques de Référence (VTR)*. Rapport INERIS.

[7] OEHHA, 2002 and 2005. *Air toxics hot spots program risk assessment guidelines. Part II: technical support document for describing available cancer potency factors*. Office of Environmental Health Hazard Assessment: available at : http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/pdf/TSDNov2002.pdf (p109) and http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/pdf/May2005Hotspots.pdf (p8 and A-1).

[8] Bamford H. A. and Baker J. E., 2003. *Nitro-polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations and sources in urban and suburban atmospheres of the Mid-Atlantic region*. Atmospheric Environment 37, 2077-2091

[9] Feilberg A. and Nielsen T., 2001. *Photodegradation of nitro-PAHs in viscous organic media used as models of organic aerosols*. Environmental Science and Technology 35, 108-13.

[10] Marino F., Cecinato A. and Siskos P. A., 2000. *Nitro-PAH in ambient particulate matter in the atmosphere of Athens*. Chemosphere 40, 533-537.

[11] Perraudin E. 2004. *Réactivité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) adsorbés sur des particules modèles d'intérêt atmosphérique : mesures cinétiques, développements analytiques et analyse des produits d'oxydation*. Thèse. Université de Bordeaux 1.

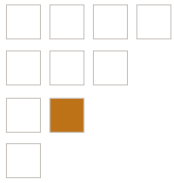
[12] Directive 2004/107/CE du parlement européen et du conseil du 15 décembre 2004 concernant l'arsenic, le cadmium, le mercure, le nickel et les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant.

Les résultats obtenus montrent que les émissions des véhicules à essence sont une source non négligeable de NHAP et de OHAP dans l'atmosphère. En revanche, les composés tels que le 1-nitropyrene, 2-nitrofluorène, 6-nitrochrysène et benz[a]anthracène-7,12-dione semblent essentiellement émis par les véhicules diesel. Enfin, la 9,10-anthraquinone présente une double origine : primaire diesel et formée par photochimie. Ce résultat est concordant avec les résultats obtenus par l'équipe de Bordeaux 1, montrant que les produits majeurs d'oxydation de l'anthracène par l'ozone sont l'anthrone et la 9,10-anthraquinone^[11]. Toutefois, les résultats obtenus ne permettent pas de distinguer si la réaction de formation de la 9,10-anthraquinone a lieu dans l'atmosphère ou au cours du prélèvement sur les supports de collecte. L'étude des HAP, NHAP et OHAP en phases gazeuse et particulaire a montré que la partition entre les deux phases est extrêmement dépendante de la masse moléculaire du composé considéré (MW) et des conditions ambiantes (température). De plus, il apparaît que l'étude de cette partition gaz/particule pourrait apporter des informations quant à leur origine primaire ou secondaire. L'étude de la distribution en taille des HAP, NHAP et OHAP a montré que, quelle que soit la saison considérée (hiver et été), ces composés sont

essentiellement (>80 %) associés à la fraction fine de l'aérosol (Dp<1,3 µm). Cette fraction peut représenter jusqu'à 99 % dans le cas des NHAP en hiver. La toxicité des OHAP et NHAP, plus grande que celle des HAP parents, associée au fait que la fraction la plus fine de l'aérosol pénètre le plus profondément dans l'organisme laisse attendre un impact important de ces molécules. Le travail présenté ici ouvre la porte à de nombreuses investigations supplémentaires. Dans un premier temps, il conviendra de poursuivre les études sur la formation secondaire des NHAP et OHAP afin de distinguer si les réactions de formation ont lieu dans l'atmosphère ou au cours du prélèvement sur les supports de collecte (cas de la 9,10-anthraquinone). En effet, si les réactions se produisent dans l'atmosphère, cela pose un problème sanitaire certain étant donné la toxicité de ces dérivés des HAP. Dans ce cas, l'attribution des FET aux OHAP devient indispensable. En revanche, si la formation de composés secondaires se produit au cours du prélèvement, cela pose un problème technique auquel il faudra forcément remédier car le benzo[a]pyrène, composé choisi pour représenter la cancérogenèse du mélange de HAP par la commission européenne^[12], est fortement réactif et donc probablement sujet à ces réactions.

■ ■ ■ SUMMARY

Several studies on the toxicity of particles in ambient air show that the polar phase, which contains the oxygenated and nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons (OPAHs and NPAHs), is more toxic than the aromatic fraction containing the PAH. In that context, the objective of our study was to chemically characterise the NPAHs and OPAHs in ambient air at various sites (traffic, urban, suburban, rural and altitude). Samplings were performed within the framework of the French research program POLLution des Vallées Alpines (POVA) during the winter 2002-2003 and the summer 2003 and in the area of Marseilles in summer 2004. Both, ambient air particulate and gas phases were sampled and particle size distribution was also studied. The results obtained contribute to increase the data base on these compounds. First, we developed an analytical method for the simultaneous quantitative determination of NPAHs and OPAHs in complex environmental matrices, using GC/NICI-MS. Results from the field campaigns show that OPAH concentration levels were of the same order of magnitude as PAHs while NPAH concentrations were one to two orders of magnitude lower. The corresponding carcinogenic risk for NPAH was estimated using toxic equivalent factors (TEF). NPAHs could contribute to 20% of the total risk. No TEF were found for OPAH, which leaves entire the question of the risk they pose. Study of source specific ratios clearly showed that these compounds have a primary origin at the sites close to the sources of pollution whereas the production of secondary NPAHs by gas phase reactions was prevalent at the rural sites far from the direct sources of pollution and initiated by OH (daytime reactions). The study of NPAH and OPAH sources suggested that gasoline engines were an important source of such compounds. The OPAH 9,10-anthraquinone presents a double origin: primary diesel emission and photochemical processes. The fraction of PAHs, OPAHs and NPAHs associated with the particle phase was strongly depending on their vapour pressure and the ambient temperature. Sources of these compounds take a part in their gas/particle partitioning which can bring information on their primary or secondary origin. Finally, during both winter and summer, PAHs, OPAHs and NPAHs were mainly associated with fine particles (Dp<1.3 µm). The differences of chemical properties of the classes of compounds (polarity...) could account for their particle size distribution.



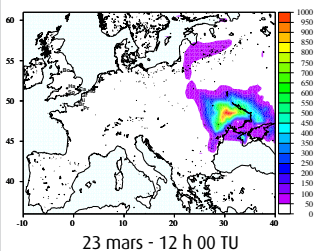
TRANSFERT ET CARACTÉRISATION DES CONTAMINANTS

Épisodes de pollution particulaire en Europe au printemps 2007

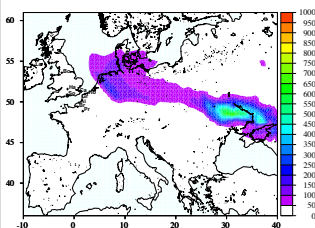
> BERTRAND BESSAGNET

#1

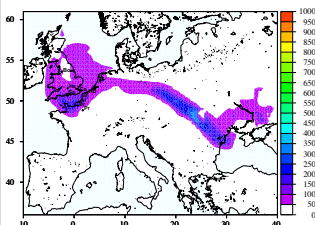
> Évolution du panache de poussières ukrainiennes (concentrations en $\mu\text{g m}^{-3}$) du 23 mars au 25 mars 2007 – L'événement a débuté en fin de matinée le 23 mars 2007 en Ukraine.



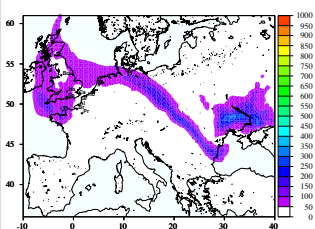
23 mars - 12 h 00 TU



24 mars - 12 h 00 TU



25 mars - 6 h 00 TU



25 mars - 12 h 00 TU

ÉPISODE DE POUSSIÈRE DU 23 AU 25 MARS 2007 EN EUROPE

Le 23 mars 2007, une tempête en Ukraine a soulevé un panache de poussières par érosion éolienne des terres agricoles^[1]. Les terres arables ukrainiennes sont des sols facilement érodables (tchernoziom), ces sols ayant, de plus, subi une sécheresse inhabituelle durant les trois semaines précédant l'événement. Ce panache, essentiellement composé de poussières minérales, s'est rapidement dirigé vers l'Europe de l'Ouest grâce à un flux d'Est soutenu. Les concentrations en PM_{10} occasionnées par cet événement approchaient les $1400 \mu\text{g m}^{-3}$ en Slovaquie et $500 \mu\text{g m}^{-3}$ en Allemagne. Lors de l'arrivée du panache sur le Nord de la France dans la nuit du 24 au 25 mars 2007, les concentrations ont augmenté brutalement pour atteindre 150 à $200 \mu\text{g m}^{-3}$ soit environ 10 fois plus que le niveau de fond généralement observé. Le panache a pu être détecté jusqu'en Irlande du Nord. En France, le panache s'est déplacé de l'extrême Nord de la France vers le Nord de la Bretagne en suivant la Manche, il a frôlé la région parisienne avec une très légère augmentation des concentrations sur l'Ouest de l'Île-de-France.

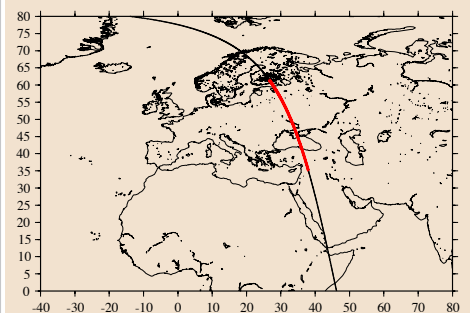
La figure 1 montre l'évolution, simulée par le modèle de qualité de l'air CHIMERE, des concentrations en PM_{10} en Europe du 23 au 25 mars 2007^[2].

Le satellite CALIPSO équipé du Lidar CALIOP est passé le 23 mars 2007 entre 10:00 et 11:00 TU au-dessus de l'Ukraine (figure 2a). Le Lidar permet de détecter la présence d'épisode de pollution et de déterminer le profil vertical de l'atmosphère. La présence de fortes concentrations de particules au-dessus de l'Ukraine a permis de valider l'hypothèse avancée sur l'origine ukrainienne de cet événement de poussières et d'écartier l'hypothèse d'une intrusion de poussières sahariennes. C'est la première fois que l'on met clairement en évidence un tel épisode ayant pour origine l'Europe (figure 2b).

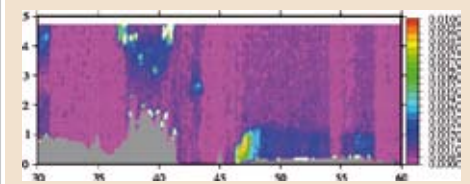
ÉPISODE DE NITRATE D'AMMONIUM AU PRINTEMPS 2007

À plusieurs reprises durant le début du printemps 2007, de nombreux épisodes de particules se sont produits en France. Les concentrations mesurées ont atteint fréquemment les 80 à $120 \mu\text{g m}^{-3}$ en moyenne journalière dans des sites ruraux ou urbains. Depuis le 1^{er} Janvier 2007, les réseaux de surveillance de la qualité de l'air fournissent des données PM_{10} corrigées par une méthode définie par le LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, www.lcsqa.org). Cette méthode utilise des sites de références équipés de couples TEOM-TEOM/FDMS qui permettent d'estimer la fraction volatile des particules. Cette fraction est ajoutée à l'ensemble des mesures fournies par les TEOM situées dans la zone des sites de référence. En effet, avant le 1^{er} Janvier 2007, le système de mesures de PM_{10} évaporait la quasi-totalité de la partie volatile des PM_{10} .

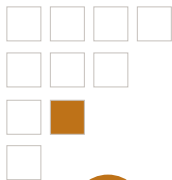
#2



> a) Trajectoire du satellite CALIPSO le 23 mars entre [10:00] et [11:00] TU.

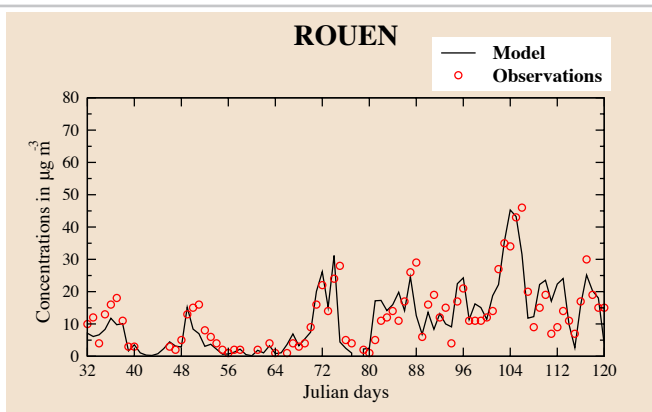


> b) Signal retro-diffusé capté par le Lidar CALIOP embarqué sur le satellite CALIPSO ; on voit très nettement se développer un panache au-dessus de l'Ukraine dans la couche limite entre les latitudes 45 et 50 °N.



#3

> Évolution des concentrations journalières en nitrate d'ammonium estimées par observation et simulées par le modèle.

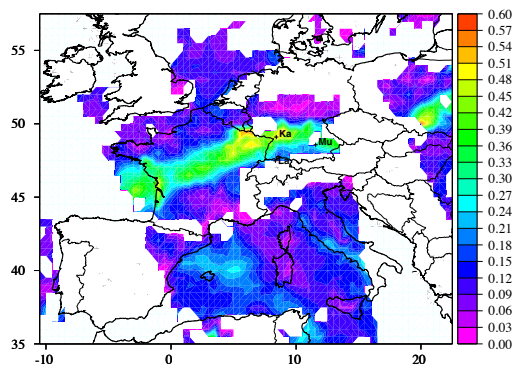


Il a été montré par ailleurs, grâce à des analyses chimiques, que la quasi totalité de la fraction volatile est constituée de nitrate d'ammonium. Cette espèce est formée à partir d'ammoniac émis principalement par le secteur agricole et d'acide nitrique formé par oxydation des oxydes d'azote: $NH_3 + HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3$. L'humidité et la température sont des facteurs déterminants dans sa formation. Le nitrate d'ammonium ainsi formé participe à la formation de particules fines. Les principaux épisodes ont eu lieu autour des 15 mars, 29 mars et 15 avril 2007.

La figure 3 montre les concentrations en nitrate d'ammonium observées et simulées par le modèle CHIMERE durant le printemps 2007 à Rouen. Le modèle montre une bonne corrélation temporelle, il détecte les fortes concentrations au bon moment. Il est à noter que certains jours, le nitrate d'ammonium peut représenter entre 40 et 50 µg m⁻³ en moyenne journalière soit 80 à 90 % des PM₁₀, le seuil étant fixé à 50 µg m⁻³ pour les concentrations en PM₁₀ journalières. La figure 4 montre l'extension spatiale de tels épisodes, l'épaisseur optique permet d'évaluer qualitativement leur structure.

#4

> Épaisseur optique observée par satellite (instrument POLDER) le 14 mars 2007 à [13:00] – (image fournie par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique). Les sites de Karlsruhe (Ka), Munich (Mu) et Laegeren (La) équipés de photomètres montrent clairement la présence de particules fines dans l'atmosphère.



SUMMARY

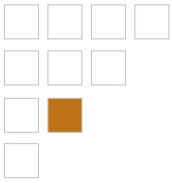
A dust event was observed in Europe on March 23-25, 2007. Surface observations in Central Europe showed huge concentrations values of particulate matter. Lidar measurements and surface stations in Eastern Europe diagnosed a dust event originating from Ukraine related to chernozemic erodible lands. Using new surface and satellite measurements with modeling results, it is demonstrated that the finally huge surface concentrations recorded in the Netherlands, Belgium and the North of France were mostly due to the extremely rare Ukraine dust event whereas Saharan dust events usually produce only mid-troposphere plumes. Over Western Europe the model reproduces the observed PM concentration peaks up to 200 µg.m⁻³ with a large contribution of Ukraine dust, up to 170 µg.m⁻³.

Most generally, in Spring 2007, several particulate matter episodes occurred over the Western part of Europe as shown by ground base and satellite measurements. In March and April, 2007, daily PM₁₀ concentrations often exceeded the regulatory public information threshold (50 µg.m⁻³). These events were largely due to high ammonium nitrate contents in particles, concomitant to high air temperatures favoring ammonia volatilization from soil. From January 1st, 2007, France has set up a method to correct PM observations issued from automated devices (TEOM). Such devices evaporate the volatile fraction of particles and a correction factor is usually applied in Europe, but this method fails to capture some of the highest PM concentrations. The chemistry transport model CHIMERE fairly reproduces the temporal evolution of ammonium nitrate concentrations.

RÉFÉRENCES

[1] Birmili W., Schepanski K., Ansmann A., Spindler G., Tegen I., Wehner B., Nowak A., Reimer E., Mattis I., Müller K., Brüggemann E., Gnauk T., Herrmann H., Wiedensohler A., Althausen D., Schladitz A., Tuch T., Loschau G. (2008), *A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine*, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 997-1016.

[2] Bessagnet B., Menut L., Aymoz G., Chepfer H. and Vautard R. (2008), *Modeling dust emissions and transport within Europe: the Ukraine March 2007 event*. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, D15202, doi:10.1029/2007JD009541.



SYSTÈMES INDUSTRIELS COMPLEXES

La prise en compte des facteurs organisationnels dans la maîtrise des risques

> **JEAN-CHRISTOPHE LE COZE**

Des travaux de recherche sont menés à l'INERIS sur l'intégration des facteurs organisationnels dans l'évaluation des risques d'installations industrielles dangereuses. Le regard est porté sur les structures organisationnelles ainsi que sur les interactions entre les différents acteurs internes individuels et collectifs (opérationnels, gestionnaires, ingénieurs, CHSCT, services) et externes (inspections et autorités de contrôle, associations de riverains, sièges des entreprises, etc.) au sein de ces organisations. Ces travaux sont alimentés par les connaissances issues de l'étude des accidents majeurs sous l'angle des facteurs organisationnels, qui fournissent des données essentielles. Ils sont également alimentés par les travaux dits en fonctionnement normal, qui correspondent aux études réalisées sur le quotidien du fonctionnement des organisations à risque.

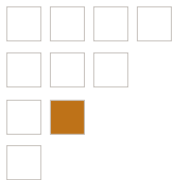
ÉTAT DE L'ART ET MÉTHODE

C'est par l'articulation et les apports de ces deux approches, l'étude en fonctionnement normal et l'étude des accidents, que l'intégration des facteurs organisationnels dans l'évaluation des risques est réalisée^[1, 2, 3, 4]. Ces travaux s'inscrivent dans un état de l'art des connaissances dans le domaine des facteurs organisationnels, à la fois en sciences de gestion^[5], en sociologie^[6] ou encore en anthropologie^[7] pour ce qui concerne le fonctionnement normal. Tous ces travaux apportent différents regards. Les uns sont orientés sur les modélisations systémiques de la sécurité, les autres sur le contournement des règles et la place de l'autonomie des acteurs dans leur travail et au sein des collectifs ou encore sur la place des socialisations (ou des cultures de métiers) dans l'appréhension des situations à risque. Dans l'approche par les accidents, les contributions en science de gestion^[8, 9] ou encore en sociologie et anthropologie^[10] offrent des points de vue portant, par exemple, sur les phénomènes de normalisation de la déviance, de pression de production ou encore de complexité des systèmes techniques et organisationnels. Nos travaux ont pris appui sur ces

acquis en les mobilisant pour l'objectif d'évaluation des risques. Deux entreprises (un site industriel d'un grand groupe, un site de PME) ont ainsi fait l'objet d'études empiriques. Des entretiens individuels ou collectifs, des observations (de jour et de nuit) ainsi que la lecture de documents liés à la sécurité (retour d'expérience, analyse de risques, modes opératoires, etc.) ont été menés. Des acteurs externes à l'entreprise ont aussi été rencontrés, en particulier les autorités de contrôle. Quelques-uns des résultats de ces travaux sont présentés ci-après.

UN MODÈLE GÉNÉRIQUE

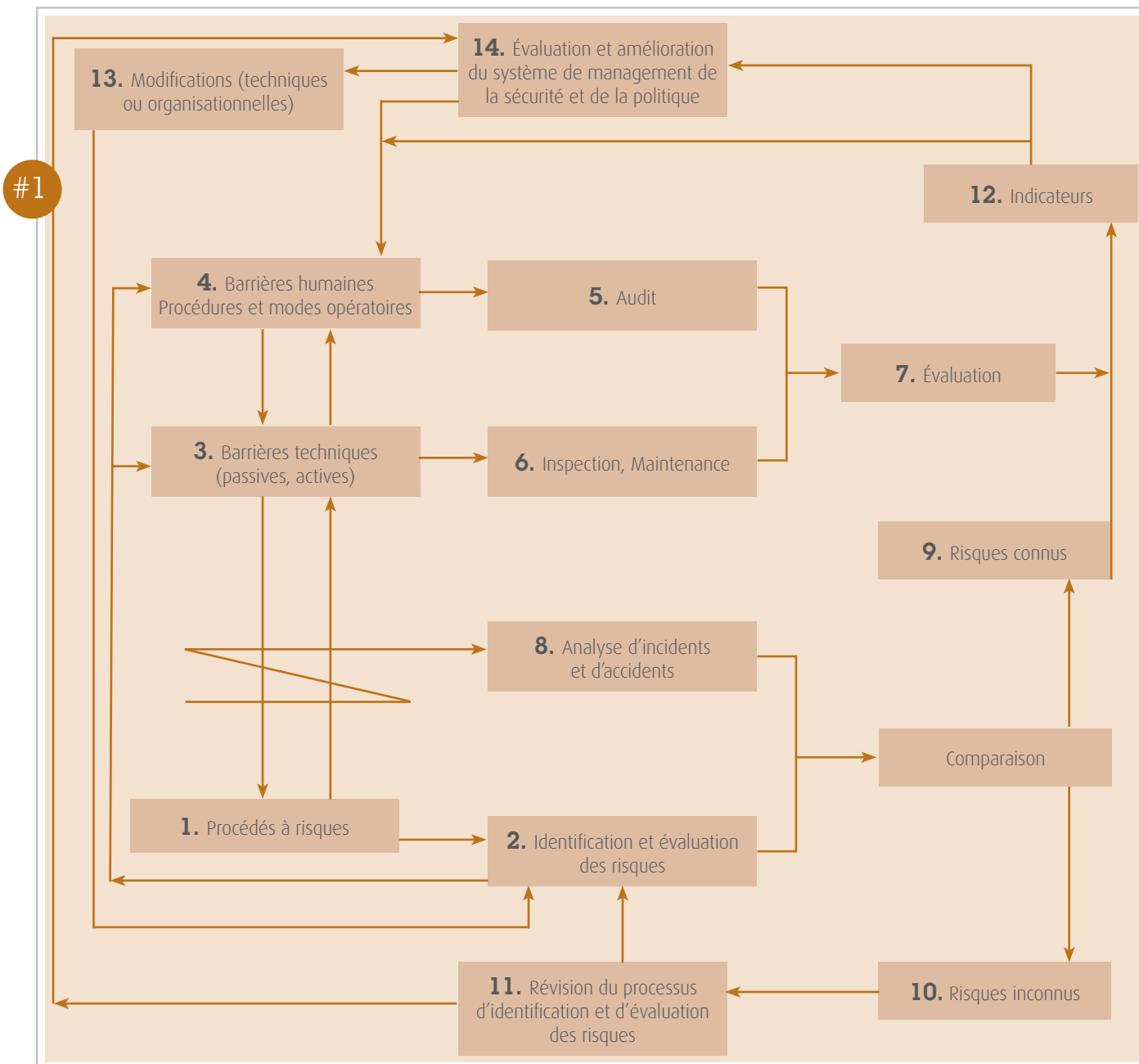
Une manière d'aborder l'introduction des facteurs organisationnels dans l'évaluation des risques est de décrire la façon dont les dispositifs de gestion de la sécurité industrielle se déclinent dans le fonctionnement réel des entreprises (i.e. on se rapproche ici des positionnements d'une sociologie de la gestion^[11]). Les dispositifs de gestion des risques sont en effet aujourd'hui bien représentés par les systèmes de management de la sécurité. Ces systèmes consistent à articuler un certain nombre d'activités, activités qui contribuent à anticiper et à prévenir les scénarios d'accidents majeurs. Les modélisations d'Hale (2003) fournissent un cadre général à ce type de démarche. Le modèle présenté ici (figure 1) n'est certainement pas exhaustif (on pourrait décomposer des activités, on pourrait en ajouter d'autres) mais permet d'indiquer les principales activités. Le point de départ sont les situations à risque (les procédés [1]) et l'analyse des risques de ces procédés [2]. Cette activité doit permettre de définir les moyens de prévention et de protection nécessaires (barrières de défense), à la fois techniques et individuels ou collectifs [3, 4], pour mettre en œuvre la stratégie de gestion des risques. Ceux-ci seront respectivement soumis à des audits [5] et des inspections, à de la maintenance [6] qui feront l'objet d'évaluation [7]. Dans le fonctionnement



quotidien, les interactions des procédés avec les équipements et les collectifs de travail produisent des événements qui donneront lieu à des retours d'expériences [8]. Ces derniers interrogeront les connaissances sur les risques. De ce point de vue, soit les risques (ou scénarios) sont connus [9], soit ils ne le sont pas [10] et feront l'objet d'une réévaluation (par exemple, sur le procédés en question ou sur des procédés identiques au sein d'un même groupe) [11]. Les informations collectées par les audits [5], les inspections, la maintenance [6] et le retour d'expérience [8] fournissent les indicateurs de pilotage de la sécu-

rité [12]. Les modifications à la fois techniques et organisationnelles [13] sont évaluées en termes d'impacts potentiels sur les mesures de défense du système et font l'objet d'audits et du retour d'expérience. Le pilotage du système de management est assuré par le suivi des indicateurs qui centralisent les informations sur le fonctionnement du système [14], une fonction d'audit de l'ensemble des activités peut aussi être introduite dans cette activité, mais n'est pas représentée pour des questions de clarté (des flèches consacrées à la fonction d'audit partiraient en effet dans cette boîte centrale vers toutes les autres).

> Modèle de management de la sécurité industrielle. Adapté de Hale (2003).



DU MODÈLE GÉNÉRIQUE À SON APPLICATION SPÉCIFIQUE

Les traductions opérationnelles de ce modèle sont tout à fait différentes en fonction de la structure spécifique d'une organisation, liée, d'une part, à ses activités et sa technologie et, d'autre part, à ses propres choix de configuration. Comme nous l'avons constaté, d'un grand groupe industriel à la PME, les écarts peuvent être très grands. La fonction sécurité peut être remplie par une seule personne dans la PME, parfois par le responsable maintenance ou encore par le responsable qualité qui cumule les responsabilités. À l'inverse, dans de grands groupes, le service sécurité peut être constitué de plusieurs personnes, chacune ayant une spécialité dans le domaine de la sécurité, entre l'hygiène et la santé/sécurité au travail et la sécurité industrielle, par exemple. D'autres personnes sont spécifiquement dédiées aux relations extérieures, avec les inspections internes ou externes mais aussi avec tout autre acteur, individuel ou collectif, sur le plan des risques (riverains, associations). Ce dernier point introduit la place de l'environnement (réglementaire, local, de marché, de concurrence) de l'entreprise, qui conditionne, sans pour autant la déterminer, la structure de l'organisation. Certains grands groupes ont aussi des fonctions supports dédiées, en dehors des sites, dans le domaine de la recherche - sur la sécurité des procédés, par exemple - ou encore, pour d'autres, sur les facteurs humains ou organisationnels, et qui peuvent aussi être considérées comme une partie de l'environnement de l'entreprise lorsque ces fonctions supports ne sont pas situées sur site. La fonction sécurité peut aussi être plus ou moins centralisée, plus ou moins proche de la direction et du comité de pilotage ou plus ou moins proche du terrain. Les technologies ont aussi un impact sur toutes ces activités, sans les déterminer. La mise en place

des analyses de risques dépend, par exemple, des technologies et procédés employés. Les contraintes ne sont ainsi pas les mêmes pour les productions à façon de la chimie fine que pour les productions de la pétrochimie, de même que les questions de facteur humain dans les processus de production peu automatisés se posent de manière différente que dans les processus fortement automatisés, notamment par l'importance du collectif et de sa flexibilité. Ensuite, la manière dont toutes les activités sont réalisées dépend des rôles et responsabilités qui ont été alloués aux différents services (maintenance, production), dans le cadre, par exemple, des activités de retour d'expérience. Le service sécurité assiste-t-il les différents services dans les séances d'analyses d'incidents ? etc. La taille des services et leur différenciation (maintenance, production, sécurité, méthodes...) ainsi que leur autonomie ou la place de la sous-traitance, en fonction de la taille des entreprises mais aussi des choix opérés par les directions, constituent aussi une dimension spécifique. Ces adaptations du modèle à la spécificité de l'entreprise sont évaluées par rapport à leur pertinence face aux risques identifiés. C'est ensuite à partir de celles-ci et en questionnant leur fonctionnement réel ainsi que leur articulation auprès des acteurs, à la fois de terrain et d'encadrement, qu'une appréciation et évaluation qualitative peuvent être formulées. Cette évaluation qualitative n'est pas de même nature que les évaluations, en partie quantitatives dans le domaine technique, et peut donner l'impression de ne pas disposer de la même rigueur. Nous pensons, au contraire, et de plus en plus, notamment avec ces travaux de recherche, que cette dimension est indispensable à l'évaluation des risques. Elle devrait, de plus en plus, y trouver sa place au même titre que les approches plus formelles et quantitatives, en dépit des préjugés parfois rencontrés.

□ □ ■ SUMMARY

A research was carried out between 2005 and 2007 on organisational safety. Following progress in the understanding of the organisational contributions to safety through previous empirical and theoretical works (i.e. high reliability organisations, normal accident, normalisation of deviance etc.), the purpose was to develop a method for risk assessment. We used scientific inputs from safety management, organisational sociology and anthropology, either from studies after accidents or during normal functioning. The strategy of the research was an interdisciplinary one combining several disciplines from engineering to social sciences. The articulation of the disciplines proved very useful to establish links between technical and social dimensions of the systems that we studied: a SME and a major international group, both in the chemical industrial. The method developed from the project consists in questioning the real functioning of the process safety management system. A process safety management system can be seen as a number of tools, methods or principles that are meant to ensure safety, linked all together (i.e. risk analysis, learning from experience, management of change etc.). In reality, fully implementing all of them is difficult. Tradeoffs are always made and biases exist in the way the tools and principles are implemented. What is interesting is to understand with the help of social insights the reasons behind these tradeoffs and biases. A subsequent question interesting is to try to understand how they impact the ability of the company to ensure safety.

[RÉFÉRENCES

- [1] Le Coze J.-C., 2005. *Are organisations too complex to be introduced in technical risk assessment and current safety auditing?* Safety science 43, 613-638.
- [2] Le Coze J.-C., 2008. *Organisations and disasters: from lessons learnt to theorizing.* Safety science 46, 132-149.
- [3] Le Coze J.-C., Dupré M., 2006. *How to prevent a normal accident in a high reliable organisation: the art of resilience, a case study in the chemical industry.* In Proceedings of the second resilience engineering symposium. 8-10 November. Antibes/Juan-les-Pins, France.
- [4] Le Coze J.-C., Dupré M., 2008. *The need for translators and new models of safety in Resilience engineering perspectives: remaining sensitive to the possibility of failure.* Erik Hollnagel (Editor), Christopher P. Nemeth (Editor), Sidney Dekker (Editor).
- [5] Hale. A.R. 2003. *Safety Management in Production.* Human Factors & Ergonomics in Manufacturing 13 (3), 185-202.
- [6] Bourrier M., 2003. *Facteurs organisationnels : du neuf avec du vieux.* Annales des Mines.
- [7] Perin C., 2004. *Shouldering risks.* Princeton University press.
- [8] Starbuck H. W., Farjoun M., 2005. *Organization at the limit. Lessons from the Columbia disaster.* Blackwell publishing.
- [9] Leveson N., Cutcher-Gershenfeld J., Caroll J.s., Barrett B., Brown A., Dulac N., Marais K., 2005. *Systems approaches to safety: NASA and the space shuttle disasters.* In *Organization at the limit. Lessons from the Columbia disaster.* Edited by Starbuck. W.H., Farjoun M. Blackwell Publishing.
- [10] Vaughan D., 2005. *System effects: on slippery slopes, repeating negative patterns, and learning from mistakes?* In Starbuck H. W., Farjoun M. 2005. *Organization at the limit. Lessons from the Columbia disaster.* Blackwell publishing.
- [11] Segrestin D., 2004. *Les chantiers du manager.* Armand Colin.

Logistique des marchandises dangereuses

Vers une évaluation globale des risques

> BRIGITTE NEDELEC

L'activité industrielle nécessite la production et l'emploi de produits dangereux, mais aussi leur transport entre les installations fixes, ce qui induit, par conséquent, la mise en place d'une logistique appropriée. La terminologie en transports combinés, proposée par la Commission Économique pour l'Europe, définit la logistique comme étant le processus de conception et de gestion de la chaîne d'approvisionnement dans le sens le plus large. Cette chaîne peut comprendre la fourniture des matières premières nécessaires à la fabrication, la gestion des matériaux sur le lieu de fabrication, la livraison aux entrepôts et aux centres de distribution, le tri, la manutention, le conditionnement et la distribution finale au lieu de consommation.

Actuellement, le transport des marchandises dangereuses (TMD), d'une part, et les stockages de marchandises dangereuses, d'autre part, font séparément l'objet d'évaluations des risques basées sur des méthodes propres. Il en ressort des mesures de maîtrise du risque indépendantes alors que les deux activités sont liées tout le long de la chaîne logistique. Par exemple, certaines décisions relatives aux stockages fixes (réduction de capacités de stockage, par exemple) sont susceptibles d'induire un report du risque sur les phases de transport ou de stockage temporaire (exemple, parcs de stationnement ouverts au public).

Ces activités rassemblent un certain nombre d'acteurs (industriels, transporteurs, commissionnaires de transports, etc.) et font intervenir différents types d'interfaces (entre modes de transport, et entre transport et installations fixes).

On comprend que la maîtrise des risques de la chaîne logistique implique le développement d'une méthode d'analyse de risque permettant de prendre en compte l'ensemble des maillons constituant la chaîne en question.

L'industriel pourra ainsi mieux prendre en compte le **critère risque** pour motiver son choix d'une chaîne logistique tout comme une collectivité ou une autorité pourra le prendre en compte pour motiver un choix d'aménagement du territoire.

La maîtrise des risques passe par une série de décisions qui s'appuient, entre autres, sur une estimation des risques. Ces décisions peuvent être de nature préventive, tel le choix de la chaîne logistique la moins risquée ou de l'aménagement du territoire le moins risqué, ou curative avec la mise en place de mesures de maîtrise des risques.

Les décisions de gestion des risques et les stratégies associées reposent sur des arbitrages intégrant d'autres aspects que l'**aspect risque**, et mettent en évidence des finalités multiples (comme, par exemple, le coût, l'impact sur l'environnement, la sécurité au travail des exploitants, la qualité des prestations proposées, les liens commerciaux entre les entreprises impliquées, la rapidité des services proposés, etc.). Une telle perspective dans la prise de décision amène à considérer le développement de méthodes multicritères, servant de support à des situations de décision

multidimensionnelle pour lesquelles les facteurs à prendre en compte sont nombreux, de différente nature et difficiles à quantifier par les méthodes d'analyse des risques traditionnelles. Cette perspective oriente également vers l'intérêt de démarches collectives de prise de décisions plutôt qu'individuelles ou sectorielles.

Les enjeux du Projet GLOBAL

Dans ce contexte, le programme de recherche GLOBAL avait pour objectif de développer des outils méthodologiques qui permettent de donner une base objective aux décisions publiques en matière de maîtrise des risques technologiques et soient notamment utilisables dans le contexte de l'application de la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003¹.

En évaluant les coûts du TMD et en proposant des stratégies logistiques de réduction globale des risques sur l'ensemble de la chaîne logistique, un autre enjeu du projet était de simplifier la maîtrise globale des risques tout en la rendant plus efficace et moins coûteuse. CIRANO et l'École Polytechnique de Montréal ont conduit en parallèle plusieurs opérations du Projet GLOBAL pour le Québec et ont réalisé, dans le cadre d'une collaboration avec l'INERIS, l'opération « Analyse des coûts et des bénéfices attendus des changements potentiels de stratégies logistiques relatives aux stockages et aux transports de matières dangereuses ».

D'une manière générale, des améliorations ont été proposées pour un cadre durable de développement des transports et de l'industrie, en produisant des recommandations pour les évolutions réglementaires futures.

Le Projet GLOBAL a mobilisé sur une durée de trois ans (2004-2007), les acteurs clés de cette problématique, qu'ils soient publics ou privés. Financé en grande partie par le ministère chargé de l'Écologie et des Transports, il a également bénéficié de la collaboration scientifique et financière d'autres partenaires : ministère chargé de l'Industrie, ministère chargé du Travail, industriels de la chaîne logistique, collectivités territoriales.

Proposition d'une méthode pour une approche globale de la maîtrise des risques.

Le Projet GLOBAL a fait l'objet de plusieurs opérations « diagnostics intermédiaires » qui ont aidé à la structuration de la méthode développée. Ces opérations ont notamment consisté à passer en revue le cadre réglementaire et normatif applicables à la thématique, examiner les méthodes d'évaluation des risques existantes et les pratiques de gestion des risques au sein de la chaîne logistique, analyser et comparer le retour d'expérience sur les accidents de matières dangereuses dans le domaine des installations fixes et du transport.

Au vu du constat de ces différentes opérations, la méthode proposée se positionne donc dans un contexte qui se veut multiacteurs et multicritères. Un intérêt important et novateur de la méthode est d'instaurer un système d'analyse encourageant, le plus en amont possible, l'ensemble des acteurs concernés, entreprises industrielles et commerciales, prestataires de transport, collectivités et administrations, à travailler ensemble sur l'analyse des besoins et sur les choix de maîtrise des risques à opérer. Les enjeux et les apports d'une telle méthode sont multiples. La méthode est adaptable au contexte décisionnel, aux enjeux des différents acteurs, aux données, ainsi qu'aux ressources auxquelles le décideur a accès.

Ainsi, l'un des apports d'une telle méthode est la prise en compte des contextes décisionnels dans lesquels s'insèrent les réflexions de chaque acteur sur la prise en compte des risques TMD avec l'appréciation de la maîtrise des risques sur l'ensemble d'une chaîne et non indépendamment sur chaque maillon la constituant. Cela permettra de privilégier la recherche d'une bonne solution globale plutôt que d'un ensemble de bonnes solutions locales.



1 - Loi relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

Cette méthode propose également d'intégrer les systèmes de management de la sécurité comme un outil contribuant à la maîtrise du risque. Elle propose aussi des critères d'appréciation de la maîtrise des risques, fonction des données auxquelles chaque décideur a accès, qu'elles soient quantitatives ou qualitatives.

Et enfin, cette méthode prend en compte le caractère évolutif de l'appréciation de la maîtrise du risque. Si les données deviennent accessibles, il sera alors toujours possible de réviser l'appréciation de la maîtrise du risque.

Structure de la méthode

La démarche globale d'estimation des risques repose sur deux indicateurs de risques et deux approches d'estimation des risques.

- **Deux indicateurs de risques** sont proposés pour des contextes décisionnels distincts que sont le risque intégral et le risque territorial.
- Le **risque intégral** caractérise le risque sur l'ensemble d'une option et permet la comparaison de différentes options logistiques sur la base des risques globaux qu'elles génèrent.
- Le **risque territorial** représente la somme en un point donné du territoire des aléas générés par les différents maillons logistiques impactant le territoire d'étude et permet l'aménagement d'un territoire en comparant les différentes options au regard de ce critère.

Deux approches d'estimation des risques sont proposées : une approche simplifiée et une approche complète.

- L'**approche simplifiée** convient à des évaluations rapides, ne nécessitant pas d'investissements importants en termes de recherche de données. Cette approche n'est néanmoins applicable qu'à des situations de risque bien différenciées.
- L'**approche complète** est destinée aux acteurs qui disposent des ressources nécessaires au recueil de données plus précises. Cette approche complète se justifie, en particulier, lorsque les options à comparer sont proches les unes des autres.

Les différences entre les deux approches résident essentiellement dans les hypothèses retenues et le choix des données pour réaliser l'estimation des risques comme, par exemple, de ne retenir que la caractéristique de danger la plus importante du produit dangereux, de considérer le scénario majorant et les probabilités génériques associées au scénario majorant pour chaque maillon, estimer le nombre de personnes uniquement sur les tronçons à forte densité urbaine.

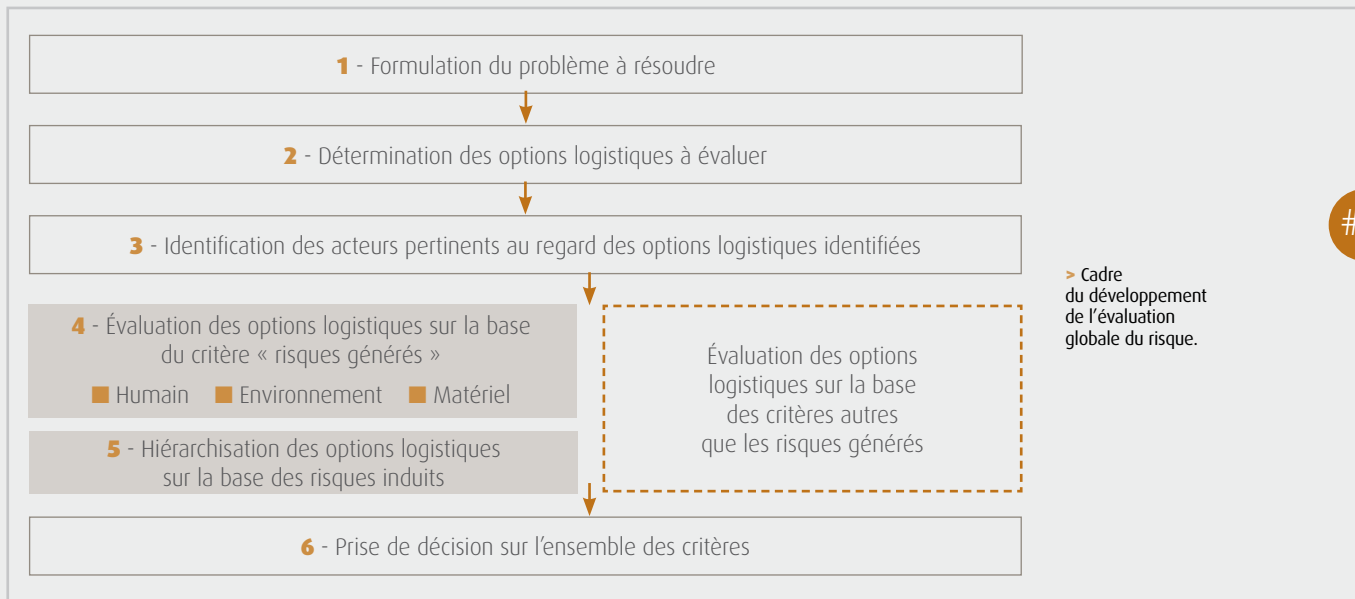
La méthode permet d'intégrer les enjeux humains, matériels et environnementaux. Dans le cadre de ce projet, seuls les enjeux humains ont été retenus pour illustrer la méthode d'estimation des risques.

La méthode permet la combinaison de données qualitatives et quantitatives. Pour chaque type d'enjeu étudié, l'estimation d'un indicateur de risque (risque territorial ou risque intégral) est effectuée de la façon suivante :

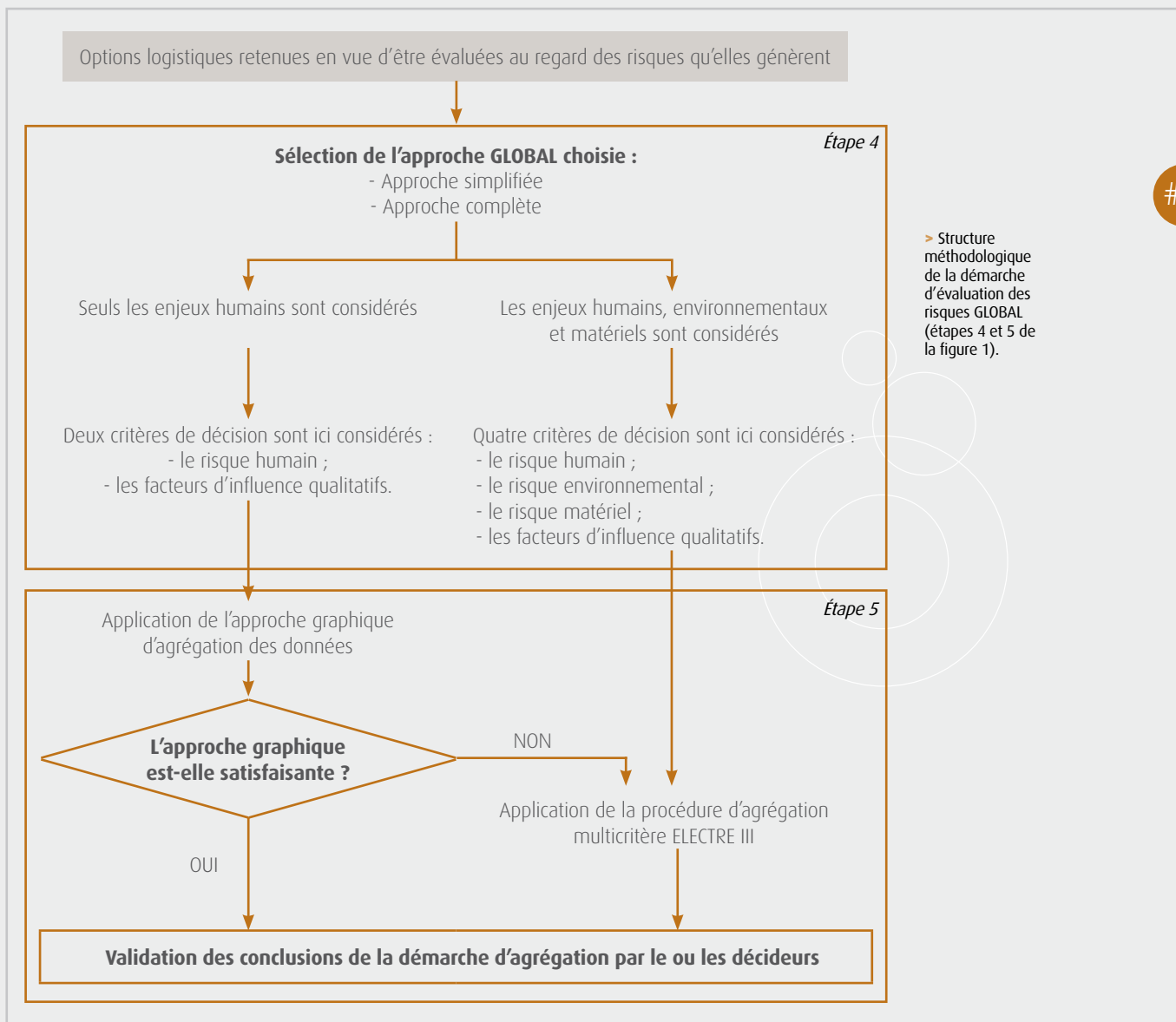
L'indicateur de risque est tout d'abord estimé **quantitativement** à partir de données génériques à disposition ou, de préférence, à partir de données spécifiques représentatives collectées sur le terrain. Puis l'estimation quantitative est complétée par l'estimation d'**indicateurs qualitatifs** appelés « facteurs d'influence » qui permettent d'apprécier qualitativement la performance sécurité de chaque maillon.

Cette proposition d'estimation des risques est accompagnée par la proposition de **démarches d'agrégation** basées sur des règles de décision concernant la prise en compte des facteurs d'influence qualitatifs et des approches multicritères pour la hiérarchisation des options logistiques ou d'aménagement de territoire.

Ainsi, les étapes générales de tout processus de décision sur une chaîne logistique sont représentées dans la figure 1 sur laquelle les étapes propres à la prise en compte du critère risque (champ d'étude du projet) sont soulignées en gris. Celles-ci sont développées dans la figure 2.



#1



#2

[RÉFÉRENCE

Mazri C., Deust C., Nedelec B. *Logistics of dangerous goods: a GLOBAL risk assessment approach*. Congrès SRA/ESREL, septembre 2008, Valence.

Les atouts de la démarche GLOBAL

Au regard des éléments présentés précédemment, les atouts suivants sont à considérer :

- 1 - La démarche GLOBAL ne nécessite pas plus de données que celles qui sont actuellement utilisées pour caractériser les risques sur chacun des maillons logistiques. Ainsi, concernant les données quantitatives, seule la probabilité et la gravité sont requises. Ces données sont recherchées et exploitées pour toutes les méthodes classiques d'analyse des risques sur les différents maillons logistiques (installations fixes, maillons linéaires...). Concernant les données qualitatives, les données souhaitées peuvent être retrouvées dans les rapports d'audit de certification auxquels se soumettent les prestataires logistiques. Enfin, la détermination des seuils de préférence et d'indifférence nécessite d'apprécier les niveaux d'incertitude associés aux évaluations de risques effectuées. Or, l'étude et la caractérisation de ces incertitudes s'impose au-delà de toute approche multicritère. De ce fait, la démarche ELECTRE III proposée se base grandement sur des données qui doivent être recueillies même si l'approche multicritère n'est pas utilisée.
- 2 - L'investissement (coûts, compétence et délais) nécessaire à l'utilisation de l'approche ELECTRE III est réduit. Il se résume à l'achat du logiciel ainsi qu'à une formation pour son utilisation. La durée des calculs est, quant à elle, de l'ordre de la milliseconde.
- 3 - En combinant des données qualitatives et quantitatives, la démarche GLOBAL permet une meilleure description des situations à risques en intégrant des éléments qui jusque-là n'étaient pas pris en compte dans l'évaluation des risques faute de pouvoir les quantifier (retour d'expérience, formation du personnel, gestion des modifications...).
- 4 - Enfin, en adoptant une démarche d'agrégation multicritère, la démarche GLOBAL ouvre la porte à la considération des critères risque (RI, RT et Q) en commun avec d'autres critères de décision de type coûts, délais, qualité de service... En effet, la démarche ELECTRE III proposée peut tout à fait s'appliquer pour intégrer d'autres critères de décision en plus de ceux liés aux risques.

Les limites de la démarche GLOBAL

La démarche proposée a ses limites propres.

- La première est liée à la difficulté de collecte des données quantitatives nécessaires à son déroulement.
- La seconde demeure le faible retour d'expérience quant à son comportement en situation réelle, et notamment, au regard des incertitudes qui peuvent accompagner les données d'entrée (probabilité, gravité...).

Pour pouvoir pallier cette limite, un plus grand nombre d'expérimentations et d'étude des incertitudes doivent être menées sur des cas de terrain.

- Enfin, il est tout à fait envisageable d'étudier la possibilité d'utiliser d'autres approches d'agrégation que celles proposées tout au long de ce document (agrégation des facteurs qualitatifs et ELECTRE III). Un travail plus approfondi peut être envisagé pour étudier d'autres approches d'agrégation, toujours sur des cas de terrain.

Perspectives

La méthode proposée, testée sur un exemple fictif, montre, d'une part, que pour estimer le risque accidentel, il est besoin de combiner l'estimation quantitative à une estimation qualitative quelle que soit la robustesse de l'estimation quantitative et, d'autre part, que cela est réalisable.

Toutefois, cette méthode se doit d'être déclinée sur des cas réels pour des utilisations concrètes par les différents acteurs concernés par la logistique des marchandises dangereuses.

Si l'on souhaite développer cette approche globale du risque, et éprouver la robustesse de la méthode proposée, il faut avant tout **implémenter la méthode par des cas réels** et réaliser des guides pratiques à destination des différents acteurs en incluant si possible la prise en compte des enjeux environnementaux et matériels. Il faut également **construire** en parallèle, **des bases de données nécessaires à la quantification et à la qualification des risques en élaborant les « fiches maillons » qui sont au cœur du processus. Il conviendra également d'homogénéiser au niveau national les approches de recueils de données.**

La caractérisation des critères probabilité, intensité et gravité, vulnérabilité ainsi que les facteurs d'influence sont à étudier pour chacun des types de maillon retenus. Le point d'entrée, ce sont bien ces maillons, qu'il faut caractériser vis-à-vis du critère risque accidentel en capitalisant l'ensemble des données techniques nécessaires.

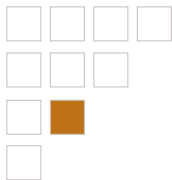
□ □ ■ **SUMMARY** |

GLOBAL research program aims to develop a global method of risk assessment which can take into account the whole accidental risks linked to the dangerous goods supply chain. GLOBAL was led by INERIS with the association of the French national authorities, a Canadian research organism (CIRANO), the Urban Community of Grand Lyon and some large enterprises (Air Liquide, Arkema, Gaz de France, SNCF).

This joint approach started in 2004 with an experimental description work of risk evaluation and decision-making situations has been achieved in 2007 by the realisation of a system analysis while encouraging all the actors (industry, local communities, public authorities) to work together most upstream possible on the evaluation of needs and the choices of risk control of operating. Indeed, the current situation is widely under the control of the bipartite negotiation but generates some negative effects which are often misunderstood by the other parties concerned with the taken decisions. So, this method will allow to give a more standardised base to industry practices and represents a tool to help the actors to integrate the risk factor in the decision they have to take regarding the dangerous goods supply chain.

|





SYSTÈMES INDUSTRIELS COMPLEXES

Modélisation du couplage incendie – ventilation en tunnel par une approche 3D

> **BENJAMIN TRUCHOT**

Les nombreux incidents et accidents en tunnel de ces dernières années, tunnel du Mont-Blanc, tunnel du Fréjus, tunnel du Tauern, tunnel Gheizho, funiculaire de Kaprun... ont engendré une prise de conscience générale de ce type de risque, et plus particulièrement du risque incendie. Par ailleurs, l'accroissement continu de la menace intentionnelle pour toutes les infrastructures, et plus particulièrement celles de transport, implique de considérer les phénomènes dangereux avec de plus en plus d'attention. Ainsi, si une approche de type 1D permet souvent de modéliser le comportement d'un incendie en tunnel^[1,2] avec une précision suffisante pour dimensionner le système de ventilation.

Certaines situations nécessitent une approche plus fine. Notamment, la réponse d'une nappe de fumée stratifiée à une perturbation ne peut être estimée que par un calcul 3D^[3] et les moyens expérimentaux. Dans ce contexte, le projet EGSISTES (Evaluation Globale de la Sécurité Intrinsèque des Systèmes de Transport En Souterrain) s'intéresse à la stabilité d'une nappe stratifiée en cas d'incendie de véhicules dans un tunnel. Des essais d'incendie vont être réalisés dans la galerie incendie de l'INERIS^[4]. Les résultats de ces essais permettront d'appréhender plus finement la physique des phénomènes et de développer des modèles physiques qui seront validés sur ces mêmes essais. Au préalable, des simulations 3D permettent de définir les configurations expérimentales les plus pertinentes, les résultats des essais seront ensuite comparés aux simulations afin de valider et améliorer ces dernières.

CALCUL 3D ET ÉCOULEMENTS EN TUNNELS

De nombreux codes de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) sont aujourd'hui disponibles sur le marché, depuis les codes génériques, les plus connus (Fluent, CFX, ...) jusqu'aux codes spécifiques, souvent connus uniquement par les spécialistes du domaine (FDS, par exemple, pour la modélisation des incendies). Tous ces codes

sont basés sur une approche similaire de discrétisation du domaine et de résolution des équations de Navier-Stokes. mais différent dans les schémas numériques et les sous-modèles utilisés.

Dans le domaine de la simulation des incendies, l'INERIS utilise l'outil FDS (Fire Dynamics Simulator), développé par le NIST (National Institute of Standard and Technology) et distribué en Open-Source. Après une présentation de la physique impliquée dans les écoulements en tunnels, les paragraphes suivants présentent l'approche CFD de manière générale mais succincte, tous les détails concernant les modèles utilisés dans FDS sont décrits dans ^[5]. La description des modèles est orientée sur les besoins des modélisations en tunnel.

NOTIONS DE MÉCANIQUE DES FLUIDES NUMÉRIQUE

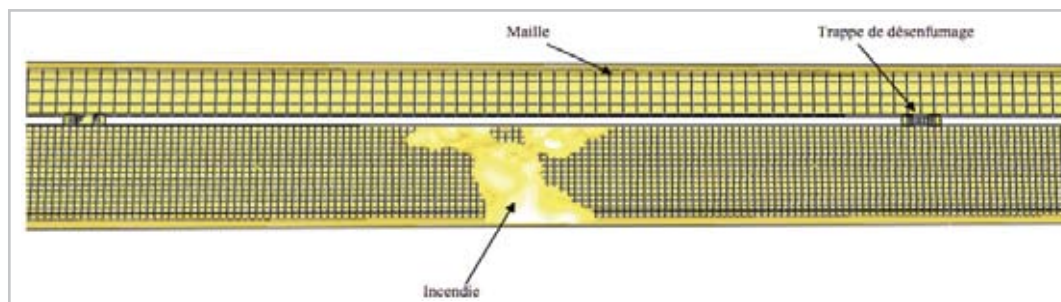
Les équations résolues dans un code de mécanique des fluides sont les équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides^[6] : équation de conservation de la masse, trois équations de conservation de la quantité de mouvement et une équation d'énergie, indispensable pour la modélisation des incendies.

La complexité de ces équations rend leur résolution algébrique impossible et impose l'utilisation d'une discrétisation de l'espace et du temps.

Les équations sont ainsi résolues sur de petits volumes, appelés mailles, tel que représenté sur la figure 1.

Cette figure montre une représentation numérique de la galerie incendie de l'INERIS (10 m² de section et une longueur de 50 m) en configuration de ventilation semi-transversale, c'est-à-dire avec une gaine d'air vicié en partie haute permettant d'extraire les fumées au travers des trappes de désenfumage. De la même manière, une discrétisation temporelle est utilisée.

Par ailleurs, la résolution exacte de ces équations discrétisées est impossible et l'utilisation de sous-modèles est alors nécessaire et, plus particulièrement dans le domaine de l'incendie, des modèles



> Exemple de maillage sur une géométrie « tunnel ». Dans le cas présent, la galerie incendie de l'INERIS.

de combustion et de turbulence. La complexité et la large variété des modèles de combustion empêchent d'en faire ici une description satisfaisante. Les références [5] et [6] présentent respectivement le modèle de combustion utilisé dans le code FDS et une vue générale des modèles de combustion.

Modélisation des phénomènes turbulents

Les phénomènes turbulents sont des phénomènes instationnaires, généralement anisotropes, et plus particulièrement pour les tunnels qui présentent une direction d'écoulement privilégiée. De manière simple et imagée, on retiendra la turbulence comme un ensemble de structures tourbillonnaires, de tailles variant entre l'échelle de Kolmogorov pour les plus petites structures et l'échelle intégrale pour ceux de tailles les plus importantes, ou plus exactement pour les tourbillons les plus énergétiques. Trois niveaux de modélisations de la turbulence peuvent être utilisés.

Le niveau de résolution exacte des phénomènes turbulents est appelée **DNS** (pour l'acronyme anglais **Direct Numerical Simulation**). Il s'agit, dans ce cas, d'utiliser un maillage suffisamment fin pour capturer l'ensemble des structures de l'écoulement, c'est-à-dire des mailles de la taille de l'échelle de Kolmogorov. Le nombre de mailles qu'il est alors nécessaire d'utiliser est souvent rédhibitoire pour les simulations de configurations réelles. Cette famille de modèles est à l'inverse très pertinente pour modéliser des petits domaines afin de comprendre les phénomènes physiques plus en détail et d'écrire des modèles pour les autres approches.

Afin d'utiliser des maillages exploitables sur des configurations réelles et industrielles, il faut se résoudre à ne pas capturer l'ensemble des phénomènes physiques. Dans le cas des modèles **LES** (pour l'acronyme anglais **Large Eddy Simulation**), les équations sont filtrées spatialement : les plus grandes échelles de la turbulence, soient les tourbillons les plus énergétiques sont résolus numériquement, les plus petites échelles sont

modélisées physiquement. Ces modèles permettent notamment de capturer des phénomènes fortement instationnaires car aucune moyenne temporelle n'est utilisée. À l'inverse, pour les modèles de type **RANS** (pour **Reynolds Average Navier Stokes**) les équations sont moyennées temporellement, cela signifie que l'écoulement moyen est résolu, les phénomènes turbulents sont modélisés, par exemple au moyen d'un transport d'équations supplémentaires (modèle k-ε par exemple).

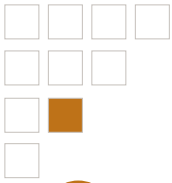
Comme spécifié précédemment, pour les modélisations 3D en tunnel, l'INERIS se sert du code FDS. Ce code utilise, pour modéliser les phénomènes turbulents, une approche de type LES. Plus de détails sur ces méthodes de résolution de la turbulence sont présentés dans [5] et [7].

TUNNELS ET VENTILATION

La réglementation, et plus particulièrement la circulaire interministérielle n°2000-63 du 25 août 2000, impose la mise en place d'une ventilation, notamment pour le désenfumage, pour les tunnels routiers. Plusieurs familles de systèmes de ventilation peuvent être utilisés :

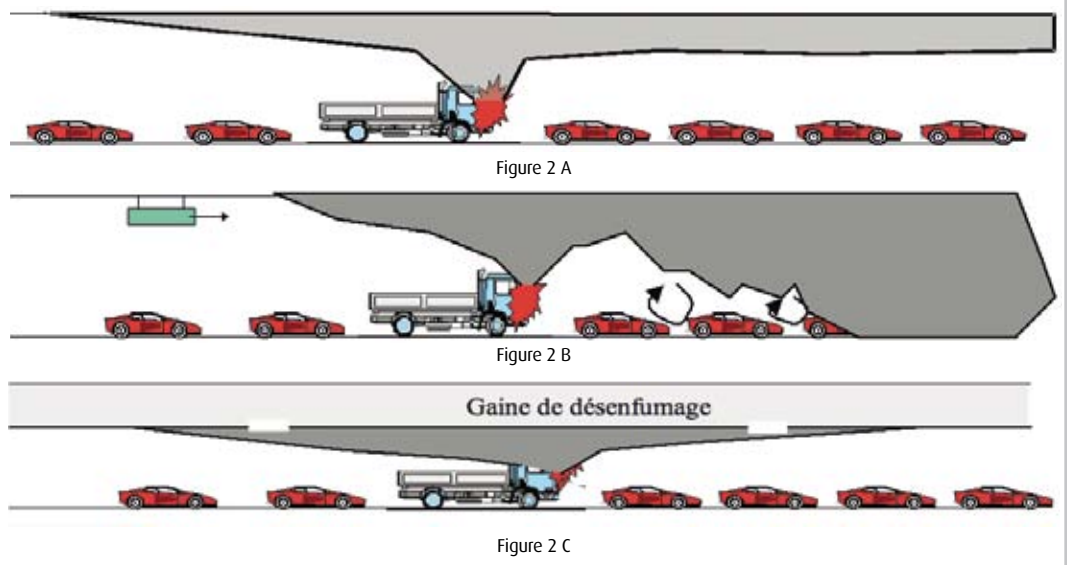
- Ventilation longitudinale ;
- Ventilation transversale ou semi-transversale.

La ventilation longitudinale d'un tunnel consiste à créer un courant d'air sur toute la longueur du tunnel (ou par tronçons) par extraction ou injection d'air. Ce procédé utilise généralement des ventilateurs longitudinaux, ou accélérateurs, situés sous la voûte du tunnel. Le procédé est représenté sur la figure 2A. On distingue sur ce schéma les deux zones caractéristiques d'une ventilation longitudinale : la couche de fumée à l'aval du feu, c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement dont la stratification est délicate à tenir, et la couche remontant l'écoulement, généralement stable, appelé backlayering. La formule de Danziger et Kennedy [9] permet d'évaluer la vitesse nécessaire, appelée vitesse critique, pour empêcher les fumées d'envahir la partie amont du tunnel. Cependant, des phénomènes physiques, comme l'impact d'un accélérateur situé en amont, peu-



#2

- > A : Principe de la ventilation longitudinale.
- > B : Perturbation induite par les véhicules sur la nappe aval en ventilation longitudinale.
- > C : Principe de la ventilation transversale.



vent engendrer la déstratification de cette nappe de fumée, dont les conséquences peuvent être dramatiques. Il convient ainsi de bien appréhender les phénomènes physiques liés à ce phénomène. Par ailleurs, un modèle CFD peut permettre d'appréhender la turbulence générée par les véhicules stationnés en aval de l'incendie, turbulence dont les conséquences peuvent être une perte de stabilité plus rapide de la nappe aval, figure 2B. La ventilation transversale ou semi-transversale consiste à utiliser une gaine d'extraction d'air vicié (semi-transversale), couplée à une gaine d'apport d'air frais pour la ventilation transversale. Ce principe de fonctionnement est représenté sur la figure 2C. Dans le cas d'une ventilation semi-transversale, l'écoulement est symétrique par rapport au feu, la vitesse dans la zone de l'incendie est très faible. L'air frais est apporté par les deux entrées du tunnel et l'air vicié extrait par la gaine de désenfumage. Ce schéma de ventilation permet généralement de conserver une nappe stratifiée en partie haute mais la longueur du tunnel où se répartissent les fumées et cette stabilité sont à quantifier ; cela peut être réalisé à l'aide d'outils de calcul 3D. De

même, la turbulence générée par les véhicules et son impact sur la stabilité de la nappe de fumée sont à étudier. Cette configuration sera également étudiée expérimentalement dans le cadre du projet EGSISTES afin de déterminer l'influence d'obstacles, tels les véhicules, sur la stratification des fumées. Les modèles importants pour la modélisation des écoulements dans les tunnels sont donc les modèles de combustion, de turbulence, les phénomènes pouvant être à l'origine de la déstratification d'une nappe de fumée et les modèles thermiques utilisés pour calculer les échanges aux parois.

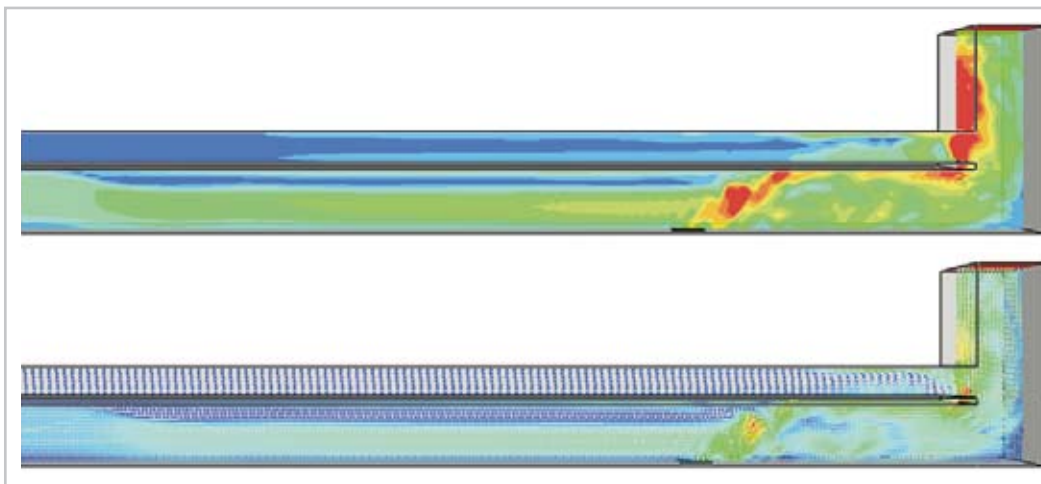
MODÉLISATIONS CFD DANS LE CADRE DU PROJET EGSISTES

Ce chapitre montre brièvement les résultats obtenus à l'aide d'un calcul CFD et les exploitations qu'il est possible d'en faire. La figure 3 montre une iso-surface de dégagement d'énergie et la nappe de fumées obtenues pour deux couples régime de ventilation – puissance. La figure 4 montre le champ de vitesse sous forme d'iso-contours et de champ de vecteurs. Ces résultats permettent, dans

#3

- > Visualisation du dégagement d'énergie (iso-surface orange) et du nuage de fumée dans une configuration de ventilation longitudinale pour deux couples régimes de ventilation - puissance.





> Champ de vitesse.

le cas du projet de recherche EGSISTES, de définir les conditions expérimentales les plus pertinentes. Les vitesses d'air sont comparées à la vitesse critique théorique donnée par la formule de Danziger et Kennedy^[9].

CONCLUSIONS

Les moyens de calcul CFD sont de précieux outils dont les usages sont nombreux. En premier lieu, comme présenté dans ce document, ils permettent de déterminer les distributions des différentes grandeurs physiques et notamment, pour la problématique des incendies en tunnels, les températures, champs de concentration ou encore

distributions de vitesse. Ces outils sont couramment utilisés dans les études spécifiques de dangers en tunnel afin de valider la mise en œuvre de certaines hypothèses et vérifier les principes clés de la sécurité. Par ailleurs, il s'agit d'outils de recherche précieux. Ils permettent de comprendre les phénomènes physiques en modélisant de nombreuses configurations qu'il serait impossible d'étudier expérimentalement. Cependant, la complexité et la finesse des modèles utilisés implique une forte attention dans la validation des outils et l'exploitation des résultats. On mentionnera, par ailleurs, la sensibilité aux paramètres d'entrée et l'importance d'essais permettant l'exploitation.

[RÉFÉRENCES

- [1] Daëron S., Ruffin E., 2000. *Calculations of fire smoke behaviour in long rail tunnels*. 1st international Conference « tunnels and Underground Station Fires », 3-4 May 2000, Hong Kong.
- [2] Ruffin E., 2001. *Mise au point d'un outil de simulation de situations accidentelles en réseaux souterrains*. Rapport INERIS 25-BCRD-97, juin 2001.
- [3] Waymel F., Fournier L., Ruffin E., 2005. *Étude numérique de l'influence des véhicules sur la stratification des fumées d'incendie en tunnel*. Congrès AFTES, les tunnels, clé d'une Europe durable, 10-12 octobre 2005, Chambéry, France.
- [4] Boehm M., Fournier L., Truchot B., 2008. *Smoke stratification stability: Presentation of experiments*. Tunnel safety and Ventilation, 21-23 avril 2008, Graz.
- [5] « *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide* ». March 2007. NIST.
- [6] Candel S., 2001. « *Mécanique des fluides* ».
- [7] Sagaut P., 2002. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flow, An introduction*. Second edition.
- [8] Poinso T. et Veynante D., 2005. *Theoretical and numerical combustion*. Second edition.
- [9] Danziger N. and Kennedy W., 1982. *Longitudinal ventilation analysis for the Glenwood Canyon tunnels*. Int. Symp. on the aerodynamics and ventilation vehicle tunnels », p. 169-186.

□ □ ■ SUMMARY

This paper presents one part of the EGSISTES research project. This project is linked with the recent accidents that occurred in some tunnels. More especially, one of the aims of this project is to define the answer of a stratified smoke layer to an external disturbance such as fan or vehicle presence. This will be done using both experimental and numerical approaches. The objective of this paper is to describe the relations between fire and ventilation modelling which is the key point for the stratification understanding.

One of the main phenomena responsible of the stratification disturbance is turbulence with can be modelled following three main approaches: RANS, LES and DNS. Those three approaches are described in the paper. LES simulations are presented next because the FDS code used by INERIS is based on this approach. This approach is the best compromise between the instationary phenomena modelling and the computing possibilities.

The basic principles of ventilation in road tunnels are described next: transversal and longitudinal ventilation strategy. Both approaches have to be applied following a strict regulation in France. The first consists in blowing smoke outside the tunnel using one part of this tunnel the second one required a ventilation duct for smokes extraction.

Finally, FDS computations reproduce experiments that are achieved in the INERIS fire tunnel with a one third scale. Those experiments aim first to have a better characterisation of the stratified smoke layer.

Évaluer les conséquences d'un incendie d'entrepôt : le projet FLUMilog

> **STÉPHANE DUPLANTIER**

Le projet FLUMilog a pour objectif le développement d'une méthode de référence pour déterminer le flux émis par un incendie d'entrepôt. Il est porté par quatre partenaires principaux (INERIS, CTICM, CNPP, AFILOG) rejoints en 2007 par l'IRSN, auxquels s'ajoute l'appui d'industriels du secteur de la logistique (construction ou exploitation). L'INERIS assure la coordination du projet, qui s'articule en sept étapes :

- La première étape consiste à faire un recensement et une confrontation des différentes méthodes utilisées, principalement par les trois organismes (INERIS, CTICM, CNPP), et à mettre en évidence les points de convergence et de divergence afin d'identifier les études complémentaires à mener.
- La deuxième étape concerne la réalisation de ces études complémentaires pour lever les principaux points de divergence. Ces études pourront être aussi bien numériques qu'expérimentales sur des maquettes à échelle réduite. Elles permettront de proposer une première définition de la méthode de calcul.
- La troisième étape porte sur la définition d'un cahier des charges pour la réalisation des essais de validation à grande échelle.
- La quatrième étape réside dans la mise en place de l'infrastructure pour la réalisation des essais à grande échelle.
- La cinquième étape concerne l'instrumentation et l'acquisition des données au cours des différents essais réalisés par les trois organismes.
- La sixième étape consiste à exploiter les résultats des essais pour vérifier la méthode de calcul proposée et à développer la méthode de référence.
- La septième étape porte sur la diffusion des connaissances acquises lors de ce projet.

L'année 2007 a essentiellement été consacrée à trois tâches :

- Confrontation des méthodes et mise en place d'une première version de la méthode.
- Réalisation d'essais à moyenne échelle et de calculs 3D.
- Préparation des essais à l'échelle 1.

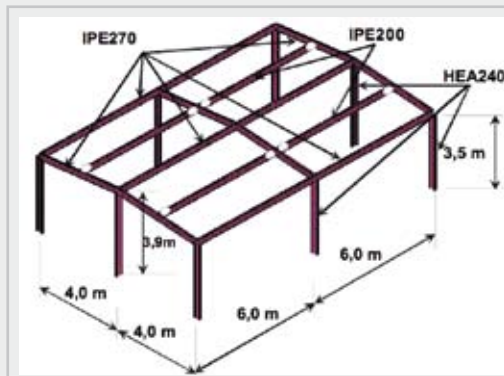
AVANCEMENT DE L'ÉTAPE 1 – CONFRONTATION DES DIFFÉRENTES MÉTHODES

Cette étape est terminée, une revue des paramètres nécessaires à la modélisation des flux thermiques associés à l'incendie d'un entrepôt a été effectuée. Pour chacun d'entre eux, dès lors que des données étaient disponibles, des hypothèses ont été formulées et lorsque aucun élément n'était disponible, des propositions d'études numériques ou expérimentales ont été faites.

Ces paramètres concernent :

- les scénarios d'incendie à envisager (en intégrant, dans la mesure du possible, la cinétique du phénomène) ;
- la nature du combustible qui constitue une des données d'entrée les plus sensibles en raison du nombre très important de produits susceptibles d'être entreposés dans une cellule de plate-forme logistique ;

#1



> Représentation schématique de la structure d'essais et photo montrant les parois (bardage et béton cellulaire ainsi que la structure protégée).

- les dispositions constructives des cellules et sur leur capacité à limiter le flux thermique en en masquant une partie ;
- la géométrie des flammes qui résultent directement des différentes hypothèses faites précédemment ;
- les cibles et leurs caractéristiques ; cette partie ne sera pas traitée dans le cadre du projet Flumilog, les seuils étant fixés de façon réglementaire.

Les études complémentaires réalisées ont notamment eu pour objectif de déterminer les caractéristiques des flammes (hauteur, géométrie, émittance...) en intégrant, de façon expérimentale, l'influence du combustible et, de façon numérique, l'agencement du combustible.

AVANCEMENT DE L'ÉTAPE 2 – ÉTUDES COMPLÉMENTAIRES

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Construction de l'infrastructure pour les essais à moyenne échelle

Les essais sont réalisés dans un bâtiment construit spécialement pour le projet et dont les dimensions sont les suivantes : longueur : 12 m, largeur : 8 m, hauteur : 3,5 m ; soit une surface de 96 m² et un volume de 336 m³.

La toiture est en bois contreplaqué de façon à confiner les fumées pour permettre la propagation de l'incendie dans la cellule, puis à disparaître afin d'observer la sortie de flammes au-dessus du toit et de mesurer les flux thermiques correspondants. Ces dispositions constructives visent à reproduire les événements observés dans le cas d'incendie d'entrepôts réels. Ce bâtiment possède une structure et une charpente selon le schéma et la photo proposés de la figure 1.

Combustibles

Plusieurs combustibles type ont été retenus afin de modéliser les grandes familles de combustibles stockés dans les entrepôts. Ces combustibles types ont pour objectif la compréhension du développement du feu et des effets thermiques pour un stockage de produits agroalimentaires à forte teneur en eau (stockage de produits alimentaires...), pour un stockage dont le combustible est mélangé avec de l'incombustible (pièces détachées...), pour un stockage comportant des matières plastiques (électroménager...), et pour un stockage totalement combustible.

Les combustibles type sont composés de :

- bois : palettes en bois
- d'incombustible : pièces métalliques
- d'eau : eau en bouteilles
- de plastique : fûts en plastique et granulés

pour former, au final, toute une panoplie de combustibles représentatifs des catégories présentées précédemment par ordre croissant de puissance dégagée :

#2



> Exemples d'agencement de combustibles.

- combustible 1 : bois 50 % + eau 50 %
- combustible 2 : bois 25 % + incombustible 75 %
- combustible 3 : bois 50 % + incombustible 50 %
- combustible 4 : bois 75 % + incombustible 25 %
- combustible 5 : plastique 50 % + combustible 50 %
- combustible 6 : bois 100 %

L'influence de la hauteur de stockage a également été étudiée. Le stockage a été réalisé par empilement de palettes. La figure 2 présente des exemples d'agencement.

Les essais prévus sont les suivants :

- Un essai avec chacun des combustibles (de 1 à 6) ;
- Un essai de reproductibilité avec le combustible n°3 ;
- Un essai avec deux niveaux de stockage au lieu de trois.

Instrumentation

Une centrale d'acquisition permet d'enregistrer les signaux de :

- 24 thermocouples à l'intérieur du bâtiment dans les palettes.
- 8 thermocouples répartis par paire contre chacune des parois : 1 thermocouple au centre de la face intérieure et 1 au centre de la face extérieure.
- 5 fluxmètres devant chaque façade du bâtiment à 1,8 m du sol, soit 20 fluxmètres.
- 2 radiomètres devant chaque façade du bâtiment, soit 8 radiomètres.
- Pour chaque face du bâtiment : 1 radiomètre mesure l'émittance de la paroi de la façade, 1 radiomètre mesure l'émittance des flammes dépassant du toit du bâtiment.

Vidéo

Un camescope est disposé durant les essais devant chacune des façades du bâtiment pour évaluer les hauteurs de flamme.

Une caméra infrarouge a été mise en place devant une façade du bâtiment pour chaque essai.

ESSAIS RÉALISÉS

En 2007, quatre essais ont été réalisés. Les quatre autres essais ont eu lieu début 2008. Les résultats obtenus sont en cours d'exploitation et les photos ci-après constituent des exemples de formes de flamme photographiées lors de ces essais.

> Essai n° 1 : 2 niveaux
75 % de bois,
25 % d'incombustibles

Essai n° 2 : 3 niveaux
75 % de bois,
25 % d'incombustibles

Essai n° 3 : 3 niveaux
50 % de bois,
50 % d'eau

Essai n° 4 : 3 niveaux
50 % de bois,
50 % d'incombustibles



Essai n° 1



Essai n° 2



Essai n° 3



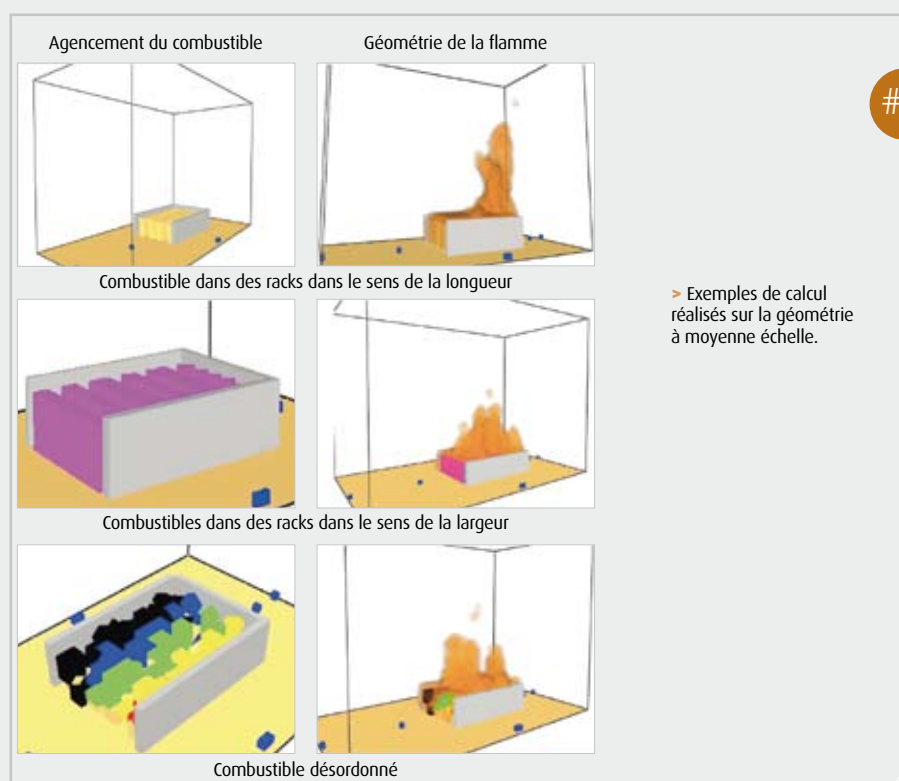
Essai n° 4

EXEMPLE DE CALCULS RÉALISÉS

Pour compléter les études paramétriques réalisées à l'aide d'essais, il est prévu de réaliser des modélisations de type CFD, en particulier sur l'influence de l'arrangement du combustible sur la géométrie des flammes. Trois cas ont été traités : deux sens de racks et un troisième cas où il est supposé que les racks se soient effondrés.

La puissance libérée par l'incendie est imposée. De fait, n'intervient plus que la ventilation du foyer sur la forme de la flamme.

Ces premiers calculs montrent de façon qualitative l'influence que peut avoir l'agencement du combustible avec notamment un recentrage de la flamme sur toute la cellule et une diminution de la hauteur de la flamme lorsque l'apport en comburant n'est pas assuré en partie basse de la cellule.



AVANCEMENT DE L'ÉTAPE 3 DÉFINITION DU CAHIER DES CHARGES POUR LES ESSAIS EN GRAND

Dans le cadre du projet FLUMilog, les essais « à grande échelle » ont pour but de vérifier l'influence de certains paramètres sur le flux émis par un feu d'entrepôt. Ceci permettra de décider de la façon de prendre en compte ces paramètres dans la méthode de calcul simplifiée des flux émis par le feu d'entrepôt.

Il faut souligner ici que ces essais seront les premiers au niveau international à être réalisés à l'échelle d'un entrepôt réel et tout en étant bien instrumentés. Ils permettront d'évaluer précisément l'influence du facteur d'échelle sur le développement du feu et sur les caractéristiques des flammes et donc sur les flux reçus dans l'environnement.

La cellule de l'entrepôt doit avoir une surface représentative des entrepôts actuels⁽¹⁾. Le choix s'est porté sur un entrepôt de 24 m sur 36 m, soit une surface au sol de 864 m². La hauteur de la cellule est de l'ordre de 10 m. Le même type de combustible sera utilisé pour tous les essais, l'influence du combustible ayant été étudiée dans le cadre des essais à moyenne échelle. Ce combustible sera choisi parmi ceux utilisés lors de ces mêmes essais.

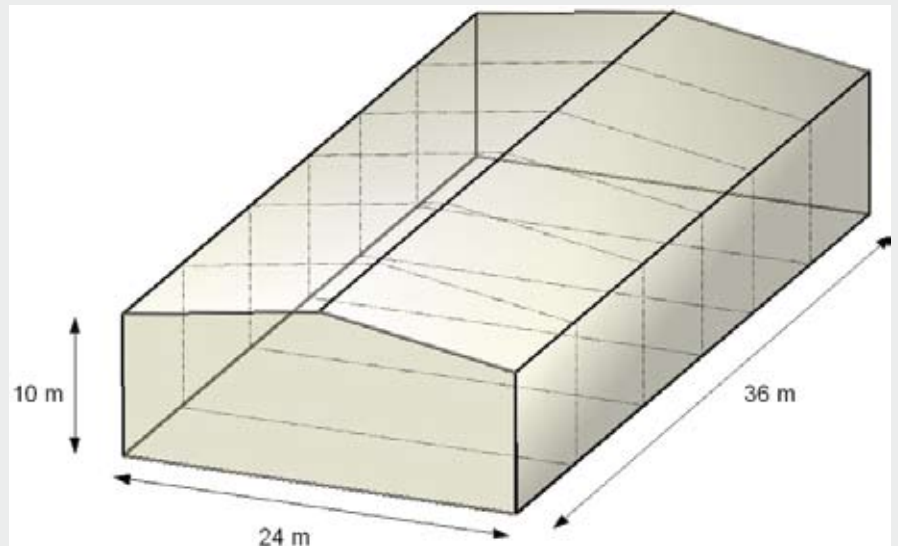
(1) C'est-à-dire supérieure à environ 500 m².

Deux des trois essais sont ainsi destinés à étudier l'effet du comportement des parois périphériques sur les flux reçus à différentes distances, ces parois périphériques seront constituées soit avec des bardages métalliques, soit avec des parois en béton. Ces essais devraient aussi permettre d'étudier le comportement des parois et leur mode de déformation éventuelle ainsi que l'apparition potentielle d'ouvertures dans les parois pour :

- D'une part, quantifier ces effets sur la ventilation du feu ;
 - D'autre part évaluer la capacité des murs à jouer le rôle d'écrans thermiques.
- Afin d'être représentatifs des entrepôts construits actuellement, deux types de structure seront testés : une structure en béton et une structure en acier. Les cellules construites seront conçues de sorte qu'au moins la structure, les parois ainsi que la toiture soient conformes à l'arrêté du 5 août 2002.

#4

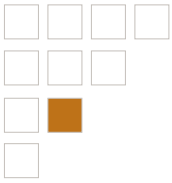
> Dimensions de l'entrepôt étudié.



■ ■ ■ SUMMARY

The FLUMILOG project is led by INERIS and aims at developing a single evaluation method of thermal effects in case of fire in a supply chain warehouse and at calculating safety distances to be kept around building. Project started in 2006 with the contribution of AFIOLOG, CNPP and CTICM - joined in 2007 by the IRSN - the supply chain industry was also associated (construction or exploitation).

The first works consisted of an inventory then a comparison of the various currently used methods. They have been followed by a complementary study of divergences points and experimental tests. Afterwards, a test campaign of 8 fires at medium scale was realised in 2007/2008. For the needs of the study, a building of 96 m² and 336 m³ was specially realised and equipped with camcorder, infrared radiance camera, radiometers, radiative fluxmeters and temperature sensors. Tests allowed to measure fire effects according to different parameters : combustible, height and methods of storage, nature of stored goods. The obtained data (geometry and sizes of flames, influence of combustible layout, thermal flows...) served as references to adjust 3D models. The developed model will be the object of test series of validation to large scale in the future experimental platform (CERTES) located in Rouvroy-les-Merles (Picardy area). These tests will be the first ones to be realised in a true warehouse specially equipped. They will allow to estimate precisely the influence of the scale factor on the fire development and more particularly radiative fluxes received in the environment.



PROCÉDÉS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

La sécurité de l'hydrogène

> LIONEL PERRETTE, OLIVIER GENTILHOMME

Dès 1873, Jules Verne écrivait dans *l'Île mystérieuse* que « l'eau employée comme combustible, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés isolément ou simultanément, fournirent une source de chaleur et de lumière inépuisable... ». Plus de deux siècles plus tard, la menace de l'épuisement des ressources fossiles, dont nous continuons pourtant à dépendre pour les 2/3 de l'énergie produite sur notre planète, et les atteintes diverses de l'environnement (notamment le rejet de CO₂ dans l'atmosphère qui participe à l'augmentation de l'effet de serre) rendent ce qui n'était qu'une prophétie à l'époque de l'écrivain une alternative énergétique de plus en plus souhaitable de nos jours.

UNE DÉMOCRATISATION DE L'USAGE DE L'HYDROGÈNE DIFFICILE...

L'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie n'est pourtant pas nouvelle. À la fin du XIX^e siècle, l'hydrogène était déjà employé comme gaz de ville où il était mélangé avec de l'oxyde de carbone mais aussi comme gaz ascensionnel pour les ballons dirigeables. Mais cette démocratisation de l'usage du gaz s'est souvent heurtée aux interrogations du grand public. Si le mélange d'hydrogène et d'oxyde de carbone a finalement été délaissé comme gaz de ville au profit du gaz naturel, c'était en raison de l'extrême toxicité de l'oxyde de carbone et non à cause de l'hydrogène. Et le public garde toujours en mémoire l'accident du ballon dirigeable *Hindenburg* en 1937, dont l'origine a été attribuée à l'hydrogène, alors que les dernières enquêtes de la NASA semblent suggérer que la cause réelle de l'incendie est liée à la nature extrêmement inflammable du vernis qui recouvrait l'enveloppe du ballon. Certes, l'hydrogène est un gaz inflammable aux propriétés singulières et doit donc, en tant que tel, être utilisé avec précaution mais il n'est pas plus dangereux que le gaz naturel... à condition de bien en connaître les risques ! Pour preuve, le secteur industriel l'utilise abon-

damment avec un niveau de sécurité exemplaire jusqu'à maintenant. L'hydrogène est devenu un composé essentiel pour les industries chimique, pétrochimique, métallurgique, pharmaceutique et alimentaire dont les besoins sont estimés à près de 50 millions de tonnes chaque année. Beaucoup plus symbolique, l'hydrogène sert aussi de carburant dans le domaine spatial : au moins 25 tonnes de ce gaz sont consommées pour propulser la fusée européenne Ariane 5 à chaque décollage.

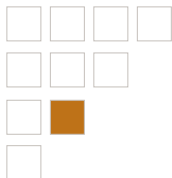
UN GAZ PARTICULIER...

L'hydrogène est un gaz sans odeur, sans couleur et sans goût. Il n'est pas toxique pour l'organisme humain mais peut présenter un risque d'anoxie en diminuant par sa présence la proportion relative d'oxygène de l'air.

La molécule d'hydrogène est volatile et diffuse très rapidement dans l'air. Dans des conditions normales de pression et de température, sa masse volumique est environ 15 fois inférieure à celle de l'air et sa vitesse de diffusion peut atteindre les 2 cm/s dans l'air. Ces propriétés sont certes bénéfiques à la dispersion d'une atmosphère explosible en milieu ouvert mais peuvent conduire à des situations critiques en milieu confiné du fait de l'aptitude du gaz à s'accumuler dans les parties hautes.

Du fait de sa structure diatomique, la molécule d'hydrogène est aussi très petite, ce qui favorise malheureusement sa propension à fuir. Dans les faits, cela se traduit de plusieurs façons :

- Pour les mêmes conditions de rejet, le débit volumique associé à une fuite accidentelle d'hydrogène est supérieur à celui des autres hydrocarbures gazeux et est donc susceptible de former des volumes inflammables plus larges (tableau 1).
- La faible taille de la molécule d'hydrogène facilite aussi sa diffusion dans les matériaux, y compris certains métaux, pourtant en bon état. Il en résulte des fuites par perméation, une fragilisation des propriétés mécaniques



#1

> Comparaison des débits de fuite
(Débits calculés pour un diamètre d'orifice de 5 mm et une pression de fuite de 50 bars dans de l'air à pression et température ambiantes)

	DÉBIT MASSIQUE EN KG/S	MASSE VOLUMIQUE EN KG/M ³	DÉBIT VOLUMIQUE EN M ³ /S
Hydrogène	0,06	0,08	0,75
Méthane	0,17	0,68	0,26
Butane	0,27	1,86	0,15

du matériau concerné voire, à terme, sa ruine. D'ailleurs, pour limiter ce risque directement lié à la pression du gaz, on se tourne de plus en plus vers les techniques de stockage basse pression i.e. les hydrures métalliques.

- Un effet de drain est également possible, se manifestant par le transport de l'hydrogène d'un milieu riche vers un milieu plus pauvre, via les câbles électriques les reliant. Cette situation peut conduire à l'accumulation d'hydrogène dans des espaces confinés et/ou non ventilés (figure 2).
- De la même manière, l'hydrogène qui est dissous dans les liquides peut ensuite s'accumuler dans des enceintes adjacentes.

Sans compter qu'à poids égal, l'hydrogène occupe beaucoup plus de volume qu'un autre gaz, ce qui constitue une contrainte importante pour le transport et le stockage. À titre d'exemple, alors qu'un réservoir de 5 l d'essence serait probablement suffisant pour qu'une voiture puisse parcourir 100 km, il lui en faudrait un d'environ 17 500 l rempli d'hydrogène sous pression atmosphérique pour parcourir la même distance. Si cet hydrogène est comprimé à 700 bars, le volume requis n'est alors que de 25 l. Cet exemple est d'autant plus frappant que l'hydrogène a pourtant l'avantage d'être trois fois plus énergétique que les vapeurs d'essence à masse identique !

La compression de l'hydrogène gazeux paraît donc indispensable pour disposer de suffisamment d'énergie à partir d'un volume de stockage qui reste raisonnable. Avec le risque inhérent qu'une défaillance de l'enveloppe de stockage puisse se

traduire par la projection de débris à des vitesses élevées du fait de la forte pression. Il existe néanmoins une alternative qui consiste à stocker l'hydrogène de façon cryogénique, c'est-à-dire sous forme liquide et à une température de - 253,2 °C. Les risques associés sont alors différents. Une exposition malencontreuse de l'hydrogène cryogénique avec une partie du corps humain peut entraîner des gelures importantes. De plus, lorsque ce fluide est réchauffé aux conditions ambiantes, son volume va croître brusquement d'un facteur 845. Si un tel produit fuit accidentellement dans un environnement clos, la pression interne peut alors atteindre plusieurs centaines de bars ce qui provoquera, sous toute vraisemblance, la destruction du confinement.

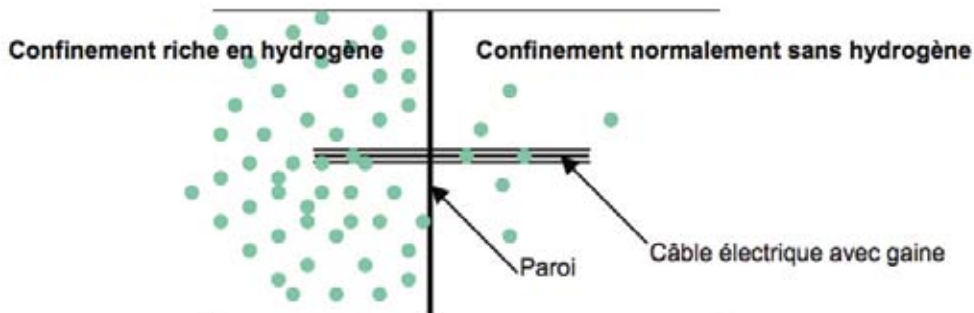
Lors de la combustion de l'hydrogène dans l'air, il n'y a pas de formation de dérivés carbonés et soufrés. Cette absence de particules constitue un intérêt du point de vue environnemental (pas de pollution) mais aussi facilite l'intervention des secours en milieu confiné (meilleure visibilité). Du fait de la réaction de l'azote contenu dans l'air avec une partie de l'oxygène, il y a néanmoins formation de faibles quantités de monoxyde ou de dioxyde d'azote, produits plus généralement regroupés sous le terme de NOx. La flamme d'hydrogène peut atteindre les 2300 °C et elle est à peine visible à l'œil nu de jour⁽¹⁾. Dès lors, un feu d'hydrogène peut ne pas être détecté malgré la présence de nombreuses personnes aux alentours et il peut ainsi se propager en toute « impunité ».

L'hydrogène possède aussi une large plage d'inflammabilité (entre 4 et 75 % vol.) mais une

(1) La flamme d'hydrogène prend néanmoins une couleur rougeâtre bien visible de nuit.

#2

> Effet de drain avec l'hydrogène.



énergie d'inflammation reste nécessaire pour initier cette réaction d'explosion du fait de sa température d'auto-inflammation relativement élevée (= 858 K). Cette quantité d'énergie nécessaire pour enflammer l'atmosphère explosible est en revanche faible, de l'ordre de 20 μ J dans les conditions stœchiométriques (soit 10 fois plus faible que les autres hydrocarbures), ce qui correspond à une très faible décharge électrostatique imperceptible pour l'homme.

L'inflammation d'une telle atmosphère peut donner lieu à une explosion. Selon la vitesse de propagation de la flamme dans le mélange non brûlé, on distingue deux régimes :

- Déflagration : dans ce cas, le front de flamme se déplace avec une vitesse de quelques centaines de m/s et la pression de crête peut atteindre 8 bars au maximum.
- Détonation : la vitesse de flamme est supérieure à 1000 m/s et la pression maximale est alors d'environ 17 bars.

Le régime de détonation est bien plus destructif que le régime de combustion. Généralement, la combustion débute en régime de déflagration puis, du fait de la turbulence induite par la présence d'obstacles, la flamme peut s'accélérer pour entrer en régime de détonation. La détonation peut également être directement initiée par une onde de détonation (explosion d'un explosif) ou par une source énergétique très vive d'au moins 10 000 J.

MALGRÉ CES PARTICULARITÉS, LA FILIÈRE HYDROGÈNE POSSÈDE UN POTENTIEL FORMIDABLE...

Le développement de la filière hydrogène repose en grande partie sur la technologie de la pile à combustible (PAC) qui consiste, très schématiquement, à combiner de l'hydrogène et de l'oxygène pour créer simultanément de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Si le principe de fonctionne-

ment de la PAC est relativement simple, sa mise en œuvre reste complexe et coûteuse. Les applications d'une telle technologie sont nombreuses et incluent :

- les micro-PAC produisant quelques kW pour alimenter les batteries du téléphone mobile, de l'ordinateur portable ou des machines-outils,
- les PAC destinées aux applications embarquées dans le secteur des transports (voiture, bus...). À noter que de tels moteurs bénéficieraient d'un rendement supérieur aux moteurs thermiques actuels.
- les PAC stationnaires suffisamment puissantes pour fournir l'électricité et la chaleur à un immeuble collectif ou à des sites isolés.

Pour que de telles applications puissent se développer pleinement dans une société respectueuse de l'environnement, il convient de relever l'un des derniers défis de la filière hydrogène, mais non le moindre, à savoir son acceptation auprès du grand public. Cette acceptation ne sera possible qu'en progressant sur l'ensemble des thématiques suivantes :

- Développement des connaissances requises pour la maîtrise des risques propres à l'usage d'hydrogène en valorisant les connaissances acquises dans le domaine industriel mais aussi en profitant des nombreux projets européens ou nationaux sur cette thématique (voir encadré sur le projet ANR DRIVE).
- Promotion de l'intégration de principes de sécurité dans la conception des nouveaux systèmes qui produisent, transportent, stockent ou utilisent de l'hydrogène.
- Contribution active au développement du contexte normatif et réglementaire qui, du fait de sa jeunesse, souffre encore de nombreux manques.
- Dissémination et partage des connaissances afin que se concrétise cette transition énergétique sûre et durable.

Projet DRIVE : étude expérimentale et numérique pour l'évaluation des risques liés à l'hydrogène

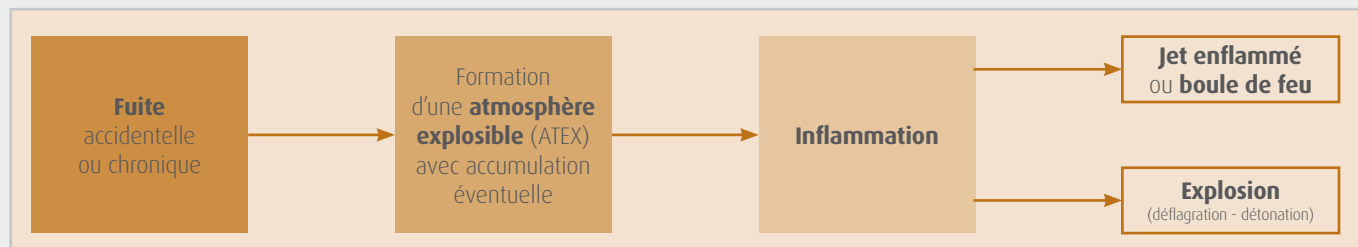


Dans le cadre du Projet DRIVE⁽²⁾ dont il assure la coordination, l'INERIS étudie, en collaboration avec le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), l'IRPHE (Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Équilibre) et PSA Peugeot Citroën, les situations de fuites propres à l'usage de l'hydrogène dans le secteur automobile.

L'objectif principal du Projet DRIVE est de produire des données expérimentales nécessaires à l'évaluation des risques des systèmes qui mettent en œuvre de l'hydrogène. Sur la base de ces données, des référentiels techniques d'aide à la quantification des risques seront établis. Ces référentiels aideront les concepteurs et les évaluateurs des risques de systèmes à hydrogène à garantir un niveau de sécurité en adéquation avec un usage par le grand public.

Les recherches portent sur l'ensemble de la chaîne accidentelle, à savoir :

- les fuites, qu'elles soient chroniques ou accidentelles,
- la formation de l'ATEX (dispersion + accumulation de l'hydrogène),
- l'inflammation (étincelle électrique, surface chaude...),
- la combustion et les effets associés (feu torche et explosion).



Les fuites d'hydrogène

On a l'habitude de distinguer trois types de fuite :

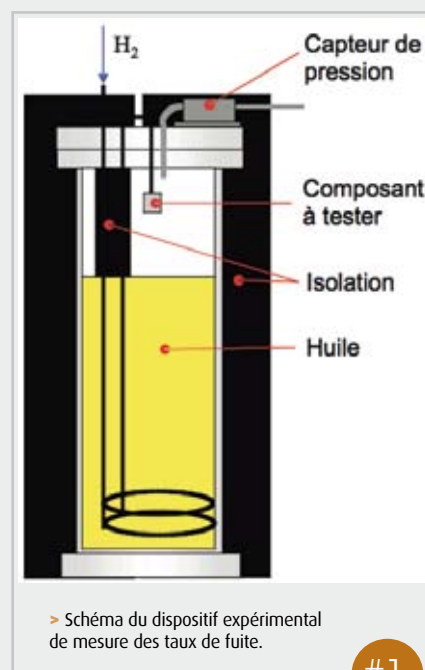
- Les fuites accidentelles : celles-ci ont pour origine une dérive du système ou la rupture d'un des organes du véhicule. Elles se traduisent souvent par des fuites massives (pouvant aller au-delà de $10^1 - 10^2 \text{ cm}^3/\text{s}$) mais sont associées à une probabilité d'occurrence faible. Des modèles de calcul existent pour ce type de fuite (notamment dans le rapport Q19 de l'INERIS).

(2) Acronyme pour Données expérimentales pour l'évaluation des Risques hydrogène, la Validation d'outils numériques et l'Édition de référentiels techniques.

- Les fuites par perméation : celles-ci sont inhérentes au système et dépendent du matériau à travers lequel l'hydrogène diffuse. Le taux de fuite est habituellement trop faible (de l'ordre de $10^{-2} - 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{s}$) pour conduire à la formation d'une ATEX. Il est aussi possible de déterminer analytiquement ces fuites.
- Les fuites intermédiaires (ou chroniques) sont beaucoup plus problématiques. Elles se caractérisent par une probabilité d'occurrence relativement importante et un taux de fuite suffisamment élevé pour générer une ATEX en milieu confiné. Il est en revanche beaucoup plus difficile de quantifier ces fuites.






Par conséquent, l'une des tâches du projet a consisté à mesurer expérimentalement les fuites chroniques issues de plusieurs composants du véhicule à l'hydrogène après que ceux-ci aient été soumis à différents traitements mécaniques (couple de serrage insuffisant, normal ou trop important, succession de montages et démontages) et/ou thermique pour simuler leur usage prolongé.

Le composant était d'abord placé dans une enceinte étanche et calorifugée, de volume total 50 l, puis ensuite pressurisé à l'aide d'hydrogène pour reproduire ses conditions d'opération. Grâce à ce dispositif, toute élévation de pression à l'intérieur de l'enceinte était directement associée à une fuite du composant dont le débit était aisément calculable. L'huile présente dans le fond de l'enceinte permettait de faire varier le volume libre autour du composant et ainsi de s'assurer que la mesure de pression était suffisamment précise et ce, quelle que soit la fuite obtenue (figure 1). Le tableau suivant donne un aperçu des résultats obtenus au cours de cette tâche.



#1

> Débits de fuite mesurés pour quelques composants

	COMPOSANT	PRESSION (BAR)	CONDITIONS DE TEST
	Obturbateur 1/2	20	- serrage normal : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) - serrage manuel : fuite de $800 \text{ cm}^3/\text{s}$ - après 20 serrages/desserrages : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$)
	Bouchon 1/2	20	- serrage normal : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) - serrage manuel : fuite de $100 \text{ cm}^3/\text{s}$ - après 20 serrages/desserrages : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$)
	Raccord 1/4	20	- serrage normal : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) - serrage forcé (+ 1/2) + serrages/desserrages : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$)
	Séparateur de phase	3	- serrage normal : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$) - après 10 serrages/desserrages : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$)
	Pompe H2	3	- serrage normal : pas de fuite détectée ($< 3 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{s}$)

Précisons que de tels résultats sont des données importantes pour les simulations de dispersion d'hydrogène qui, si l'on se réfère à la littérature actuelle, s'appuient bien souvent sur des valeurs disparates et sans lien direct avec la réalité.

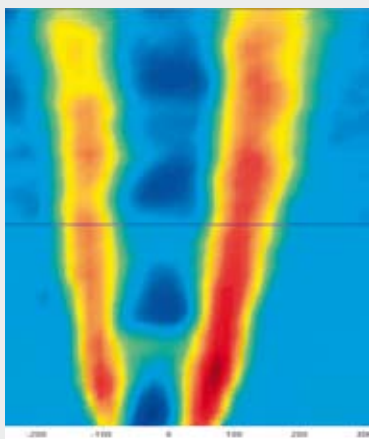
La formation d'ATEX

Outre la quantification des taux de fuites, il est important d'être en mesure d'estimer les dimensions de l'ATEX qui en résulte. Dans ce domaine, le Projet DRIVE mène actuellement deux tâches expérimentales de grande ampleur. Dans le but de simplifier la gestion de la sécurité des moyens d'essais, ceux-ci utilisent l'hélium plutôt que l'hydrogène. Cela est rendu possible du fait de la similitude de comportement entre ces deux gaz.

L'une de ces tâches fait l'objet d'une thèse à l'IRPHE. Elle vise à caractériser les

#3

> Image de l'installation garage du CEA.



> Visualisation par la technique du BOS d'un jet d'air issu d'un réservoir de 6 bars.

#2

(3) BOS : technique de mesure optique s'appuyant sur la différence de masse volumique entre le gaz rejeté et le milieu ambiant (Background Oriented Schlieren).

(4) PAC : Pile À Combustible.

(5) CFD = Computational Fluid Dynamics.

champs de concentration et de vitesse générés par une fuite supersonique d'air ou d'hélium. Les premières mesures réalisées à l'aide de la technique du BOS⁽³⁾ ont permis d'apporter des informations intéressantes sur la structure d'un jet libre issu d'un réservoir de 8 bars au maximum (photos 2). Un banc est en cours de montage à l'IRPHE permettant d'étudier des jets sous des pressions bien plus élevées : 100 voire 200 bars. Ces tests seront d'abord menés en champ libre puis avec des obstacles, dont la distance par rapport à la source pourra être variée. Il faut savoir que les données disponibles indiquent que ces jets impactants peuvent générer des nuages explosifs beaucoup plus importants que les jets libres (un rapport 10 est parfois avancé), d'où l'intérêt de ce programme expérimental. Tout au long de cette tâche, il est d'ailleurs prévu d'améliorer l'outil de calcul EXPLOJET.

La seconde tâche expérimentale est en cours d'achèvement au CEA. Elle a consisté à étudier expérimentalement la formation d'une atmosphère explosible et ses caractéristiques (volume, turbulence...) lors d'une fuite sur un véhicule PAC⁽⁴⁾ réel en stationnement dans un garage (photo 3). Ce garage est typique de ce que l'on peut trouver dans le secteur résidentiel puisqu'il est de forme parallélépipédique avec une longueur de 5,76 m, une largeur de 2,96 m et une hauteur de 2,42 m. Il est équipé d'une entrée pivotante à l'avant et d'une porte d'accès à l'arrière. Les rejets ont été menés aussi bien à l'échelle du véhicule (zone de stockage, sous caisse, sous capot moteur, habitacle) qu'à celui du garage. Différents paramètres ont été testés : la localisation de ce rejet, le débit de fuite (de quelques NL/min à 570 NL/min) et le type de fuite (diffus ou en jet).

Tous ces essais sont évidemment complétés par des simulations numériques à l'aide de plusieurs codes CFD⁽⁵⁾ (CAST3M, FLUENT et PHOENICS). Ces modélisations visent non seulement à tester l'aptitude de ces codes à prédire correctement le comportement de l'hydrogène dans des situations accidentelles mais aussi à orienter les essais. À la fin de ce projet, il est d'ailleurs prévu qu'un référentiel soit rédigé, récapitulant toutes les règles de bonne pratique pour une utilisation sûre de cet outil numérique.

L'inflammation d'hydrogène

Compte tenu de la faible énergie d'inflammation de l'hydrogène en condition stoechiométrique, le Projet DRIVE s'est aussi attaché à évaluer les risques d'inflammation d'une atmosphère explosible lors du fonctionnement de plusieurs composants du véhicule. Ceux-ci ont été choisis pour leur aptitude à devenir des sources potentielles d'inflammation en fonctionnement ou en dysfonctionnement prévisible ou bien parce que leur risque d'inflammation était difficilement prévisible. La liste finale incluait des ventilateurs, des pompes (air et eau), un capteur d'hydrogène, une électrovanne, etc.

Les composants ont été placés dans une cuve d'essai contenant deux atmosphères inflammables (d'air et d'hydrogène) différentes :

- 28 % vol. en hydrogène : cela correspond à la concentration stoechiométrique pour laquelle l'énergie d'inflammation est minimale. C'est une situation d'exposition très sévère mais peu probable.
- 10 % vol. en hydrogène : contrairement à la précédente, cette situation est beaucoup plus probable en cas de fuite d'hydrogène.

À chaque fois, les composants ont été exposés à cette atmosphère explosible pendant 10 minutes, temps jugé raisonnable pour détecter et interrompre la fuite en situation réelle. Différentes conditions ont été envisagées au cours de ces tests : une légère surtension du composant (+ 10 par rapport à la tension nominale), un cyclage de la tension (succession de mise en route et d'arrêt du composant) et une inversion des polarités (erreur de montage).

L'explosion de l'hydrogène

Au cours de cette année 2008, l'INERIS est aussi engagé dans un vaste programme visant à acquérir des données expérimentales de longueur de flamme et d'explosion pour des situations fidèles à l'application automobile. Ce programme a été scindé en 3 parties.

- La première partie s'intéresse aux effets d'un feu torche. Le protocole expérimental consiste donc à relâcher de l'hydrogène à partir d'un réservoir de type III pour une pression maximale de 900 bars et à enflammer très rapidement ce jet libre. Ces essais permettront d'obtenir une cartographie complète de la longueur de flamme et du flux rayonné pour différents diamètres d'orifice et pressions de rejet. Le principal intérêt de ces essais ne réside pas tant dans leur nature (après tout, d'autres organisations comme le HSL au Royaume-Uni ou le laboratoire Sandia aux États-Unis réalisent actuellement le même genre d'expérimentation dans le cadre du projet européen HYPER) mais plutôt dans le niveau de pression recherché (bien au-delà des 200 bars habituellement considérés). À noter que ces essais viennent juste de se terminer à l'INERIS (photo 4).
- La deuxième partie va quantifier les effets de surpressions susceptibles d'être rencontrés à bord d'un véhicule. Pour cela, une maquette transparente suffisamment représentative de la géométrie sous le capot moteur d'un véhicule à hydrogène a été réalisée à partir de plexiglas, permettant ainsi de visualiser la propagation des flammes autour des obstacles. En effet, lors d'une explosion, les effets de surpression sont directement liés à l'accélération de la flamme dans la géométrie considérée et il est donc primordial de bien comprendre son interaction avec d'autres paramètres tels que la taille et la localisation des obstacles (blocage volumique), la position de la fuite, le délai d'inflammation...



#4

> Essais de feu torche, réalisés à l'INERIS.

- La phase finale du volet expérimental permettra de procéder à des essais d'explosion, non plus dans la maquette transparente mais dans le véhicule lui-même, ayant servi aux essais du garage CEA.

Des activités de modélisation seront aussi effectuées en complément de ces essais pour mettre à l'épreuve les codes de calcul sur cet aspect explosion et valider les résultats expérimentaux.

Conclusion

Avant d'envisager un usage généralisé de l'hydrogène comme carburant pour les véhicules, il est essentiel que l'ensemble des risques associés à un tel gaz soit parfaitement maîtrisé. Comme toute technologie émergente, les données se font rares en la matière. Les évaluations des risques présentés par les véhicules à hydrogène conduisent donc à surdimensionner les systèmes de sécurité afin de garantir un fonctionnement sûr.

Le Projet DRIVE constitue une première réponse à ce besoin de quantification des risques et d'optimisation des systèmes de sécurité en apportant des données expérimentales et numériques sur l'ensemble de la chaîne accidentelle impliquant l'utilisation de l'hydrogène sur un véhicule à hydrogène.

[RÉFÉRENCES

Perrette L., Paillère H. et Joncquet G., 2006. *Presentation of the French national project DRIVE: Experimental Data for the Evaluation of hydrogen Risks onboard vehicles, the validation of numerical tools and the Edition of guidelines*. World Hydrogen Energy Conference (WHEC), Lyon 2006.

Perrette L., Paillère H. et Joncquet G., 2007. *Presentation of the French national project DRIVE: Experimental Data for the Evaluation of hydrogen Risks onboard vehicles, the validation of numerical tools and the Edition of guideline*. Society of Automotive Engineer (SAE), Detroit 2007.

Gentilhomme O., Tkatschenko I., Joncquet G. et Anselmet F., 2008. *First results of the French national project DRIVE: Experimental Data for the Evaluation of hydrogen Risks onboard vehicles, the validation of numerical tools and the Edition of guidelines*. World Hydrogen Energy Conference (WHEC), Brisbane 2008.

Dubois J., Amielh M., Anselmet F. et Gentilhomme O., 2008. *Comparative Investigation of axisymmetric underexpanded air and helium jets by BOS*. International Symposium on Flow Visualisation (ISFV), Nice 2008.

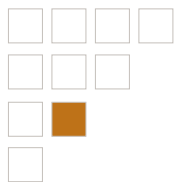
Bonnet P., Couillet J.C., *Détermination des grandeurs caractéristiques du terme source nécessaire à l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique des rejets accidentels*. Rapport Omega 19, disponible sur [www.ineris.fr].

□ □ ■ SUMMARY

The ever-increasing use of hydrogen in the transport sector requires very high safety standards. However, due to the lack of information regarding the safety level of hydrogen systems, risk assessments tend to be over cautious in determining the consequences of accidental releases and could impose restrictive technical regulations.

This drove the National Institute of Industrial Environment and Risks (INERIS) along with the French Atomic Energy Commission (CEA), the French automotive manufacturer PSA PEUGEOT CITROËN and the Research Institute on Unstable Phenomena (IRPHE) to submit with success a project called DRIVE (Experimental Data for the Evaluation of Hydrogen Risks, for the validation of numerical tools and for the Edition of guidelines) to the National Research Agency in June 2005.

This project aims at providing quantitative experimental data for automotive applications to strengthen the risk assessments. The work program of DRIVE covers all aspects of the accidental chain: hydrogen releases, formation of an explosive atmosphere (ATEX), ignition of the ATEX, flame propagation and its consequences. State-of-the-art risk assessment and mitigation techniques are also considered within this project.



PROCÉDÉS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

Développement d'une méthodologie pour la conduite en sécurité d'un réacteur continu et intensifié

> WASSILA BENAÏSSA, DOUGLAS CARSON, MICHEL DEMISSY

De nombreux accidents industriels ont été provoqués par des réactions dont la mise en œuvre n'a pas été contrôlée : emballement thermique, réaction secondaire non contrôlée... Les conséquences de tels accidents sont souvent importantes dans la mesure où une réaction chimique non désirée ou non contrôlée est susceptible, suivant les réactifs mis en œuvre, de donner matière à la fois à une explosion et à l'émission de produits toxiques ou inflammables dans l'environnement. Parmi les causes identifiées d'accident, la plupart sont imputables à un défaut de conception ou de fonctionnement des installations et des procédés de fabrication.

L'outil principal pour la mise en œuvre de synthèses chimiques dans le domaine de la chimie fine ou pharmaceutique reste aujourd'hui encore le réacteur discontinu. Ces réacteurs, même s'ils offrent les caractéristiques de flexibilité et de polyvalence requises, présentent un certain nombre de limitations technologiques. En particulier, les mauvaises conditions d'évacuation de la chaleur dégagée par les réactions chimiques posent un grave problème de sécurité.

Une alternative à l'utilisation de ces réacteurs discontinus commence à se dessiner du fait de l'évolution récente des mini/micro technologies. L'idée consiste à transposer les réactions dans des réacteurs de type piston continu avec une intensification du procédé de synthèse chimique afin d'obtenir, par exemple, une meilleure maîtrise des échanges thermiques. Quelques appareils répondant à ces caractéristiques ont vu le jour. Du fait de leur caractère innovant, la mise en service de ces réacteurs nécessite le développement d'outils spécifiques dans les domaines du contrôle,

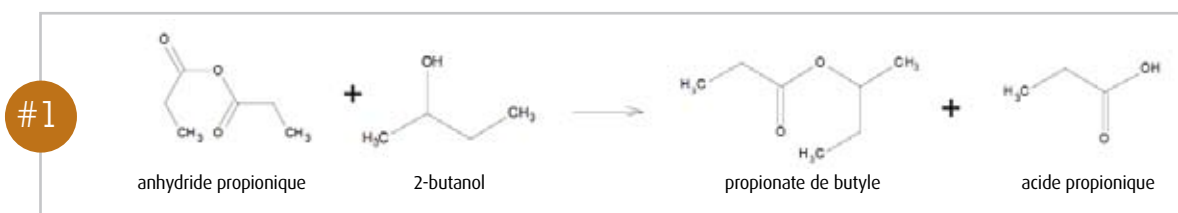
de la simulation, mais également de la sécurité. En effet, même si ces nouvelles technologies sont, par leur conception, intrinsèquement plus sûres, il n'existe pas de méthode pour évaluer cette propriété.

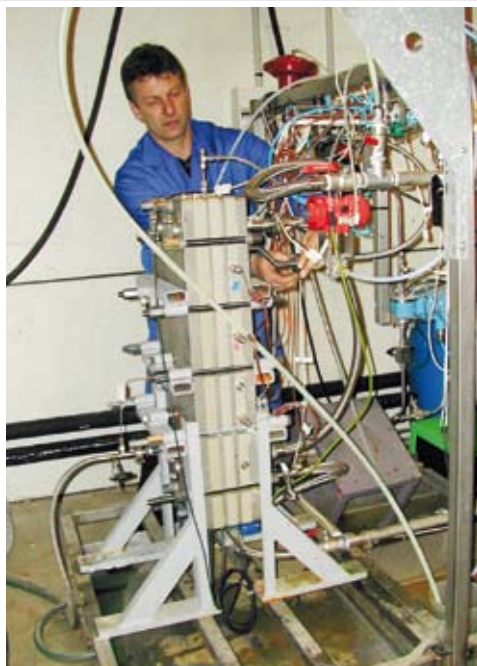
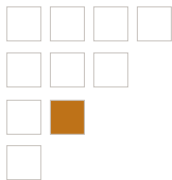
Les travaux menés en étroite collaboration avec le Laboratoire de Génie des Procédés de Toulouse et le CNRS ont eu pour objectif de développer une méthodologie d'étude de sécurité pour la mise en œuvre et la conduite de réactions exothermiques susceptibles de provoquer un emballement dans un réacteur de type continu intensifié. Les partenaires se sont également attachés à proposer des outils permettant de qualifier un éventuel caractère intrinsèquement plus sûr de ces appareils comparativement à des réacteurs discontinus. Pour ce faire, une réaction d'étude et un pilote de « réacteur/échangeur » ont été choisis comme cas d'étude et de démonstration. La démarche s'articule alors autour de trois points clés : la caractérisation de la réaction chimique, la transposition de cette synthèse dans le réacteur continu intensifié en fonctionnement normal et, enfin, l'étude du fonctionnement du réacteur en mode dégradé.

RÉACTION D'ÉTUDE : ESTÉRIFICATION DE L'ANHYDRIDE PROPIONIQUE PAR LE 2-BUTANOL

La réaction de l'anhydride propionique par le 2-butanol conduit à la formation de propionate de butyle et d'acide propionique (figure 1).

La réaction d'estérification de l'anhydride propionique par le 2-butanol est largement citée dans la littérature spécialisée dans les études de sécurité.





> OPR Alfa Laval Vicarb (LGC, 2005).

#2

tionique par le 2-butanol constitue un système thermo-cinétique particulièrement adapté dans le cadre de l'application de la démarche d'évaluation et de prédiction du risque d'emballement thermique. Elle permet, en outre, de disposer d'un certain nombre de références pour faire un parallèle entre les résultats issus des études menées en mode batch et ceux obtenus en mode continu. De plus, son protocole opératoire est relativement simple et rapidement transposable pour une conduite en réacteur continu.

PILOTE D'ÉTUDE : L'OPEN PLATE REACTOR (OPR)

STRUCTURE GÉNÉRALE

L'Open Plate Reactor (OPR) est un nouveau concept de réacteur intensifié, à la fois multifonctionnel, continu et de taille réduite. En effet, il cumule les fonctionnalités d'un échangeur de chaleur et celles d'un réacteur de synthèse chimique, présente un volume réactionnel réduit de l'ordre du litre et permet une circulation en continu des fluides en son sein. Sur la photo 2, on peut observer le « réacteur/échangeur » placé sur son socle ainsi qu'une partie du dispositif expérimental associé. L'OPR s'apparente à un parallélépipède de 80 cm de longueur, 40 cm de largeur et 15 cm d'épaisseur.

L'OPR est conçu selon une structure modulaire par blocs de type échangeur à plaques. Chaque bloc est constitué d'une plaque permettant l'écoulement des réactifs, catalyseurs et produits (zone de réaction) comprise entre deux plaques contenant le fluide utilité (zone de refroidissement ou de chauffage). La figure 3 décrit le principe de fonctionnement de l'appareil pour un pilote constitué d'un seul bloc.

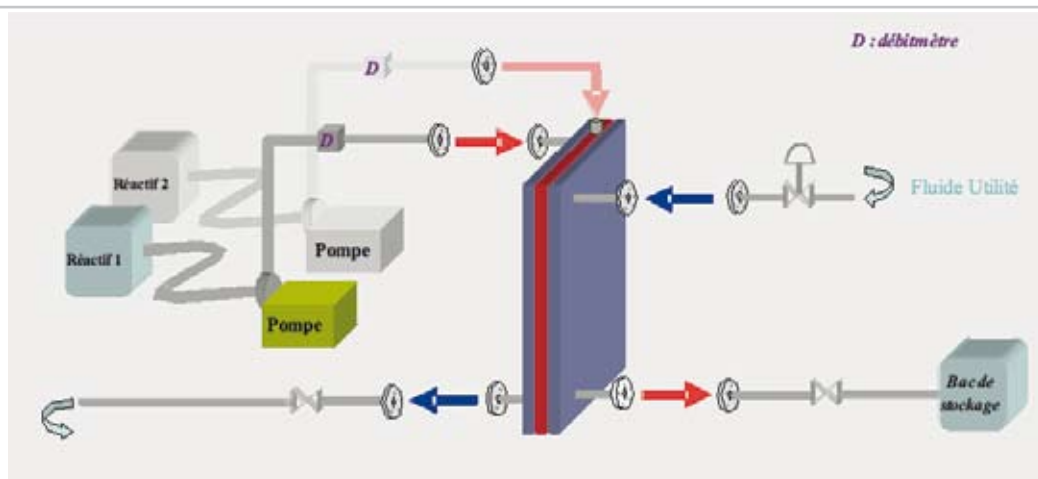
Elle possède un certain nombre d'avantages qui en font un cas d'étude particulièrement intéressant :

- La réaction s'effectue en milieu homogène^[1].
- Elle est fortement exothermique ($\Delta H_r = -8.104 \text{ kJ.kmol}^{-1}$)^[2].
- Il existe un modèle cinétique^[3].
- Il s'agit d'une réaction relativement simple, dont certaines données thermodynamiques sont accessibles^[1].
- Le système réactionnel met en jeu des réactifs et des produits dont les propriétés physico-chimiques sont disponibles^[1].
- La vitesse de réaction est du second ordre en l'absence d'acide fort (premier ordre vis-à-vis de chaque réactif) et de type autocatalysée en présence d'acide sulfurique^[2].

La réaction d'estérification de l'anhydride pro-

#3

> Principe de fonctionnement d'un « réacteur/échangeur » OPR constitué d'un bloc.



MODÉLISATION

En complément de la campagne de recherche visant à caractériser expérimentalement le comportement de l'OPR, un outil de simulation a été développé afin de pouvoir tester les potentialités offertes par l'appareil. Cet outil, appelé « Data Processing Tool » (DPT) a pour objectif de prédire le comportement d'un réacteur OPR uniquement en fonction des conditions opératoires. Il intervient donc à la fois dans les études préliminaires à la mise en œuvre d'une nouvelle réaction dans le « réacteur/échangeur » mais également dans la phase de post-traitement : en effet, après validation du modèle pour une réaction donnée, ce programme permet de simuler un nombre important de conditions opératoires. Ceci peut s'avérer confortable dans le cas où l'on envisage d'étudier la réponse du système à des situations potentiellement dangereuses ou des déviations par rapport à une conduite normale du procédé.

Afin d'atteindre ces objectifs, la description mathématique du « réacteur/échangeur », intervenant dans la modélisation, a été conçue pour être aussi proche que possible de la réalité. Elle intègre non seulement une description précise de sa géométrie mais tient également compte de l'inertie thermique engendrée par les éléments de la structure comme les inserts en PEEK ou les plaques de transition et de fermeture. En outre, le programme fait appel à de nombreux modèles permettant d'intégrer les phénomènes hydrodynamiques, de

réaction, de transfert thermique et de pertes de charge au sein de l'OPR.

MISE EN ŒUVRE EXPÉRIMENTALE

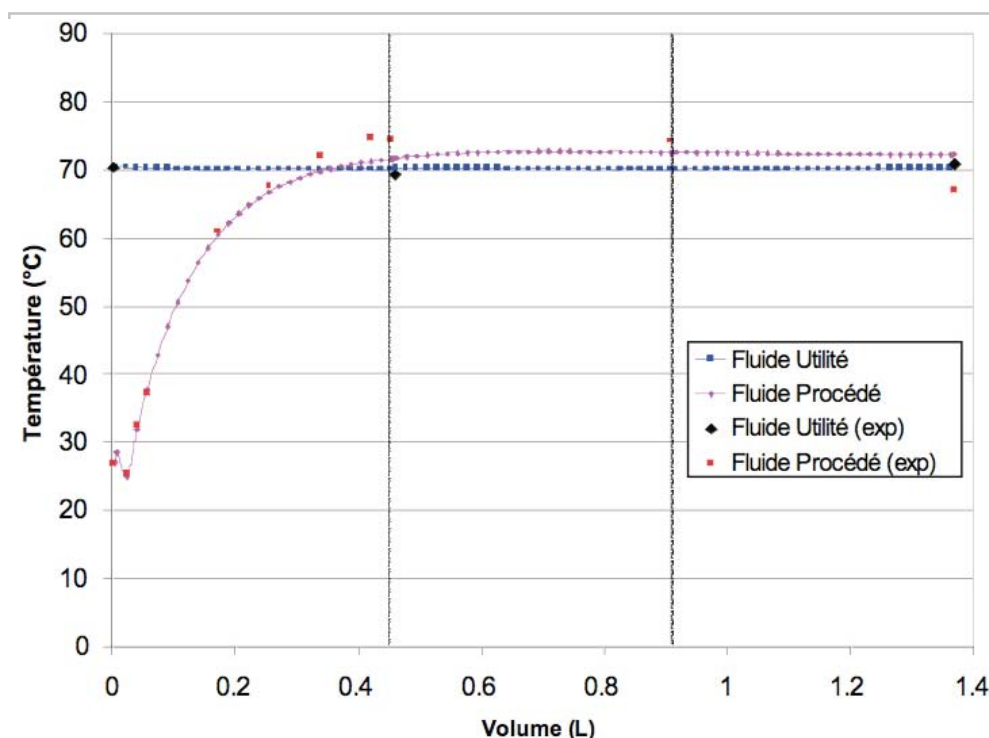
À l'issue d'une longue phase préparatoire, la réaction d'étude a été mise en œuvre dans l'OPR. La figure 4 présente le résultat d'une expérience réalisée à 70 °C, pour une concentration de catalyseur de 0,4 % et un débit total de réactifs de 50 L.h⁻¹. Un certain nombre de thermocouples disposés sur l'OPR permettent d'enregistrer les niveaux de température côtés procédé et utilité. Les profils expérimentaux sont alors comparés aux résultats de simulation. Cette étape de l'étude a permis de proposer et de formaliser un certain nombre d'étapes à suivre pour la mise en œuvre d'une réaction dans un réacteur continu intensifié. La faisabilité de l'appareil a pu être démontrée et le simulateur validé.

ÉVALUATION DU CARACTÈRE INTRINSÈQUEMENT PLUS SÛR DE L'OPR

Bien que la faisabilité du « réacteur/échangeur » OPR en fonctionnement normal ait été démontrée, il reste des questions primordiales : il est certes possible de connaître le fonctionnement normal mais qu'advierait-il en cas de dérive du procédé ? L'inertie thermique du réacteur réussirait-elle à dissiper l'énergie dégagée par la réaction ? Si oui, en quelles proportions ? Quel

[RÉFÉRENCES

- [1] Benuzzi A., Zaldivar J.M., 1991. *Safety of chemical batch reactors and storage tanks*. Ed. Kluwer Academic Publishers.
- [2] Felio J.A., Iban G., Alos M.A, et Macias-Hernandez JJ, December 2003. *Match your process constraints using dynamic simulation*. Chemical Engineering Progress, 42-48.
- [3] Ubrich O., Srinivasan B., Lerena P, Bonvin D., Stoessel F., 1999. *Optimal feed profile for a second order reaction in a semi-batch reactor under safety constraints: Experimental studies*. Journal of Loss Prevention Process Ind., 12, 485-493.

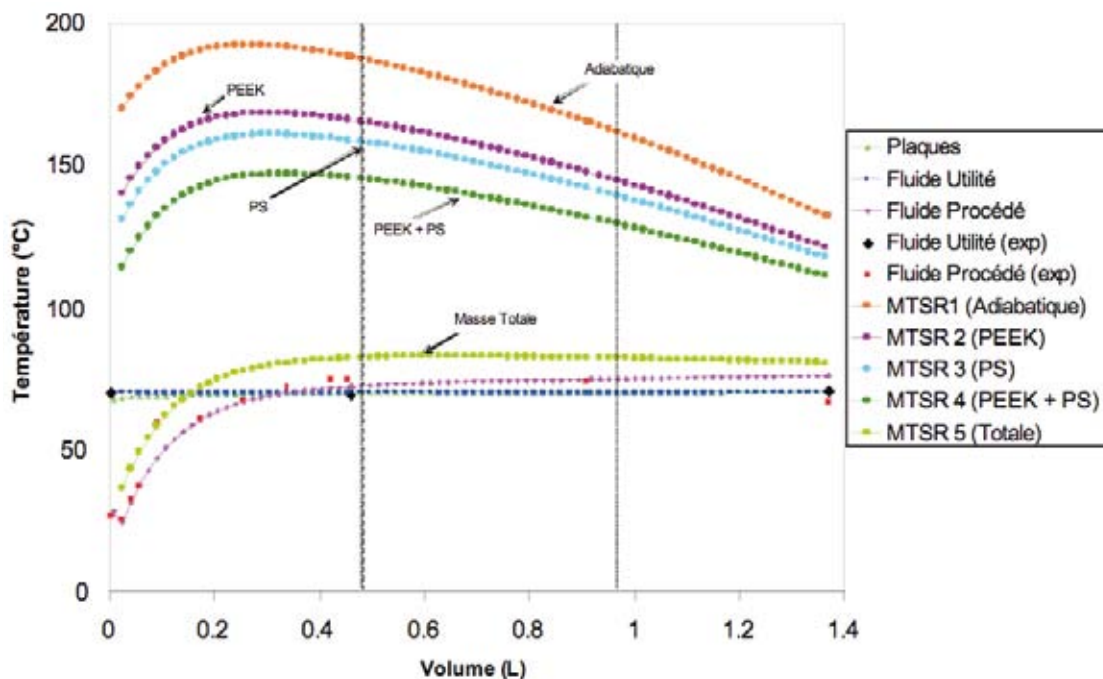


> Profils de température dans l'OPR pour la réaction d'estérification : Expérience n°1 (50 L.h⁻¹ ; 70 °C ; 0,4 %).

#4

#5

> Calcul de l'élévation de température dans le fluide procédé en prenant en compte l'inertie thermique de l'OPR.



serait alors le temps d'action avant d'observer un emballement thermique dans l'appareil ? Pour répondre à ces questions, il convient, dans un premier temps, de lister les dérives d'un tel dispositif. Les conclusions antérieures d'une analyse HAZOP ont déjà mis en lumière des scénarios à risque. Parmi eux, il ressort un cas particulier de dysfonctionnement pour lequel les éventuelles conséquences n'ont pas été clairement identifiées : l'arrêt simultané de circulation des deux fluides utilité et procédé. Afin de déterminer les conséquences d'une telle dérive, une approche analytique est proposée. En fonctionnement normal, la ligne réactionnelle est modélisée par une succession de bacs parfaitement agités, assimilés à des réacteurs discontinus. En cas d'arrêt des fluides, l'élévation de température est évaluée en calculant pour chacun de ces réacteurs l'élévation de température adiabatique :

$$\Delta T_{ad} = \frac{\Delta H_r}{C_p}$$

Or, l'OPR dispose d'une caractéristique remarquable, il est constitué d'une succession de plaques de différentes natures. En effet, l'environnement thermique de chaque bac est constitué par :

- le PEEK, matériau de fabrication des plaques de réaction,
- l'acier inoxydable des plaques sandwich,
- la zone où est contenu le fluide caloporteur,
- l'acier inoxydable des plaques de transition.

Une partie de l'énergie dégagée par la réaction au sein de chaque bac peut donc être absorbée par cette masse. L'OPR dispose d'une inertie thermique beaucoup plus importante que celle d'un réacteur discontinu dans lequel la masse du milieu réactionnel est beaucoup plus importante que la masse du réacteur lui-même. Ainsi, l'élévation de température adiabatique doit être réévaluée en prenant en compte la masse des différents éléments de l'OPR :

$$\Delta T_{ad\,inertie} = \frac{\Delta H_r}{C_{p_r} \cdot M_{opr}}$$

La figure 5 présente les profils d'élévation de température obtenus selon les différentes hypothèses suivantes :

- l'énergie est dissipée dans les éléments en PEEK (hypothèse n°2),
- l'énergie est dissipée dans les plaques sandwich en acier inoxydable (hypothèse n°3),
- l'énergie est dissipée à la fois dans les éléments en PEEK et dans les plaques sandwich en acier inoxydable (hypothèse n°4),
- l'énergie est dissipée dans la masse totale du réacteur (hypothèse n°5).

La prise en compte de la masse du réacteur entraîne une diminution de la température maximale atteinte par le milieu réactionnel en cas de dérive.

L'inertie thermique du « réacteur/échangeur » confère donc à l'appareil un caractère intrinsèquement plus sûr.

Le Projet IMPULSE

Depuis 2003, le Projet européen IMPULSE, réunissant 20 partenaires universitaires et industriels de 7 pays, constitue l'un des projets phares du secteur « chimie » du 6^e PCRDT (Programme Cadre de Recherche et Développement Technologique) de l'Union Européenne. Le projet IMPULSE repose sur la mise en pratique de deux principes :

- l'intensification des procédés : réduire de manière significative la taille d'un procédé tout en conservant la même capacité de production,
- la miniaturisation : faire mieux en plus petit, plus compact, plus précis.

Pour y parvenir, le Projet IMPULSE propose d'équiper les systèmes de production chimique avec des microréacteurs, le but étant d'obtenir des équipements multiéchelles plus performants en termes de qualité, d'efficacité et de sécurité. L'intégration de ces microtechnologies dans des procédés macro plus « traditionnels » pose cependant de nouvelles problématiques. En particulier, même si ces microréacteurs sont souvent considérés comme intrinsèquement plus sûrs, car ils contribuent à réduire le volume de produit chimique mis en jeu, il n'existe actuellement aucune méthode formalisée et reconnue permettant d'évaluer le niveau de sécurité de ces nouvelles installations. En outre, des difficultés nouvelles, liées à l'hydrodynamique et aux problèmes de blocage dans les microcanaux, à l'interconnexion entre équipements macro/micro, ne sont pas couvertes par les méthodes d'analyse couramment utilisées aujourd'hui. Ainsi, un sous-groupe de travail a précisément pour mission de développer de nouvelles méthodes et outils pour l'analyse, l'évaluation et la maîtrise des risques accidentels induits par l'intensification des procédés chimiques. L'INERIS est fortement investi dans cette réflexion à laquelle il apporte son expertise dans les domaines de la sécurité des procédés et de l'analyse des risques. L'action de l'INERIS réside principalement dans la mise au point d'une méthode d'analyse de risque de type HAZOP-like applicable aux microréacteurs. Pour cela, un système d'étude générique a été défini, un tableau de type HAZOP a été construit pour donner les questionnements types associés à la démarche d'analyse de risque sur un microréacteur. Il est prévu que ce tableau soit appliqué sur des cas industriels concrets.

□ □ ■ SUMMARY

Today, the chemical industry has to deal with new challenges. In addition to produce more and faster, safer and cleaner production must be performed. Process intensification can be considered as a method that allows to prevent and reduce risks related to major industrial accidents. Indeed significant progress has been reached in the development of new reactor technologies: today, miniaturised and continuous processes are being developed to attain better heat transfer and safer conditions compared to traditional batch or semi-batch operations. These performances authorise to modify operating conditions by employing higher concentrations and using less solvent and reaction volumes. In this field, new prototypes of "heat-exchanger/reactors" are a good illustration: built like a plate heat-exchanger, internal plates are designed in order to carry out chemical synthesis. But these new concepts of reactor design being less familiar than traditional ones, research work is necessary not only to assess their feasibility and potentialities but also to evaluate their efficiency and intrinsic characteristics. The aim of the study, sponsored by CNRS and INERIS, was therefore to develop a methodology in order to carry out safely an exothermic reaction in an intensified continuous reactor. It was established on a case study: the transposition of the esterification between propionic anhydride and 2-butanol in a new prototype of heat-exchanger/reactor, called Open Plate Reactor and developed by Alfa Laval. The approach was divided in three steps. In a first part, experimental data obtained by calorimetry allow to determine the potential hazard of the compounds as well as the reaction and a kinetic model is validated. In a second stage a dedicated software model is used to calculate optimal operating conditions for safe control. Experiments are then achieved to test these conditions. In the last step, the inherently safer behaviour of the reactor is evaluated in the case of probable malfunctions (fluids shutdown) due to the thermal inertia of the apparatus. Finally, the evolution of the temperature profiles is obtained by dynamic simulation. To complete this approach, INERIS has been involved since 2003, in the IMPULSE project, and works with several partners in order to develop a new risk analysis methodology dedicated to microreactor, intensified process and multiscale equipments.

[RÉFÉRENCES

Benaïssa W., Gabas N., Cabassud M., Demissy M., Carson D. *Étude d'une réaction exothermique en vue de sa mise en œuvre dans un réacteur continu et intensifié*. Société Française de Génie des Procédés. Le génie des procédés vers de nouveaux espaces : actes du 10^e congrès de la SFGP, 20-22 septembre 2005, Toulouse. Paris : SFGP, 2005. (Récents progrès en génie des procédés) [CD-ROM] [2]

Benaïssa W., Elgues S., Gabas N., Carson D., Demissy M. *Transposition of an exothermic reaction to a continuous intensified reactor*. Proceedings of the 6th International conference on process intensification, 27-29 September 2005, Delft, The Netherlands, pp. 69-77.

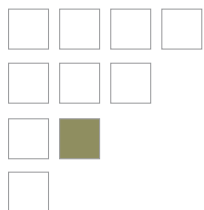
Benaïssa W. *Développement d'une méthodologie pour la conduite en sécurité d'un réacteur continu et intensifié*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. Présentée et soutenue publiquement le 7 décembre 2006.

Benaïssa W., Elgue S., Gabas N., Cabassud M., Carson D., Demissy M. *Thermal consequences of process deviations for a continuous intensified reactor*, 1st International conference of green process Engineering, 24-26 avril 2007, Toulouse. [Communication orale].

Benaïssa W., Elgue S., Gabas N., Cabassud M., Carson D., Demissy M. *Safety methodology for the operation of a continuous intensified reactor*. Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

Benaïssa W., Gabas N., Cabassud M., Demissy M., Carson D. *Étude du comportement dynamique d'un réacteur/échangeur continu lors d'une dérive de fonctionnement*. Société Française de Génie des Procédés. Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP, 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].

Benaïssa W., Gabas N., Cabassud M., Carson D., Elgue S., Demissy M., 2008. *Evaluation of an intensified continuous heat-exchanger reactor for inherently safer characteristics*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 21, pp. 528- 536.



RISQUES LIÉS À L'APRÈS-MINE, AUX STOCKAGES SOUTERRAINS ET RISQUES NATURELS

- Mieux connaître les lois de comportement et les couplages régissant l'évolution à long terme des ouvrages souterrains et des massifs rocheux, pour développer des méthodes de surveillance et d'alerte, et évaluer les aléas et les dangers.
- Développer des méthodes d'évaluation des aléas liés aux ouvrages souterrains abandonnés, de leurs conséquences éventuelles sur les installations de surface et des risques encourus par les populations.
- Évaluer la pertinence, la robustesse et la durabilité d'installations souterraines pour stocker ou séquestrer des produits (hydrocarbures, CO₂, déchets), notamment dans l'hypothèse d'aléas climatiques.

Captage, transport et stockage du CO₂

L'intégration du captage, du transport et du stockage du CO₂ progresse à grands pas, comme en atteste la construction prochaine de démonstrateurs ou d'installations pilotes. Un important travail est nécessaire pour identifier les processus et phénomènes qui pourraient entraîner la survenue de risques pour l'environnement et la population générale, et constituer ainsi une vision globale des dangers et des risques liés à la filière. L'INERIS s'efforce d'y contribuer, notamment sur le volet sanitaire et environnemental, où la prise en compte de phénomènes à dynamique lente en milieu géologique nécessite de développer des recherches spécifiques. De plus, des effets géochimiques complexes, liés à la grande réactivité du CO₂ et de certains gaz annexes co-injectés restent encore à élucider. Le volet captage et transport, beaucoup plus proche des activités industrielles classiques, est analysé à la lumière des méthodes les plus récentes d'évaluation et de prévention des risques industriels. L'INERIS contribue ainsi à trois objectifs :

- poser les questions scientifiques et opérationnelles pertinentes relatives à la démonstration de la sécurité à long terme, et dans ses domaines de compétences, développer des programmes de Recherche et Développement pour répondre à ces questions, notamment en matière de surveillance ;
- aider à la mise en place de méthodologies d'évaluation des risques, permettant l'encadrement réglementaire qui est nécessaire au développement « durable » de nouvelles filières technologiques ;
- contribuer à la mise en relation des parties prenantes et à la bonne prise en compte des questions.

→ TÉMOIGNAGE

Quelques questions posées par les ONG et associations

Sur quels critères s'opèrera le choix des sites de stockage ? Une implantation à proximité des zones à forte densité urbaine est-elle probable ? Et si oui, quels contrôles seront exercés afin de limiter le risque pour les populations de devoir supporter les conséquences dommageables d'une fuite soudaine ou progressive ? Comment s'assurer que le gaz restera confiné de manière efficace, stable et durable sans craindre un risque de contamination des nappes phréatiques ? Voici quelques-unes des interrogations soulevées par les représentants d'associations de riverains et de défense de l'environnement et de la santé, lors d'une réunion d'échanges organisée par l'INERIS en septembre 2008. Destinée à présenter les résultats de ses travaux sur les méthodes de surveillance des gaz, appliquée à la problématique du stockage du CO₂, cette rencontre constituait la septième d'un cycle de réunions/débats avec les ONG et les associations, institué en 2008 par l'INERIS. Elle répondait à la volonté d'orienter la réflexion et l'action collective en prenant toute la mesure des préoccupations et des attentes des citoyens concernant les technologies émergentes du captage/stockage du CO₂. En effet, après un enthousiasme initial suivant la prise de conscience de l'évolution inéluctable du climat sous forçage anthropique, on assiste maintenant à une levée de boucliers fort prévisible dès que l'on passe à une phase concrète où il s'agit de développer des tests *in situ* par des pilotes ou des installations de démonstration. Le syndrome « NIMBY » (Not In My BackYard), bien connu, se développe et a pris une ampleur importante à l'été 2008, qui a vu l'opposition d'associations locales se radicaliser face aux projets en cours. On assiste à deux types de réactions. Certaines ONG recourent à une stratégie d'évitement, en condamnant par principe l'option CCS*, qui selon elles, permettrait de continuer à dépenser une énergie liée à des combustibles fossiles, en négligeant les économies d'énergie et le recours aux énergies renouvelables. D'autres, s'inquiètent d'éventuels effets néfastes sur la santé et la contamination des écosystèmes. Ces réactions montrent à quel point le dialogue est primordial pour s'accorder sur les efforts qui restent à consentir afin de démontrer la viabilité de la filière CCS et d'en garantir la sécurité.

* Carbon Capture and Sequestration.



Capture, transport and storage of CO₂...

Integration of the capture, transport and storage of CO₂ is making great strides, as shown by the impending construction of demonstrators and pilot facilities. Significant work is needed to identify the processes and phenomena which may cause the occurrence of risks for the environment and the general population, and thereby to form an overall view of the dangers and risks related to the activity. INERIS is endeavoring to contribute to this, in particular in the health and environmental area, where taking slow dynamic phenomena in geological mediums into account requires the development of specific research. Moreover, complex geochemical effects related to the large reactivity of CO₂ and certain co-injected related gases remain to be illuminated. The capture and transport aspect, which is much closer to traditional industrial activities, is analyzed in light of the most recent industrial risk assessment and prevention methods. INERIS is thus contributing to three objectives:

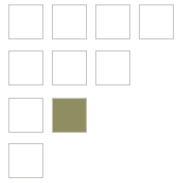
- ask relevant scientific and operational questions related to the demonstration of long-term safety, and within its skill areas, develop Research and Development programs to answer these questions, in particular related to surveillance;
- help establish risk evaluation methodologies, allowing the regulatory framing which is necessary for the "sustainable" development of new technological channels;
- contribute to bringing stakeholders together and to proper consideration of questions.

→ TESTIMONY

Some questions asked by NGOs and associations

What criteria are used to choose storage sites? Is a facility likely to be established near areas with a high urban density? and if so, what checks will be performed in order to limit the risk for populations of having to bear the harmful consequences of a sudden or gradual leak? How can we ensure that gas will remain confined in an effective, stable and lasting manner without fear of risk of contamination of the water tables? These are some of the questions raised by the representatives of resident and environmental and health protection associations during a meeting organized by INERIS in September 2008. This meeting, which was intended to present the results of its work on gas surveillance methods applied to the issue of CO₂ storage, was the seventh in a series of meetings/discussions with NGOs and associations established in 2008 by INERIS. It answered the desire to orient reflection and collective action by fully assessing citizens' concerns and expectations regarding emerging CO₂ capture/storage technologies. Indeed, after an initial enthusiasm followed by awareness of the inescapable evolution of the climate under anthropogenic forcing, we are now seeing a strong call to arms, which is to be expected when entering a concrete phase for developing in situ tests by pilot or demonstration facilities. The well-known "NIMBY" (Not In My BackYard) syndrome is developing and gained significant magnitude in the summer of 2008, when the opposition of local associations became more radical in the face of projects in progress. We are seeing two types of reactions. Some NGOs are using an avoidance strategy, condemning the CCS option on principle; in their opinion, this option would make it possible to continue spending fossil fuel energy, while neglecting energy savings and the use of renewable energies. Others are worried about possible harmful effects on health and contamination of ecosystems. These reactions show the extent to which dialogue is crucial to reach an agreement on the efforts which remain to be made in order to demonstrate the viability of the CCS activity and ensure its safety.





Développement d'une méthodologie de modélisation de l'endommagement du recouvrement des cavités dans le sel

> **DIEGO MERCERAT, MOUNTAKA SOULEY, LYNDY DRIAD-LEBEAU**

L'INERIS instrumente depuis 2005, dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique GISOS, une cavité saline en exploitation dans le bassin salifère lorrain. Le site d'expérimentation se situe à l'intérieur du périmètre de la concession minière de Cerville-Buissoncourt appartenant à la société SOLVAY. Il s'agit de mettre à profit l'occasion unique, offerte par l'évolution d'une grande cavité souterraine jusqu'à son effondrement provoqué volontairement (partie intégrante de la méthode d'exploitation), pour valider, en vraie grandeur, différentes techniques d'auscultation et de surveillance, employées par l'INERIS et d'autres partenaires du GISOS.

Le suivi de l'effondrement de la cavité de Cerville-Buissoncourt, opérationnel depuis 2005, entre actuellement dans sa phase ultime. En effet, plusieurs crises microsismiques importantes ont eu lieu depuis le mois de mars 2008. Ces crises ont pu être parfaitement corrélées avec des variations du niveau de saumure dans la cavité.

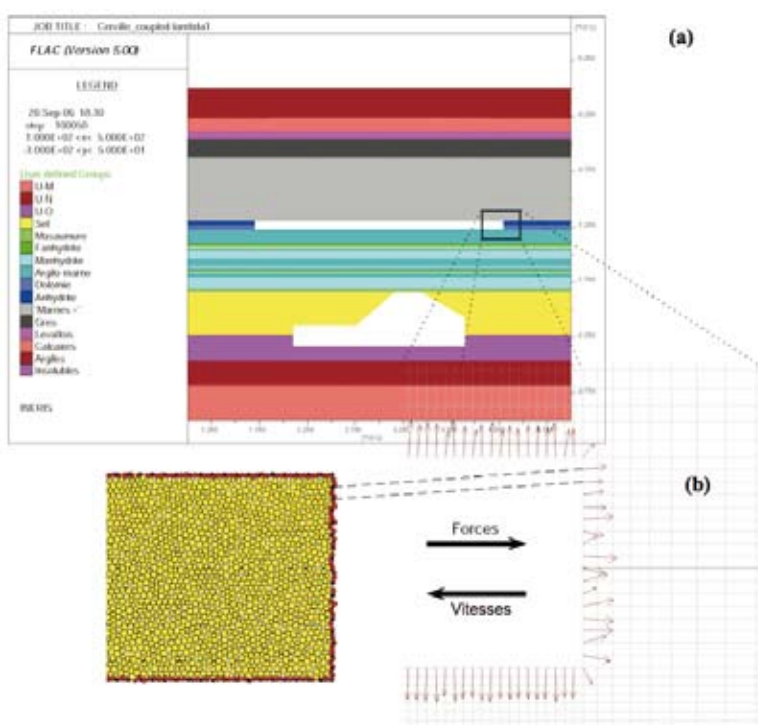
Parallèlement à ce suivi, des travaux de modélisation numérique du comportement mécanique complexe du recouvrement ont été entrepris. Il s'agit d'analyser l'initiation des microfissures et leur propagation dans le recouvrement et, plus généralement, les mécanismes d'instabilité mécanique associés. Une approche spécifique de modélisation associant, d'une part, une représentation explicite de l'endommagement (initiation, propagation et interaction dynamique des microfissures) pour les matériaux élasto fragiles, et d'autre part, des modèles de comportement plus ductile, écrouissable et viscoplastique, a été proposée puis appliquée afin de restituer au mieux le comportement de la cavité de Cerville-Buissoncourt suite à une diminution progressive de la pression de saumure dans la cavité.

MÉTHODOLOGIE

Une approche mixte « milieu continu – milieu discret » a été proposée pour la modélisation numérique de l'endommagement au sein des structures géologiques situées dans le recouvrement. La méthode consiste à utiliser un code aux éléments discrets (PFC2D®) pour modéliser les zones susceptibles de générer de la microsismicité (bancs relativement raides du recouvrement) et un code de milieu continu (FLAC®) pour simuler la rhéologie plus complexe de matériaux plus déformables (couches marneuses). Ce travail a conduit à l'élaboration d'un modèle géomécanique hybride à grande échelle.

Dans ce modèle hybride (figure 1), afin de reproduire le comportement élasto-fragile du banc raide composé par un niveau d'anhydrite et la dolomie de Beaumont, une inclusion PFC2D® a été

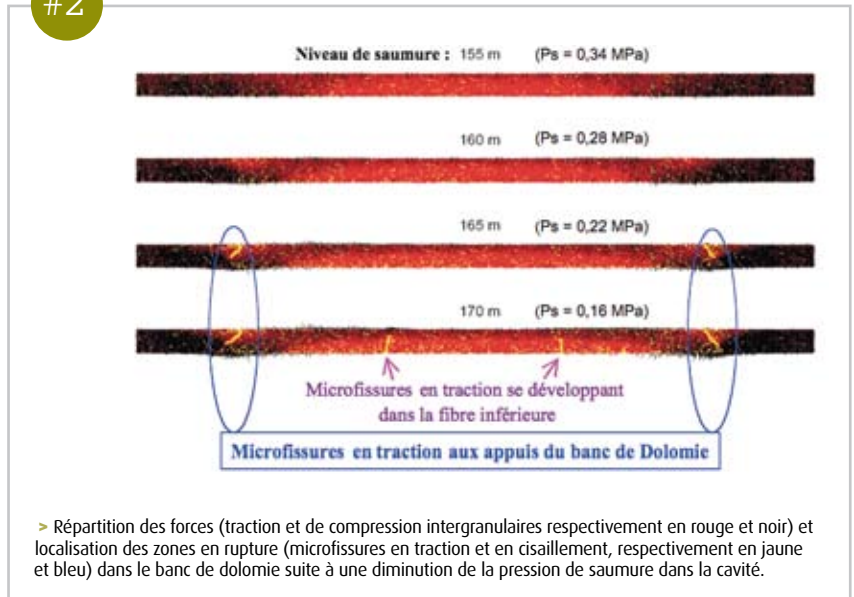
#1



> Modèle géométrique de Cerville-Buissoncourt : (a) domaine continu, (b) inclusion PFC du banc de Dolomie à l'aplomb de la cavité – échange des vitesses et forces à l'interface des deux domaines.

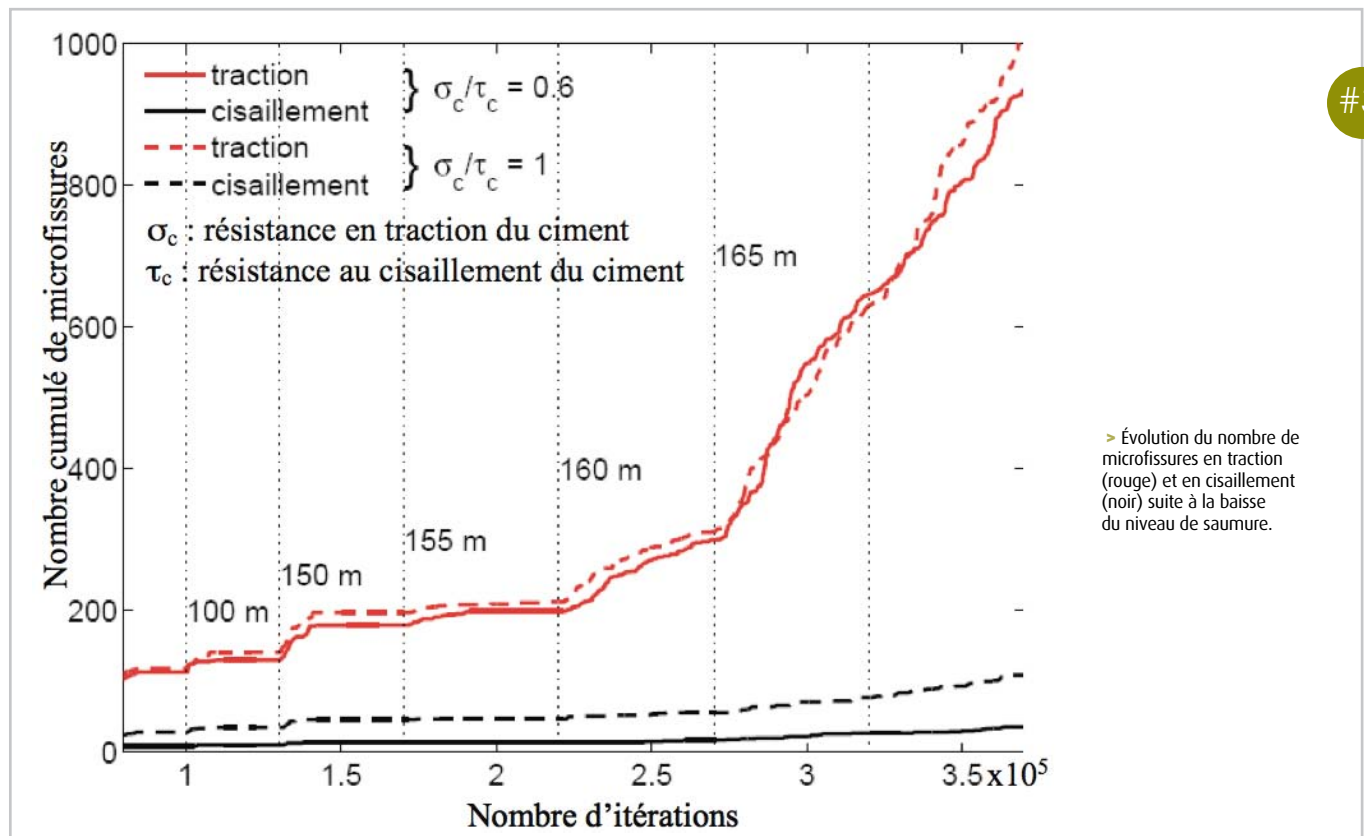
créée avec un arrangement aléatoire des particules collées aux points de contact (ciment). Le reste du modèle (extensions latérales du banc raide, les marnes intercalaires au toit immédiat de la cavité, la formation salifère et les calcaires et les grès du haut toit) a été modélisé avec le code continu FLAC[®] avec l'aide d'une loi de comportement élastoplastique avec écrouissage (pré et post-pic de la courbe contrainte-déformation) dont les caractéristiques mécaniques découlent directement des essais de laboratoire. Pour l'inclusion, en revanche, la calibration des microparamètres du modèle discret a été nécessaire en reproduisant les réponses macroscopiques du banc raide, déduites d'essais triaxiaux ou, plus récemment, d'essais de flexion « trois points ». Dans ce dernier cas, les facteurs d'intensité de contrainte KIC (caractérisant la propagation des fissures en mode ouverture et obtenus à partir des essais et des simulations avec PFC2D) ont été comparés. La vérification du modèle géométrique (haut de 850 m et large de 4600 m) du type numérique hybride est réalisée en comparant avec succès les profils de déplacements et de contraintes obtenus par les deux approches : mixte et continue (dans ce dernier cas, tout le site est modélisé en milieu continu).

#2

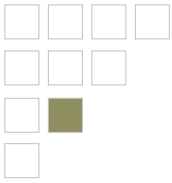


IMPACT D'UNE DIMINUTION DE LA PRESSION DE SAUMURE DANS LA CAVITÉ

Les simulations numériques mettent en évidence que, tant que la pression de saumure reste au-dessus de 0,28 MPa (ce qui correspond à un niveau de saumure dans le puits d'injection à 160 m de la surface, le toit de la cavité étant à 182 m), il n'y a pas de développement significatif



#3



[RÉFÉRENCES

Mercerat D., 2007. *Sismicité induite et modélisation numérique de l'endommagement dans un contexte salin*. Thèse de Doctorat INPL, 189p.

Mercerat D., Souley M., Driad-Lebeau L. and Bernard P., 2007. *Evaluation of overburden damage in a salt mine environment evaluated by a coupled continuum-discrete numerical modelling approach*. Solution Mining Research Institute (SMRI) – Spring 2007 Conference, 29 April-2 May, Basel, Switzerland.

Souley M., Mercerat D., Driad-Lebeau L., Bernard P., 2008. *A large scale continuum-discrete numerical modelling: application to overburden damage of a salt cavern*. Colloque Post-Mining 2008, February 6-8, Nancy, France.

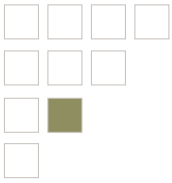
de microfissures : la distribution des quelques microfissures ainsi formées reste diffuse (figure 2). La concentration des forces n'est pas très nette, même si l'on constate le développement d'une zone en traction au centre du banc de dolomie. En deçà d'une pression de 0,22 MPa (niveau de saumure à 165 m), on note une coalescence des microfissures dans deux zones localisées aux appuis dans la fibre supérieure du banc. À partir de 0,16 MPa (niveau de saumure à 170 m), des microfissures se développent dans la partie centrale à la base du banc de dolomie. Elles commencent à se propager ensuite vers le haut. Il faut noter qu'en deçà de 0,22 MPa, les calculs numériques (quasi statiques) ne mettent en évidence aucun état d'équilibre stable, ce qui peut traduire une initiation du processus irréversible d'effondrement de la cavité. Une autre façon de mettre en évidence l'apparition d'une instabilité dès que la pression de saumure devient inférieure à 0,22 MPa est l'analyse du nombre de microfissures générées dans le

banc au fur et à mesure de la diminution de cette pression. La figure 3 montre, en effet, une augmentation nette du nombre des microfissures dès que ce seuil est dépassé. Cette brusque augmentation du nombre de microfissures a été observée sur de nombreux essais de laboratoire avec suivi des émissions acoustiques. Elle indique la création de macrofractures qui entraînent la perte totale de résistance de l'échantillon de roche. Dans les simulations réalisées (figure 2), il est à noter que le mécanisme de fracturation dans le banc compétent dolomitique est essentiellement lié à des efforts de traction, le nombre de microfissures en cisaillement restant marginal (<10 %). La localisation de la déformation par coalescence des microfissures dans les zones les plus sollicitées du banc raide ouvre des perspectives intéressantes quant à une confrontation avec les mesures microsismiques qui seront enregistrées lors de l'effondrement qui se produira dans l'avenir. Cela permettra de valider la méthodologie employée et son utilisation sur d'autres sites.

■ SUMMARY

With the objective to better understand the evolution of overburden damage on top of an underground solution mining, an in-situ experiment is undertaken above a salt cavity in the Lorraine region (NE of France) until 2005. The overburden overlying the salt cavity is characterized by a competent layer where most brittle damage, with the associated microseismicity, is expected. This work is focussed on a coupled continuum-discrete modelling approach to simulate the mechanics of fracture initiation and propagation in the rock mass. A methodology of a large scale coupled continuum-discrete modelling is proposed and applied to the site of Cerville-Buissoncourt. The numerical verification of the hybrid approach response is achieved by comparing the results with those from the fully continuum model at the site scale when the competent layers behave elastically. The results are quite satisfactory. Moreover, the development of microcracking is in accordance with the predicted tensile zones obtained with a fully continuum approach. The sudden rise up of the microcracks cumulative number from a specific brine depth level on, can be interpreted as the fracture development by coalescence of microcracks within the competent bed, which may possible, indicate the beginning of a generalized instability of the overburden. Finally, the coupled continuum-discrete methodology presented herein provides a good opportunity to explicitly simulate the microcracking in the overburden. A conclusive statement about failure mechanisms, with eventually a quantitative comparison, will be achieved when information about microseismic event locations and magnitudes will be available.





Reconnaissance du sous-sol par méthodes géophysiques appliquées à la détection des cavités souterraines

> **LYNDA DRIAD-LEBEAU, ARKADIUSZ KOSECKI**

Les recherches scientifiques portant sur les techniques géophysiques visant à détecter, localiser et caractériser les cavités souterraines situées à des profondeurs comprises entre une dizaine de mètres et quelques centaines de mètres (~ 300 m) demeurent plus que jamais d'actualité. En effet, pour cette gamme de profondeur, la plupart de ces techniques présentent des limites de résolution et demandent à être adaptées au domaine d'application visé, à savoir la délimitation et la caractérisation des ouvrages souterrains abandonnés et leur recouvrement. En outre, des compromis entre la résolution de l'imagerie géophysique et les profondeurs d'investigation⁽¹⁾ et de détection⁽²⁾ doivent être judicieusement établis selon la technique choisie et la cible recherchée. Par ailleurs, les techniques les plus utilisées pour la détection des cavités, telles que la microgravimétrie, la sismique et la résistivité électrique rencontrent souvent des limitations liées à l'environnement des mesures, en particulier dans les secteurs urbains où l'activité humaine et les conditions de couplage avec le sol diminuent l'efficacité de ces techniques (faible rapport signal/bruit).

Néanmoins, certaines de ces techniques se révèlent prometteuses à condition d'en développer et d'en affiner les outils d'investigation et d'interprétation mis en œuvre aujourd'hui. Focalisé sur cet objectif, ce programme de recherche a consisté à élaborer des outils d'acquisition et de traitement permettant d'augmenter l'efficacité et la résolution de l'imagerie de la technique Sismique Haute Résolution (SHR). Des mesures *in situ*, basées sur trois techniques (microgravimétrie, SHR et résistivité électrique), ont été réalisées afin d'expérimenter ces outils et d'en comparer les performances dans deux contextes distincts (marnières, cavités de dissolution dans le sel).

(1) Profondeur pour laquelle la mesure du champ physique est exploitable. C'est une grandeur théorique qui dépend de la nature du champ et des propriétés des terrains.

(2) Profondeur pour laquelle un objet (cavité souterraine) de dimensions finies produit un champ mesurable en surface. Ce champ dépend du contraste entre les caractéristiques de la cavité et celles de l'encaissant.

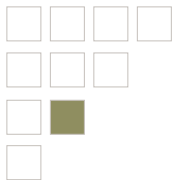
(3) Source de surface non destructive à balayage fréquentiel (Sweep) permettant le choix des fréquences du signal source ou signal pilote. À l'opposé des sources vibratoires, le signal des sources impulsionnelles i.e. destructives, n'est pas connu et les fréquences ne sont pas modulables.

PROBLÉMATIQUE SCIENTIFIQUE DE LA DÉTECTION DES CAVITÉS PAR DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Depuis ces vingt dernières années, de nombreuses applications publiées retracent le potentiel des techniques SHR, la microgravimétrie et la résistivité électrique, à détecter et à localiser des cavités peu profondes ($H < 100$ m) dans des contextes géologiques et miniers divers. Bien que certaines de ces applications aient été concluantes, notamment les mesures SHR dans le contexte du charbon, du gypse et de la craie^[1,2], le problème de détection des cavités par une signature géophysique reste complexe. Ces difficultés d'imagerie sont essentiellement liées aux hétérogénéités géologiques et aux dimensions généralement réduites des cavités par rapport à la profondeur d'investigation.

La Sismique réflexion Haute Résolution est la seule méthode géophysique qui permet de fournir une image continue de la succession des terrains et de leur agencement structural. Le point fort de cette technique tient aux performances, à la fois du dispositif de mesure employé et des moyens d'analyse et de traitement des données disponibles aujourd'hui. Des travaux récents ont montré qu'en dehors de l'application « classique », la SHR est utilisée avec succès pour la détection et la localisation des cavités souterraines et pour la détection des zones effondrées ou remblayées. Cependant, le retour d'expérience de nombreuses études a mis en évidence certaines limites de résolution de l'imagerie dans un contexte géologique particulièrement hétérogène et accidenté. Le traitement des signaux est, en effet, très complexe. Des ondes d'interférence de forte amplitude (ondes de surface, ondes réfractées, ondes aériennes...) masquent la signature utile (ondes réfléchies).

D'autre part, le choix de la source émettrice n'est pas simple ; elle doit être à la fois puissante, génératrice de hautes fréquences et idéalement légère, maniable et répétitive. Les sources capables de répondre à certaines de ces conditions sont essentiellement



> Sources vibratoires en ondes P (VibroPA, VibroPP) et S (VibroS). Le sens de vibration est indiqué par les flèches blanches.

#1

destructives. Elles ne peuvent donc être utilisées en milieu urbain et ne sont pas conformes aux règles de sécurité. Par ailleurs, de nombreuses recherches sur l'évolution récente de la SHR indiquent clairement que le « type » et les paramètres de la source constituent le facteur principal de progrès dans ce domaine.

OPTIMISATION DE LA RÉOLUTION SHR

CONCEPTION ET DÉVELOPPEMENT DE SOURCES VIBRATOIRES

L'obtention d'une bonne résolution de l'image sismique nécessite l'exploitation d'ondes courtes, c'est-à-dire des fréquences élevées. Compte tenu du fait que l'absorption du milieu augmente avec la fréquence, la fréquence exploitable est naturellement limitée. Selon les principes universels, la maximalisation de la fréquence nécessite l'utilisation de sources sismiques puissantes et/ou large-bandes, capables de générer des impulsions très brèves. Les sources de type vibratoire⁽³⁾ utilisées avec succès dans la sismique pétrolière « classique » peuvent contribuer fortement à l'optimisation de la résolution. En effet, le développement de mini-vibrateurs adaptés à la spécificité de la SHR s'est avéré nécessaire, compte tenu de leur nombre limité en Europe. Un vibreur adapté à la SHR devrait posséder des caractéristiques spécifiques en vue de satisfaire aux objectifs de haute résolution et de concevoir son utilisation en milieu urbain. La première étape de ce programme de recherche a conduit à la mise au point de sources vibratoires portables en ondes P (ondes longitudinales) et S (ondes transversales) et de leur système de pilotage. Pour répondre aux objectifs de haute résolution, des composants mécaniques et électroniques ont été intégrés permettant l'émission d'un signal optimal destiné à l'initiation de la propagation dans le sous-sol (figure 1). Le principe général de fonctionnement est basé sur une émission acoustique par le biais

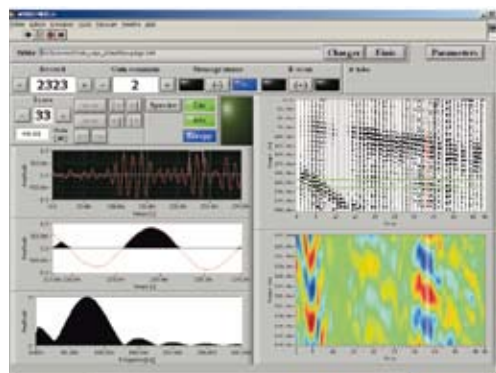
de haut-parleurs d'une puissance maximale de 1500 watts qui restituent des fréquences effectives allant de 20 à 500 Hz. Les vibrations transmises par les haut-parleurs constituent le signal émis dans le sous-sol par couplage acoustique et mécanique. La combinaison de deux types de couplage permet, en effet, d'adapter la source vibratoire aux conditions du site (relief, terrain plat...) et d'augmenter ainsi la résolution des hautes fréquences.

DÉVELOPPEMENT D'UNE PROCÉDURE DE GÉNÉRATION ET D'OPTIMISATION D'UN SWEEP

Afin d'assurer le contrôle et la maîtrise du signal émetteur modulable en fréquence (dit « Sweep »), une Procédure de Génération et d'Optimisation de Sweep (PGOS) a été élaborée, dans une optique d'utilisation universelle. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de doctorat d'Arkadiusz Kosecki, menée en partenariat avec l'École Centrale de Lille et avec l'appui technique et financier de RFF. Il a également abouti au développement d'un programme d'analyse paramétrique et de simulation numérique dans le but d'optimiser la conception des mesures (géométrie) et la résolution « attendue », en fonction des conditions du site et des objectifs. Ces nouveaux développements, réunis en un parc matériel et logiciels, ont fait l'objet de tests de validation sur site. Il s'agissait notamment de comparer leurs performances avec les solutions de référence existantes (mini-vibrateurs disponibles en Europe et les sources impulsionnelles traditionnelles). Les résultats des analyses exhaustives et comparatives confirment la pertinence des solutions techniques retenues et de la méthodologie adoptée pour l'obtention d'une meilleure résolution de l'imagerie SHR⁽⁴⁾. Grâce à ces développements innovants, notamment la PGOS et les sources vibratoires non destructives, il est désormais possible d'adapter chaque élément de la chaîne d'acquisition et de conception des mesures aux conditions géologiques de la zone d'intérêt. Par ailleurs, le programme « SABAL », qui intègre le

#2

> Le programme « SABAL ». Émission d'un sweep selon la PGOS (à gauche) et l'analyse interactive des enregistrements (à droite).

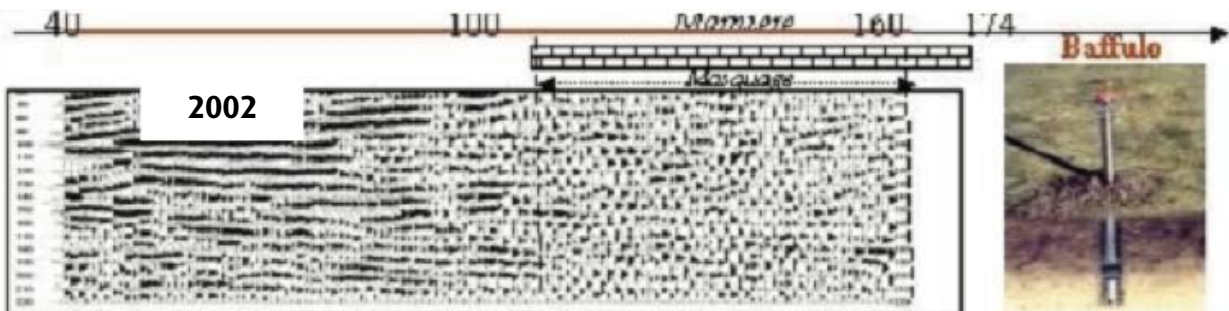
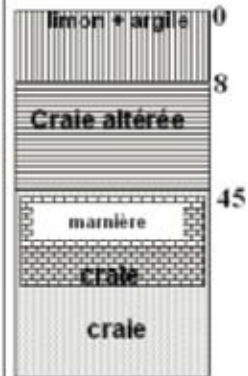
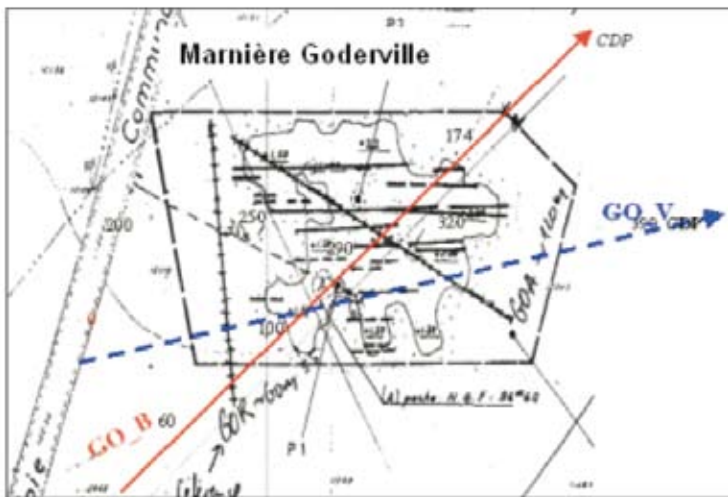


#3

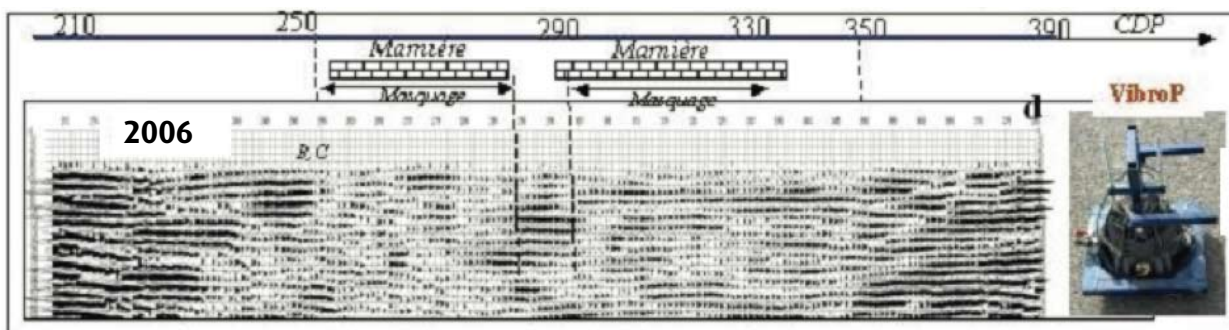


> Imagerie SHR de la marnière de Goderville (H = 45 m). Apport de la source vibratoire à la résolution de l'imagerie (profil bleu).

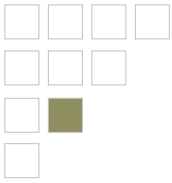
Site expérimental de Goderville
Mesures SHR dans une zone pavillonnaire.



Source impulsionnelle destructive.



Source vibratoire non destructive.



[RÉFÉRENCES

[1] Driad L., Piwakowski B., 2002. *Detection and characterisation of underground cavities using high resolution seismic reflection (HRSR)*. Environment Engineering Geophysics, Aveiro (Portugal), septembre 2002.

[2] Piwakowski B., Watelet J.M. and Moreaux D., 1997. *High resolution seismic prospecting of old gypsum mines – evaluation of detection possibilities*. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics 2 (2).

[3] Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L., 2008b. *High resolution seismic investigation in salt mining context: PART II: Comparison of seismic sections*. Near Surface Geophysics, submitted.

[4] Driad-Lebeau L., Piwakowski B., Styles P., Bourgeois B., Lataste JF., Contrucci I. *Geophysical detection of underground cavities*. Post-mining, February 6-8 Nancy, France 2008.

[5] Piwakowski B., Driad-Lebeau L., Kosecki A., "Detection of underground Marpit mine using High resolution Seismic". 69th EAGE Conference & Exhibition, London, UK, June 2007 Expanded abstracts, p113.

[6] Kosecki A., Piwakowski B., Driad-Lebeau L., Safinowski P., 2008a. *High resolution seismic investigation in salt mining context: PART I: Comparison of seismic sources*. Near Surface Geophysics, submitted.

pilotage des sources vibratoires, la PGOS, l'analyse paramétrique et l'étude de conception, est opérationnel et répond aux exigences d'une acquisition de mesures SHR de haute qualité (figure 2).

DÉTECTION DES CAVITÉS PAR DES TECHNIQUES GÉOPHYSIQUES

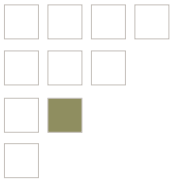
Des expérimentations géophysiques se sont déroulées dans deux contextes géologiques et miniers : marnières (anciennes exploitations de craie tendre) de Haute-Normandie, et exploitation de sel du bassin salifère lorrain.

Bien que les sources vibratoires soient encore au stade de « prototype », la possibilité de détecter des cavités salines à plus de 100 m de profondeur a pu être démontrée. D'autre part, dans le contexte géologique défavorable des marnières, les investigations SHR se sont révélées très encourageantes en termes de détection. C'est notamment le cas des interprétations menées sur la marnière de Goderville pour laquelle l'utilisation d'une source vibratoire non destructive a permis d'aboutir à une imagerie complète avec un pouvoir de résolution à la hauteur des objectifs du programme (figure 3)^[1]. En comparant ce résultat avec celui obtenu précédemment à partir d'une source impulsionnelle^[4], l'imagerie SHR, résultant de la nouvelle source vibratoire (VibroPP, figure 1), s'est avérée nettement plus convaincante.

Ainsi, il apparaît que le principe de base de la technique SHR, les performances du nouveau système d'acquisition, et la disponibilité d'un critère de détection^[6] confèrent une place prometteuse à la SHR pour la détection des cavités souterraines. Par ailleurs, les techniques dites de « potentiel », qui s'appuient sur les mesures microgravimétriques et électriques, ont montré un potentiel de détection de zone d'influence de plusieurs cavités salines situées à plus de 100 m de profondeur. La détection individuelle des cavités n'a toutefois pas été possible, compte tenu de la limitation de ces techniques liées essentiellement aux dimensions des cavités, insuffisantes par rapport à la profondeur d'investigation. Dans le cas des marnières, où l'imagerie électrique n'a pu être exploitée (manque de résolution), l'anomalie liée à la présence de la marnière a bien été identifiée par imagerie microgravimétrique mais une autre anomalie semblable a été observée en dehors de l'influence de la marnière. Ce constat met en exergue la difficulté de cette technique à distinguer les zones « décomprimées » de celles associées à la présence d'une cavité anthropique quelle que soit la nature du remplissage (remblai ou vide). Contrairement à la SHR, il n'existe aujourd'hui aucun critère de détection quantitatif qui permettrait d'évaluer le potentiel de détectabilité d'une cavité.

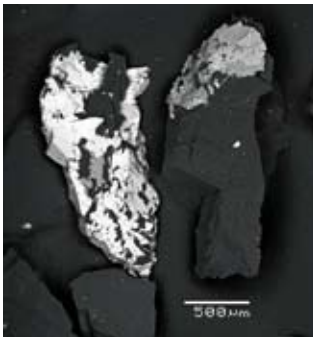
SUMMARY

This document presents a report on research work carried out in the frame work of a large program entitled « Geophysical detection of underground cavities ». The principal objective is to develop tools and procedures to enhance the performance and the resolution of the geophysical imaging. The step that consists in developing technical tools and to improve scientific knowledge in the field of underground sounding applied to the cavities detection and diagnostic is upstream process of risk management. To achieve these goals, the program was elaborated on the basis of partnership research implying scientists and industrial able to associate knowledge, experience, the know-how and the expertise. A large aspect of the work carried out concerns the design and development of acquisition tools to increase the performance of the high-resolution seismic reflection, in particular, to optimise the resolution of the sub-surface imaging. Vibratory sources in P and S waves, a procedure of generation and optimisation of Sweep were developed and validated. Powerful and operational seismic acquisition package is, from now on, available for underground auscultation applied to cavities detection. In addition to SHR (Seismic High Resolution), the geophysical techniques based on the microgravity and electrical resistance measurements were investigated in salt context of Lorraine region (East France) and the marl-pits of Haute-Normandie (North France). It arises from the experiments on pilot sites a satisfactory detection of cavities in the studied contexts thanks to the new developments of HRS acquisition System. In addition, the investigation of the three selected geophysical techniques raised the interest of joint measurements of the high-resolution seismic and the microgravity in particular in the context of the marl-pits. The following report presents the works on the SHR developments, the evidential results of the field experiments carried out in the salt basin of Lorraine and marl-pits of Haute-Normandie as well as an experience feedback of the undertaken research.



Stockage géologique du CO₂ : capacité de stockage et surveillance des sites

> DELPHINE CHARRIÈRE, ZBIGNIEW POKRYSZKA



> Image MEB des grains du charbon broyé du bassin de Lorraine.

#1

Pour faire face à la problématique du réchauffement climatique résultant, pour grande partie, de l'augmentation de la teneur de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plusieurs solutions de mitigation sont à l'étude. En complément de la réduction des consommations d'énergie et de l'utilisation des énergies renouvelables, l'une d'entre elles consiste à analyser la possibilité de stocker le CO₂ produit par certaines activités industrielles au sein de sites géologiques.

Trois possibilités de stockage géologique dans le sous-sol sont envisagées : au sein de réservoirs de gaz/pétrole déplétés, dans les aquifères profonds non valorisables et au sein des gisements de charbon non exploités.

Les équipes de l'INERIS sont fortement engagées dans l'étude de cette dernière technique de stockage. Le stockage dans les gisements de charbon permet, en effet, un piégeage difficilement réversible du gaz, ce qui limite la probabilité de fuite. Il peut aussi présenter, dans certains contextes, un intérêt économique, compte tenu d'une possibilité de récupération associée du gaz combustible naturel (méthane) souvent contenu dans les gisements houillers.

Les objectifs des travaux de recherche visent notamment à évaluer les capacités potentielles de stockage d'environnements houillers en étudiant particulièrement les phénomènes d'adsorption des molécules de CO₂ dans le charbon mais également les conditions de transport du gaz jusqu'aux sites d'adsorption. Une thèse à connotation fortement expérimentale est actuellement en cours sur cette problématique qui s'appuie notamment sur plusieurs programmes de recherche collaborative (programme METSTOR financé par l'ADEME, programme CHARCO financé par l'ANR).

Plus transversale, la thématique de surveillance des potentiels futurs sites de stockage (détection de fuite éventuelle vers la surface et en profondeur) couvre l'ensemble des types de stockage géologique les plus étudiés. Bénéficiant d'un retour d'expérience unique de plusieurs décennies dans le cadre de la surveillance des émissions gazeuses d'origine géologique (thématique

de la sécurité des mines de charbon assurée par le CERCHAR), l'INERIS développe des outils de surveillance et de mesure du flux gazeux, en surface et en profondeur, qui permettront à terme d'alerter sur un dysfonctionnement éventuel du stockage. Là encore, ces développements s'appuient sur un partenariat fort avec le BRGM, l'IFP, Total, l'INPL, Gaz de France, Schlumberger et Géostock, qui se matérialise au travers de divers projets ANR.

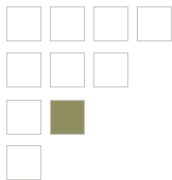
PARAMÈTRES INFLUANT SUR L'ADSORPTION DU CO₂ SUR LE CHARBON

Le travail de recherche est principalement orienté sur les caractéristiques d'adsorption du CO₂ et du CH₄ d'échantillons de charbon de deux bassins représentatifs des gisements houillers français : le bassin de Lorraine et le bassin de Gardanne. Ces deux gisements présentent, par ailleurs, un fort potentiel pour le stockage du CO₂ (1).

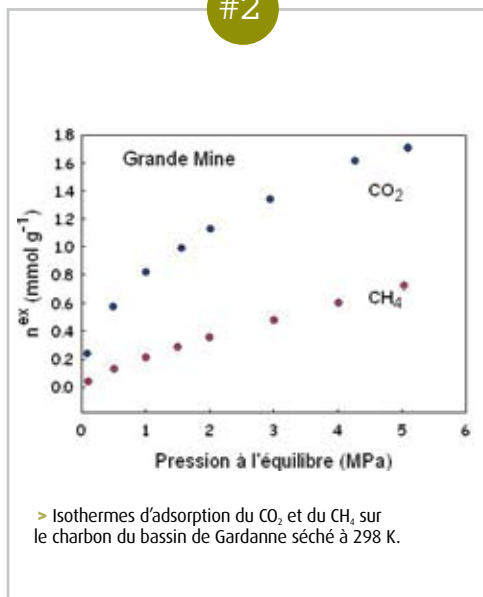
Les mesures expérimentales mises en œuvre dans les laboratoires de l'INERIS sont les premières réalisées sur ces charbons dans le but d'étudier la faisabilité du stockage du CO₂ au sein de terrains houillers français. Les expériences d'adsorption sont principalement mises en œuvre à l'aide d'une balance à suspension magnétique, qui permet de mesurer, avec une très grande précision, la masse de gaz adsorbée au cours du temps. Différentes isothermes d'adsorption ont ainsi pu être déterminées pour des pressions allant jusqu'à 5 MPa et, ce, à des teneurs hygrométriques différentes et pour des échantillons de charbon broyés selon différentes tailles de grains (figure 1).

Au vu des résultats, la capacité et la cinétique de sorption de gaz sur le charbon dépendent de plusieurs paramètres, notamment (2, 3) :

- la température : l'augmentation de la température permet d'atteindre l'équilibre de sorption plus rapidement, en revanche, elle influe négativement sur la capacité d'adsorption ;
- la nature du gaz : dans les conditions expérimentales étudiées, l'équilibre est atteint plus rapidement pour la sorption de CO₂ que pour celle de CH₄. Par ailleurs, la capacité d'adsorption



#2



LA MODÉLISATION POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA STRUCTURE DU CHARBON

La structure du charbon naturel est microporeuse et hétérogène. Le gaz, avant de se fixer sur le charbon, circule dans cette structure. L'étude du transport du gaz dans le charbon est importante pour connaître son cheminement entre son point d'injection au niveau du puits et le site d'adsorption au sein de l'horizon houiller.

En partenariat avec l'Institut National Polytechnique de Toulouse, les données cinétiques obtenues expérimentalement sont utilisées :

- pour décrire la diffusion du gaz dans les charbons étudiés,
- pour mieux comprendre la structure du charbon,
- pour comparer l'interaction de CO₂ et du CH₄ vis-à-vis des charbons aussi bien du point de vue cinétique que thermodynamique.

Pour ce faire, un modèle unipore (grains sphériques monodisperses) a été utilisé^[9]. Il permet d'obtenir une première estimation des paramètres de diffusion de gaz dans un terrain houiller particulier, même s'il ne permet pas un bon ajustement des données.

Les paramètres obtenus (coefficients de diffusion et énergie d'activation), par l'interprétation de ce modèle, pour l'adsorption du CO₂ à 0,1 MPa montrent que la quantité d'énergie nécessaire pour l'adsorption du CO₂ sur le charbon apparaît relativement faible (20 kJ mol⁻¹ CO₂) mais que la diffusion dans la matrice s'avère lente (10⁻¹² m² s⁻¹). Dans une prochaine étape, une modélisation des données expérimentales à l'aide d'un modèle bidisperse permettra d'aller plus avant dans la caractérisation et la modélisation de la diffusion pour des conditions expérimentales plus variées avec notamment des compétitions CO₂/CH₄ en présence ou non d'eau.

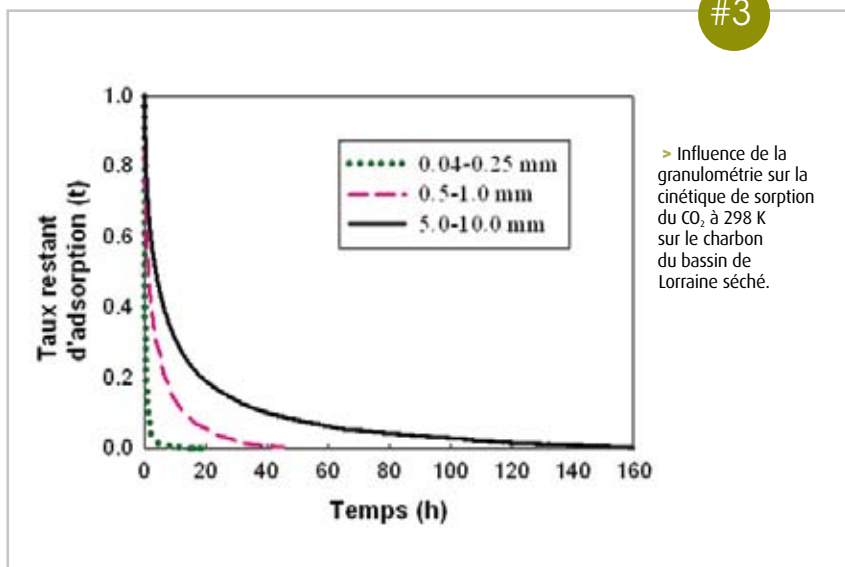
Ces résultats prometteurs serviront de base lors de l'élaboration de modèles de transport de gaz en milieu houiller. Ils visent à prédire à moyen terme la capacité d'adsorption des veines de charbons étudiées et la possibilité de récupération de méthane si celui-ci est présent dans le gisement.

du CO₂ sur le charbon apparaît nettement plus importante que celle du CH₄ (figure 2) ;

- l'humidité : pour les échantillons de charbons humides, la vitesse de sorption des deux gaz étudiés est réduite d'un facteur 2 à 3 selon le taux d'humidité initial en comparaison aux essais sur les charbons séchés. De même, l'humidité est un paramètre qui influence négativement la capacité d'adsorption de gaz. Elle peut aussi modifier les conditions de récupération de méthane en ralentissant fortement sa désorption^[9].

Dans la pratique, de nombreux autres paramètres sont à prendre en compte comme la nature du charbon, la teneur et la composition de la phase minérale et la granulométrie du charbon, cette dernière n'influant que sur la cinétique de sorption (figure 3).

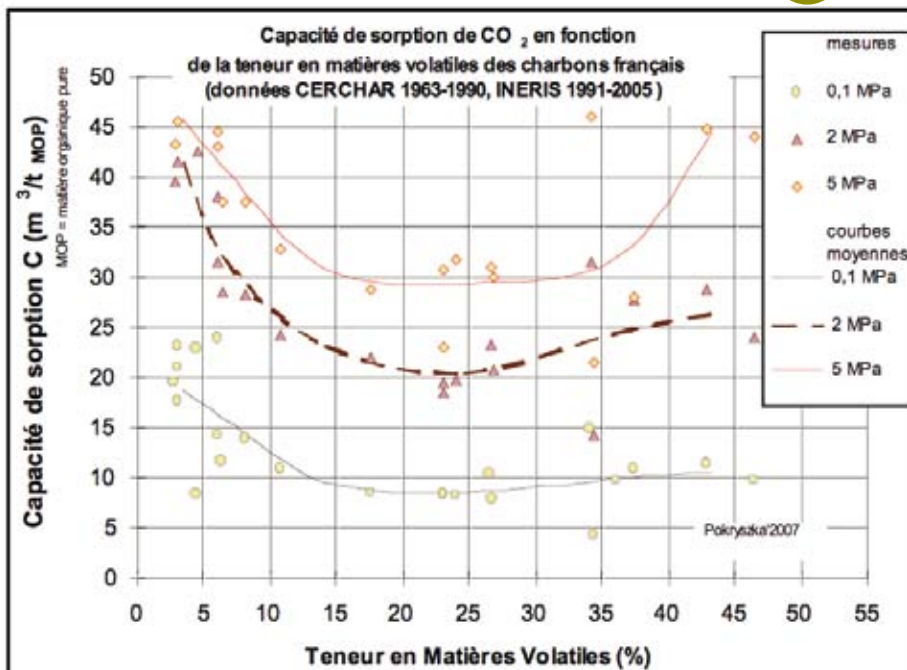
#3



L'ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DU STOCKAGE

En parallèle, les isothermes d'adsorption de CO₂ sont établies sur les différents charbons disponibles. Ce travail permet d'étoffer progressivement la première base restreinte de données issues des résultats acquis dans les années 1960-70 au CERCHAR. Une partie des échantillons traités est acquise dans le cadre des échanges entre les partenaires du programme ANR CHARCO. Un premier bilan des résultats a permis d'établir une relation très intéressante présentée sur la figure 4.

#4

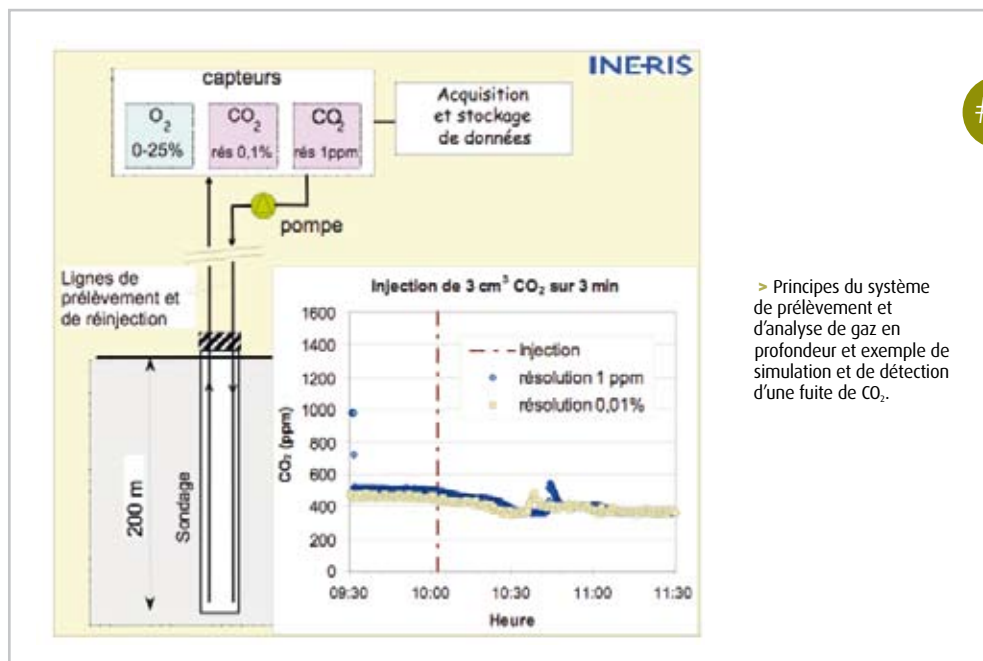


> Capacité d'adsorption du CO₂ pour certains charbons français, en fonction de leur teneur en matières volatiles, à différents niveaux de la pression d'équilibre.

Elle montre la capacité d'adsorption du CO₂ en fonction de la teneur en matières volatiles, le paramètre français a priori le plus représentatif de la nature des charbons français et de ses propriétés d'adsorption. Cette relation peut être utilisée pour évaluer, en une première approche, les capacités de stockage du CO₂ dans les gisements houillers à partir de la connaissance de la teneur en matières volatiles, paramètre relativement bien connu pour les charbons français.

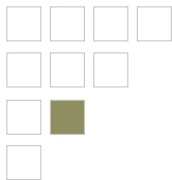
SURVEILLANCE DE SITES DE STOCKAGE

Après l'injection de grandes quantités de CO₂, les futurs sites de stockage seront surveillés pour détecter et quantifier les fuites éventuelles de gaz, du réservoir vers l'atmosphère. Pour ce faire, il est nécessaire de développer et valider des méthodes de détection de ces fuites afin d'élaborer des démarches méthodologiques et protocoles expérimentaux qui s'avèreront essentiels à l'exploitation des futurs sites de stockage^[4]. Compte tenu de



#5

> Principes du système de prélèvement et d'analyse de gaz en profondeur et exemple de simulation et de détection d'une fuite de CO₂.



[RÉFÉRENCES

[1] Bonijoly D., Pokryszka Z., Brunello J.-M., 2006. *Storage-capacity assessment for CO₂ captured from FCB power plants in France - Aquifer storage vs ECBM recovery*. Proceedings. International symposium on site characterization for CO₂.

[2] Charrière D., Pokryszka Z., Behra P., Didier C., 2007. *Gas sorption on the coal characterisation: research of French coal basin to CO₂ sequestration*. 1st French-German Symposium on Geological Storage of CO₂, 21-22 juin 2007, Potsdam.

[3] Charrière D., Behra P., Pokryszka Z., 2008. *Thermodynamic and kinetic processes at coal interface for CO₂ geological storage*. 5th International Conference « Interfaces Against Pollution ». 1-4 juin 2008, Kyoto.

[4] Fabriol H., Becquey M., Huguet F., Lescanne M., Pironon J., Pokryszka Z., Vu Hoang D., 2007. *On going investigations to design the monitoring program for a CO₂ storage project in the Parisian basin (France)*. 6th Annual conference on carbon capture and sequestration, 7-10 mai 2007, Pittsburgh.

[5] Pokryszka Z., Krause E., 2007. *Émissions de méthane à partir des couches de charbon ennoyées, dans les mines arrêtées*. Mining and Environment N° IV/2007, ISSN 1643-7608, Central Mining Institute eds., Katowice 2007.

[6] Pokryszka Z., Charmoille A., Bentivegna G., 2007. *Développement des méthodes du suivi géochimique en phase gazeuse à la surface et dans la couverture intermédiaire des sites de stockage géologique du CO₂*. Séminaire ANR « Captage et stockage du CO₂ », 12-13 décembre 2007, Pau.

sa grande expérience dans les domaines de la mesure et du contrôle des émissions gazeuses, l'INERIS a développé un appareillage innovant (chambre d'accumulation), capable d'identifier et de quantifier le flux de CO₂ à l'interface sol/atmosphère, sans perturber les conditions de prélèvement⁶⁴. Cette méthode permet de mesurer des flux sur une large gamme allant de 0,1 à 4000 cm³ min⁻¹ m⁻².

Par ailleurs, les travaux de développement portent sur la mise en œuvre de mesure de gaz au sein

de couches intermédiaires, voire profondes, du recouvrement. Dans cette perspective, un dispositif de prélèvement et d'analyse de gaz en souterrain a été développé et est mis en œuvre sur divers sites expérimentaux exploités dans le cadre de différents projets ANR (GéoCarbone Monitoring, Sentinelle, etc.). Ce système a d'ores et déjà montré sa capacité à détecter et à mesurer des fuites très faibles de CO₂ (quelques mm³/min à quelques cm³/min) lors d'expérimentations de simulation de fuite *in situ* (figure 5).

SUMMARY

Currently, the geological storage of CO₂ is heavily studied around the world in order to limit global warming due to the greenhouse effect. The atmospheric CO₂, which has been steadily increasing for more than a century, is assumed to be in a large part responsible of this warming. Nowadays, various options have been considering to store CO₂ in an underground environment for periods covering several centuries. Among the options, one is to inject it in unexploited coal seams. INERIS are involved in studying this possibility of CO₂ geological storage. It may also present in some contexts, an economic interest, if fuel natural gas (methane) is present in coal seams (ECBM: Enhanced CoalBed Methane).

The objectives of researches aim at assessing the capacity of storage of coal seams with the characterisation of CO₂ sorption onto French coals: sorption capacity and gas transport in coal structure. To determinate this parameters, an experimental work is currently underway in INERIS laboratories. To study the feasibility of CO₂ storage in coal seams, experiments of adsorption were performed using gravimetric technique for monitoring the kinetics and capacity of sorption. From our results, equilibrium is reached faster for CO₂ sorption than for methane sorption, while the adsorption capacity of CO₂ is higher than for the one of methane. During this experimental study, we showed that the gas sorption at coal interfaces is due to a set of complex mechanisms involving a diffusion transfer through macropores and micropores followed by adsorption onto the sites at coal surfaces.

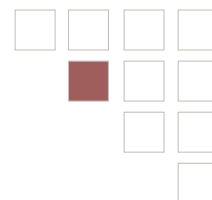
Simultaneously, INERIS has developed methods for gaseous phase geochemical monitoring on surface as well as within the cap rock of geological CO₂ storage sites. The work undertaken was targeted at two specific approaches:

- Early detection (pre-alert), using analysis of gas samples taken from the base of the dedicated boreholes drilled from the surface into the intermediate cap rock strata.
- Detecting and quantifying the gaseous flux of CO₂ from the ground to the atmosphere.

These two approaches were successively developed in the laboratory and then applied and tested *in-situ*, under conditions that are as close as possible to those of the future storage sites.

The tests undertaken on a 200 meter deep borehole have shown that the detection of CO₂ leaks passing through the intermediate overburden strata was possible by sampling and continuous analyzing of the gas accumulating at the bottom of the borehole. Good results have especially been obtained when detecting small releases of gas that may represent an early warning sign prior to the appearance of a larger leak.

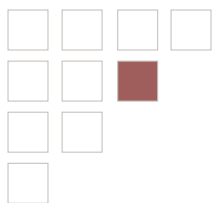
Directly measuring the gaseous flux from the ground is one of the most effective ways to monitor a storage site. The INERIS accumulation chamber method has been improved to measure low and very low fluxes of CO₂. It can now be used to measure a wide range of CO₂ flux, from very low emissions levels of 0,1 cm³.min⁻¹.m⁻² up until extremely high flux rates of some 4,000 cm³.min⁻¹.m⁻². These metrological and operational characteristics have been checked and validated by laboratory tests, on a test rig, as well as using in the field measurements at sites that naturally release CO₂. The two methods experimented are now operational and available, ready for integration into the surveillance strategy applied to future storage sites. They can be used throughout all of the steps in the life of a storage site: site reconnaissance, establishing the initial state, injection, post-injection phase, and residual monitoring after abandoning the site.



PUBLICATIONS

Liste des articles parus dans les revues à comité de lecture ou proceedings à diffusion large, entre le 30 juin 2007 et le 31 juillet 2008.

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



Substances et produits chimiques

2007

DEVILLERS J., MARCHAND-GENESTE N., DORE J.C., **PORCHER J.M.**, POROIKOV V.

Endocrine disruption profile analysis of 11,416 chemicals from chemometrical tools ?

Sar and Qsar in Environmental Research, 2007, vol. 18, n° 3-4, pp. 181-193.

BRILLAUD E., PIOTROWSKI A., de SEZE R.

Effect of an acute 900 MHz GSM exposure on glia in the rat brain: A time-dependent study.

Toxicology, 2007, vol. 238, n° 1, pp. 23-33.

BOUVIER D'YVOIRE M., PRIETO P., BLAAUBOER B.J., **BOIS F.Y.**, BOOBIS A., **BROCHOT C.**, COECKE S., FREIDIG A., GUNDERT-REMY U., HARTUNG T., JACOBS M.N., LAVE T., LEAHY D.E., LENNERNAS H., LOIZOU G.D., MEEK B., PEASE C., ROWLAND M., SPENDIFF M., YANG J., ZEILMAK

Physiologically-based kinetic modelling (PBK modelling): meeting the 3Rs agenda.

ATLA, 2007, vol. 35, pp. 661-671.

CARDOT V., CHARDON K., TOURNEUX P., **MICALLEF S.**, STEPHAN E., LEKE A., BACH V., LIBERT J.P., TELLIEZ F.

Ventilatory response to a hyperoxic test is related to the frequency of short apneic episodes in late preterm Neonates.

Pediatric Research, 2007, vol. 62, n° 5, pp. 591-596.

CHIU W., **BOIS F.Y.**

An approximate method for population toxicokinetic analysis with aggregated data.

Journal of Agricultural Biological and Environmental Statistics, 2007, vol. 12, n° 3, pp. 346-363.

ELGRABLI D., ABELLA-GALLART S., **AGUERRE-CHARIOL O.**, **ROBIDEL F.**, **ROGERIEUX F.**, BOCZKOWSKI J., **LACROIX G.**

Effect of BSA on carbon nanotube dispersion for *in vivo* and *in vitro* studies.

Nanotoxicology, 2007, vol. 1, n° 4, pp. 266-278.

TESSIER E., AMOUROUX D., **MORIN A.**, **LEHNHOFF C.**, **THYBAUD E.**, VINDIMIAN E., DONARD O.F.X.

(Tri)Butyltin biotic degradation rates and pathways in different compartments of a freshwater model ecosystem.

Science of the Total Environment, 2007, vol. 388, n° 1-3, pp. 214-233.

BLAISE B.J., GIACOMOTTO J., ELENA B., DUMAS M.E., **TOULHOAT P.**, SEGALAT L., EMSLEY L.

Metabotyping of *Caenorhabditis elegans* reveals latent phenotypes.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, vol. 104, n° 50, pp. 19808-19812.

TESSIER E., MARTIN-DOIMEADIOS R.C.R., AMOUROUX D., **MORIN A.**, **LEHNHOFF C.**, **THYBAUD E.**, VINDIMIAN E., DONARD O.F.X.

Time course transformations and fate of mercury in aquatic model ecosystems.

Water Air and Soil Pollution, 2007, vol. 183, n° 1-4, pp. 265-281.

2008

SANCHEZ W., GOIN C., BRION F., OLSSON P.E., GOKSOYR A., **PORCHER J.M.**

A new ELISA for the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.) spiggin, using antibodies against synthetic peptide.

Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 2008, vol. 147, n° 1, pp. 129-137.

SANCHEZ W., PICCINI B., **PORCHER J.M.**

Effect of prochloraz fungicide on biotransformation enzymes and oxidative stress parameters in three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.).

Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2008, vol. 43, n° 1, pp. 65-70.

SANCHEZ W., KATSIADAKI I., **PICCINI B.**, DITCHE J.M., **PORCHER J.M.**

Biomarker responses in wild three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.) as a useful tool for freshwater biomonitoring: a multiparametric approach.

Environment International, 2008, vol. 34, n° 4, pp. 490-498.

MOMBELLI E.

An evaluation of the predictive ability of the QSAR software packages.

DEREK, HAZARDEXPERT and TOPKAT, to describe chemically-induced skin irritation.

Alternatives to Laboratory animals, 2008, vol. 36, n° 1, pp. 15-24.

AL FARAJ A., **LACROIX G.**, ALSAID H., **ELGRABLI D.**, STUPAR V., **ROBIDEL F.**, GAILLARD S., CANET-SOULAS E., GREMILLIEUX Y.

Longitudinal ³He and proton imaging of magnetite biodistribution in a rat model of instilled nanoparticles.

Magnetic Resonance in Medicine, 2008, vol. 59, n° 6, pp. 1298-1303.

AMMARI M., **LECOMTE A.**, SAKLY M., ABDELMELEK H., de SEZE R.

Exposure to GSM 900 MHz electromagnetic fields affects cerebral cytochrome C oxidase activity.

Toxicology, 2008, vol. 250, n° 1, pp. 70-74.

BILLOIR E., DELIGNETTE-MULLER M.L., **PERY A.R.R.**, GEFFARD O., CHARLES S.

Statistical cautions when estimating DEBtox parameters.

Journal of Theoretical Biology, 2008, vol. 254, n° 1, pp. 55-64.

HINFRAY N., **AIT-AISSA S.**, **PALLUEL O.**, **PORCHER J.M.**, PAKDEL F., KAH O., **BRION F.**

Brain and gonadal aromatase as molecular and biochemical targets of endocrine disruptors in a model species, the zebrafish (*Danio rerio*).

Cybiurn, 2008, vol. 32, n° 2 suppl., pp. 34-36

LOUIZ I., **KINANI S.**, GOUZE M.E., BEN-ATTIA M., MENIF D., BOUCHONNET S., **PORCHER J.M.**, BEN-HASSINE O.K., **AIT-AISSA S.**

Monitoring of dioxin-like, estrogenic and anti-androgenic activities in sediments of the Bizertia lagoon (Tunisia) by means of *in vitro* cell-based bioassays: contribution of low concentrations of polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs).

Science of the Total Environment.
[Accepté pour publication].

AMMARI M., **BRILLAUD E.**, GAMEZ C., **LECOMTE A.**, SAKLY M., ABDELMELEK H., de SEZE R.

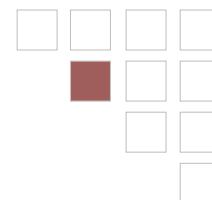
Effect of an chronic GSM 900 MHz exposure on glia in the rat brain.

Biomedicine & Pharmacotherapy, 2008, vol. 62, n° 4, pp. 273-281.

KINANI S., BOUCHONNET S., BOURCIER S., **PORCHER J.M.**, **AIT-AISSA S.**

Study of the chemical derivatization of zearalenone and its metabolites for gas chromatography-mass spectrometry analysis of environmental samples.

Journal of Chromatography A, 2008, vol. 1190, n° 1-2, pp. 307-315.



PANAYE A., DOUCET J.P., DEVILLERS J., MARCHAND-GENESTE N., **PORCHER J.M.**
Decision trees versus support vector machine for classification of androgen receptor ligands.
Sar and Qsar in Environmental Research, 2008, vol. 19, n° 1-2, pp. 129-151.

DJERIDANE Y., TOUITOU Y., **de SEZE R.**
Influence of electromagnetic fields emitted by GSM-900 cellular telephones on the circadian patterns of gonadal, adrenal and pituitary hormones in men.
Radiation Research, 2008, vol. 169, n° 3, pp. 337-343.

LOIZOU G., SPENDIFF M., BARTON H., BESSEMS J., **BOIS F.Y.**, BOUVIER D'YVOIRE M., HARRIE BUIST H., CLEWELL H., MEEK B., GUNDERT-REMY U., GOERLITZ G., SCHMITT W.
Development of good modelling practice for physiologically based pharmacokinetic models for use in risk assessment: The first steps.
Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, vol. 50, n° 3, pp. 400-411.

BRION F., HINFRAY N., PALLUEL O., MAILLARD J., ANGLADE I., AIT-AISSA S., KAH O., PORCHER J.M.
Effect of (xeno)-estrogens on zebrafish P450c17 (C17, 17 alpha-hydroxylase/17, 20-lyase) mRNA and protein expression in gonadal tissue.
Cybiurn, 2008, vol. 32, n° 2 suppl., pp. 245-246.

CIROLELLA A.
Volatile Organic Compounds (VOC): definition, classification and properties.
Revue des Maladies Respiratoires, 2008, vol. 25, n° 2, pp. 155-163.

Risques technologiques et pollutions

2007

BITEAU H., MARLAIR G., BERTRAND J.P., TORERO J.

Evaluating the rate of heat release for energetic materials by use of the fire propagation apparatus.

INTERSCIENCE COMMUNICATIONS. Interflam 2007: Proceedings of the 11th international conference, 3-5 September 2007, London. London: Interscience communications, 2007, vol. 1, pp. 427-439.

CHIVAS C., BERTRAND J.P., DUPLANTIER S., AUDOUIN L., RIGOLLET L.

Method to obtain large scale burning rate of liquids with lab scale tests.

INTERSCIENCE COMMUNICATIONS. Interflam 2007: Proceedings of the 11th international conference, 3-5 September 2007, London. London: Interscience communications, 2007, vol. 1, pp. 403-414.

BROHEZ S., FOURNEAU C., MARLAIR G., BREULET H.

Controlled atmosphere bench-scale calorimetry revisited.

INTERSCIENCE COMMUNICATIONS. Interflam 2007: Proceedings of the 11th international conference, 3-5 September 2007, London. London: Interscience communications, 2007, vol. 2, pp. 1515-1520.

PATEJ S., DURUSSEL T.

Experimental analysis of jet fire impingement on industrial pipe.

INTERSCIENCE COMMUNICATIONS. Interflam 2007: Proceedings of the 11th international conference, 3-5 September 2007, London. London: Interscience communications, 2007, vol. 2, pp. 1389-1395.

FRASER-MITCHELL J., TRIJSSENAAR-BUHRE I., WAYMEL F.

UPTUN: a risk assessment methodology for fires in tunnels.

INTERSCIENCE COMMUNICATIONS. Interflam 2007: Proceedings of the 11th international conference, 3-5 September 2007, London. London: Interscience communications, 2007, vol. 2, pp. 1315-1326.

WANG S., LU H., SHEN Z., LIU H., BOUILLARD J.

Prediction of flow behavior of micro-particles in risers in the presence of van der Waals forces.

Chemical Engineering Journal, 2007, vol. 132, n° 1-3, pp. 137-149.

PROUST C., LACOME J.M., JAMOIS D., PERRETTE L.

Processes of the formation of large unconfined clouds following a massive spillage of liquid hydrogen on the ground.

AZKARATE I., EZPONDA E., CARCASSI M.N., MARANGON A., ROSSI E. (Eds.). Proceedings of the international conference on hydrogen safety, 11-13 September 2007, San Sebastian, Spain. San sebastian: INASMET, 2007.

LACOME J.M., DAGBA Y., PERRETTE L., JAMOIS D., PROUST C.

Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area.

AZKARATE I., EZPONDA E., CARCASSI M.N., MARANGON A., ROSSI E. (Eds.). Proceedings of the international conference on hydrogen safety, 11-13 September 2007, San Sebastian, Spain. San sebastian: INASMET, 2007.

NILSEN S., MARANGON A., MIDDHA P., ENGBOE A., MARKET F., EZPONDA E., CHAINEAUX J.

Determination of hazardous zones for a generic hydrogen station. A case study.

AZKARATE I., EZPONDA E., CARCASSI M.N., MARANGON A., ROSSI E. (Eds.). Proceedings of the international conference on hydrogen safety, 11-13 September 2007, San Sebastian, Spain. San sebastian: INASMET, 2007.

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

AZKARATE I., EZPONDA E., CARCASSI M.N., MARANGON A., ROSSI E. (Eds.). Proceedings of the international conference on hydrogen safety, 11-13 September 2007, San Sebastian, Spain. San sebastian: INASMET, 2007.

DUPONT L.

Ammonia solutions explosivity.

Safety in ammonia plants and related facilities symposium, 16-20 September 2007, Las Vegas, USA. New York: AICHE, 2007, pp. 73-84.

PROUST C., HAWKSWORTH S., ROGERS R., BEYER M., LAKIC D., RAVEAU D., HERVE P., PINA V., PETITFRERE C., LEFEBVRE X.

Development of a method for predicting the ignition of explosive atmospheres by mechanical friction and impacts (MECHEX).

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, vol. 20, n° 4-6, pp. 349-365.

PROUST C., ACCORSI A., DUPONT L.

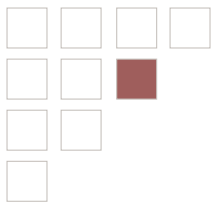
Measuring the violence of dust explosion with the "20 litre sphere" and with the standard "ISO 1 m³ vessel": systematic comparison and analysis of the discrepancies.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, vol. 20, n° 4-6, pp. 599-606.

EVANNO S., PELLIGAND C., VERLET G., DREVET D.

Analyse de l'explosion liée à la formation d'atmosphère explosive dans un navire transporteur de produits pétroliers (essence, kérosène) à travers l'accident du pétrolier Chassiron survenue le 13 juin 2003.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS. Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP, 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].



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

Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules ?

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS.

Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].

BENAISSA W., GABAS N., CABASSUD M., DEMISSY M., CARSON D.

Étude du comportement dynamique d'un réacteur/échangeur continu lors d'une dérive de fonctionnement.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS.

Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].

KAZMIERCZAK M., VICOT P., DUPONT L., VECHOT L., BIGOT J.P.

Une recherche partenariale appuyant l'évolution de la réglementation : un cas délicat de dimensionnement d'événement pour le stockage de peroxydes organiques.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS.

Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].

VECHOT L., BIGOT J.P., **KAZMIERCZAK M.**, **VICOT P.**

Sizing safety vents for non-tempered systems (organic peroxides): a new tool at lab scale.

SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS.

Des réponses industrielles pour une société en mutation : actes du 11^e congrès de la SFGP 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne. Paris : SFGP, 2007. (Récents progrès en génie des procédés, n° 96) [CD-ROM].

BRANKA R., BOWES R.

Considerations about market surveillance and quality control of fireworks.

Proceedings of the 10th International symposium on fireworks, 15-19 October 2007, Montreal, Canada, pp. 19-28.

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

Accident investigation: from searching direct causes to finding in-depth causes. Problem of analysis or/and of analyst?

DECHY N., COJAZZI G.G.M. (Ed.). Future challenges of accident investigation: Preprints (draft) proceedings of the 33th ESReDA seminar, 13-14 November 2007, Ispra, Italy. Luxembourg: European communities, 2007, 16 p.

ROUSSEAU A., **GRUET P.**

Application of IEL 62305-2 risk analysis standard in France.

Proceedings of the 9th International symposium on lightning protection, 26-30 November 2007, Foz do Iguaçu, Brasil, pp. 433-438.

MANDIN C., DAUTZENBERG B.

Interdiction du tabagisme dans les lieux publics et au travail : une avancée significative pour l'amélioration de la qualité de l'air intérieur et la santé.

Pollution Atmosphérique, 2007, n° 193, pp. 27-36.

DENYS S., CABOCHÉ J., TACK K., **DELALAIN P.**

Bioaccessibility of lead in high carbonate soils. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2007, vol. 42, n° 9, pp. 1331-1339.*

HUGUET S., SARRET G., LABOUDIGUE A., BARTHES V., **BERT V.**

Is the hyperaccumulating plant *Arabidopsis halleri* a good candidate for phytoextraction?

ZHU Y., LEPP N., NAIDU R. (Eds.). Biogeochemistry of trace elements: environmental, protection, remediation and human health. Proceedings of the 9th international conference, 15-19 July 2007, Beijing, China. Beijing: Tsinghua University Press, 2007, pp. 180-181.

BERT V., CARON L., LORS C., BIAZ A., PONGE J.F., DAZY M., MASFARAUD J.F.

Is phytostabilisation a sustainable technology for metal contaminated sediment deposit?

ZHU Y., LEPP N., NAIDU R. (Eds.). Biogeochemistry of trace elements: environmental, protection, remediation and human health. Proceedings of the 9th international conference, 15-19 July 2007, Beijing, China. Beijing: Tsinghua University Press, 2007, pp. 155-156.

HUGUET S., **BERT V.**, LABOUDIGUE A., ISAURE M.P., SARRET G.

Cd localisation and speciation in a contaminated sediment and in the Zn and Cd hyperaccumulating plant *Arabidopsis halleri*.

ZHU Y., LEPP N., NAIDU R. (Eds.). Biogeochemistry of trace elements: environmental, protection, remediation and human health : proceedings of the 9th international conference, 15-19 July 2007, Beijing, China. Beijing: Tsinghua University Press, 2007, pp. 330-331.

GUYONNET D., CAZAUX D., TOUZE-FOLTZ N., DIDIER G., NOROTTE V., COURADIN A., **BOUR O.**

French approach to equivalence in landfill geological barriers.

Proceedings of the 11th International Waste Management and Landfill Symposium, 1-5 October 2007, Sardinia, Italy.

AKERMAN A., BUDKA A., HAYWARD-HIGHAM S., **BOUR O.**, RALLU D.

Methane emissions measurements on different landfills.

Proceedings of the 11th International Waste Management and Landfill Symposium, 1-5 October 2007, Sardinia, Italy.

BOUR O., ZDANEVITCH I.

Risk assessment and comparison of short-term and long-term emissions for different treatment and disposal phases of MSW.

Proceedings of the 11th International Waste Management and Landfill Symposium, 1-5 October 2007, Sardinia, Italy.

ZDANEVITCH I., BOUR O., BUKA A., OGOR Y., PAILLER D.

Characterisation of toxic gaseous emissions from industrial solid waste landfills.

Proceedings of the 11th International Waste Management and Landfill Symposium, 1-5 October 2007, Sardinia, Italy. [Poster].

VESSIGAUD S., PERRIN-GANIER C., BELKESSAM L., **DENYS S.**, SCHIAVON M.

Direct link between fluoranthene biodegradation and the mobility and sequestration of its residues during aging.

Journal of Environmental Quality, 2007, vol. 36, n° 5, pp. 1412-1419.

MELEUX F., SOLMON F., GIORGI F.

Increase in summer European ozone amounts due to climate change.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, n° 35, pp. 7577-7587.

GIORGI F., **MELEUX F.**

Modeling the regional effects of climate change on air quality.

Comptes Rendus Geoscience, 2007, vol. 339, n° 11-12, pp. 721-733.

SALAMEH T., DROBINSKI P., MENUT L., **BESSAGNET B.**, FLAMANT C., HODZIC A., VAUTARD R.

Aerosol distribution over the western mediterranean basin during a Tramontane/Mistral event.

Annales Geophysicae. [Accepté pour publication le 18/10/2007].

BARD D., LAURENT O., FILLEUL L., HAVARD S., DEGUEN S., SEGALA C., PEDRONO G., RIVIERE E., SCHILLINGER C., **ROUIL L.**, ARVEILER D., EILSTEIN D.

Exploring the joint effect of atmospheric pollution and socioeconomic status on selected health outcomes: an overview of the PAISARC project.

Environmental Research Letters, 2007, vol. 2, n°4, art. 045003.

MANDIN C., EZRATTY V., **LEOZ-GARZIANDIA E.**, RIBERON J., COLLET S., BESOMBES J.L., ALLEMANT N.

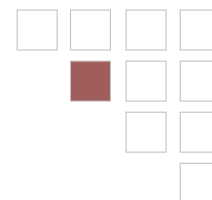
Combustions résidentielles : quel impact sur la qualité de l'air intérieur ?

Pollution Atmosphérique, 2007, n° 195, pp. 211-224.

HUBERT P.

Organisation institutionnelle de l'évaluation et de la gestion des risques.

QUIN J., GUEGUINOU J. (dir.). Actes du colloque « La politique et la gestion des risques : vues françaises et vues britanniques », 8 février 2007, Paris. Paris : L'Harmattan, 2007, pp. 10-16.

**BOLVIN C., FARRET R., SALVI O.**

Convergence towards integrated risk management : results from the european SHAPE-RISK project and other initiatives.

Proceedings of the 1st international conference on risk analysis and crisis response, 25-26 September 2007, Shanghai, China.

2008**ALBINET A., LEOZ-GARZIANDIA E., BUDZINSKI H., VILLENAVE E., JAFREZZO J.L.**

Nitrated and oxygenated derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of two French alpine valleys. Part 1: Concentrations, sources and gas/particle partitioning.

Atmospheric Environment, 2008, vol. 42, n° 1, pp. 43-54.

ALBINET A., LEOZ-GARZIANDIA E., BUDZINSKI H., VILLENAVE E., JAFREZZO J.L.

Nitrated and oxygenated derivatives of polycyclic aromatic hydrocarbons in the ambient air of two French alpine valleys. Part 2: Particle size distribution.

Atmospheric Environment, 2008, vol. 42, n° 1, pp. 55-64.

ROUSSEL H., CHAUVET E., BONZOM J.M.

Alteration of leaf decomposition in copper-contaminated freshwater mesocosms.

Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, vol. 27, n° 3, pp. 637-644.

GUILLAUME B., LIOUSSE C., GALY-LACAUX C., ROSSET R., GARDRAT E., CACHIER H., LEGRAND M., BESSAGNET B., POISSON N.

Modeling exceptional high concentrations of carbonaceous aerosols observed at pic du Midi in spring-summer 2003.

Atmospheric Environment. [Accepté pour publication].

CARDENAS G., PERDRIX E.

Automatic mapping algorithm of nitrogen dioxide levels from monitoring air pollution data using classical geostatistical approach: application to the French Lille city.

SOARES A., PEREIRA M.J., DIMITRAKOPOULOS (Eds.). *Geo ENV VI - Geostatistics for environmental applications: proceedings of the 6th international conference on geostatistics for environmental applications, 25-27 October 2006, Rhodes, Greece. Springer, 2008, pp. 95-101.*

HONORE C., ROUIL L., VAUTARD R., BEEKMANN M., BESSAGNET B., DUFOUR A., ELICHEGARAY C., FLAUD J.M., MALHERBE L., MELEUX F., MENUT L., MARTIN D., PEUCH A., PEUCH V.H., POISSON N.

Predictability of European air quality: assessment of 3 years of operational forecasts and analyses by the PREV' AIR system.

Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 2008, vol. 113, n° D4, art. D04301.

GUERIT I., BOCQUENE G., JAMES A., THYBAUD E., MINIER C.

Environmental risk assessment: a critical approach of the European TGD in an *in situ* application.

Ecotoxicology and Environmental Safety. [Accepté pour publication].

PERE J.C., PONT V., MALLET M., BESSAGNET B.

Mapping of PM10 surface concentrations derived from satellite observations of aerosol optical thickness over South-Eastern France.

Atmospheric Research. [Accepté pour publication].

MOUCHET F., DENYS S., MAROT F., DOUAY F., PINET C., POURRUT B., ROUSSEL H., VIMONT V., DUMAT C.

Évaluation de la contamination de plantes potagères cultivées dans un environnement potentiellement pollué : contexte actuel et propositions d'outils opérationnels.

Environnement Risques & Santé, 2008, vol. 7, n° 3, pp. 203-208.

BADREDDINE R., BRUNEL C., MUNOZ M., DESTRIGNEVILLE C.

Assessment of long term mining waste behavior by a dynamic leaching test: application to contrasted physico-chemical conditions.

Proceedings of the 2nd International conference on engineering for waste valorisation, 3-5 June 2008, Patras, Greece.

DABO D., BADREDDINE R., DROUADAINE I., DE WINDT L.

Evaluation of the environmental impact of MSWI bottom ash reused in road construction : a ten year field experimentation.

Proceedings of the 2nd International conference on engineering for waste valorisation, 3-5 June 2008, Patras, Greece.

QUIOT F., ROLLIN C., BOUR O., JORDANA S., SCHWARTZ J., GOBLET P.

Chlorinated solvents transport and natural attenuation modeling in groundwater.

Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO conference on soil-water systems: CONSOIL 2008, 3-6 June 2008, Milano, Italy. [Poster].

BONNARD R., BOUR O.

Comparison of lead concentration in surface soil by induced coupled plasma/optical emission spectrometry and X-ray fluorescence.

Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO conference on soil-water systems: CONSOIL 2008, 3-6 June 2008, Milano, Italy. [Poster].

MANGERET A., ROLLIN C., KERGARAVAT O., ATTEIA O.

Comparisons of degradation kinetics of chloroethenes in groundwater between microcosms and field scale.

Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO conference on soil-water systems: CONSOIL 2008, 3-6 June 2008, Milano, Italy. [Poster].

CABOCHE J., DENYS S., TACK K., FEIDT C.

Bioaccessibility and speciation of As and Pb in soils contaminated by two distinct anthropic activities.

Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO conference on soil-water systems: CONSOIL 2008, 3-6 June 2008, Milano, Italy.

HAZEBROUCK B., BAUMONT G., LEGOUT C., MAROT F.

A guide and a toolbox for public involvement in the assessment and the management of contaminated sites.

Proceedings of the 10th International UFZ-Deltares/TNO conference on soil-water systems: CONSOIL 2008, 3-6 June 2008, Milano, Italy.

GLORENNEC P., BONVALLOT N., MANDIN C., GOUPLI G., PERNELET-JOLY V., MILLET M., FILLEUL L., LE MOULLEC Y., ALARY R.

Is a quantitative risk assessment of air quality in underground parking garages possible ?

Indoor Air, 2008, vol. 18, pp. 283-292.

JANES A., CHAINEAUX J., CARSON D., LE LORE P.A.

MIKE 3 versus HARTMANN apparatus: comparison of measured minimum ignition energy (MIE).

Journal of Hazardous Materials, 2008, vol. 152, n° 1, pp. 32-39.

LE COZE J.C.

Disasters and organisations: from lessons learnt to theorising.

Safety Science, 2008, vol. 46, n° 1, pp. 132-149.

DEEVY M., SINAI Y., EVERITT P., VOIGT L., GOBEAU N.

Modelling the effect of an occupant on displacement ventilation with computational fluid dynamics.

Energy and buildings, 2008, vol. 40, n° 3, pp. 255-264.

DEEVY M., STEWART J.R., REN Z., GOBEAU N., SAUNDERS C.J.

A comparison of a range of models for dispersion in a partially stratified room.

Environmental Modelling & Software, 2008, vol. 23, n° 4, 2008, pp. 511-519.

BROHEZ S., MARLAIR G., DELVOSALLE C.

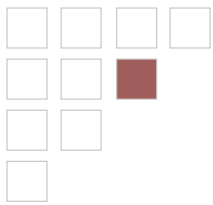
The effect of oxygen concentration on CO and soot yields in fires.

Fire and Materials, 2008, vol. 32, n° 3, pp. 141-158.

MERAD M., RODRIGUES N., SALVI O.

Urbanization control around industrial SEVESO sites: the French context.

International Journal of Risk Assessment and Management, 2008, vol. 8, n° 1-2, pp. 158-167.

**FAYET G., JOUBERT L., ROTUREAU P., ADAMO C.**

Theoretical study of the decomposition reactions in substituted nitrobenzenes.

Journal of Physical Chemistry A, 2008, vol. 112, n° 17, pp. 4054-4059.

MEBARKI A., NGUYEN Q.B., MERCIER F., AMI SAADA R., REIMERINGER M.

Reliability analysis of metallic targets under metallic rods impact: Towards a simplified probabilistic approach.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, vol. 21, n° 5, pp. 518-527.

BENAISSA W., GABAS N., CABASSUD M., CARSON D., ELGUE S., DEMISSY M.

Evaluation of an intensified continuous heat-exchanger reactor for inherently safer characteristics.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, vol. 21, n° 5, pp. 528-536.

GAUCHER R., DOLLADILLE O.

Conventions on multi-operator sites: an efficient risk management tool.

Proceedings of the AIChE spring national meeting, 6-10 April 2008, New Orleans, USA.

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

Managing knowledge to improve industrial safety.

KAO T.M., ZIO E., HO V. (Eds.). *Proceedings of the 9th International conference on probabilistic safety assessment and management*, 18-23 May 2008, Hong-Kong, China. Edge Publication Group, 2008, 355 p.

LEGER A., DUVAL C., FARRET R., WEBER P., LEVRAT E., LUNG B.

Modeling of human and organizational impacts for system risk analysis.

KAO T.M., ZIO E., HO V. (Eds.). *Proceedings of the 9th International conference on probabilistic safety assessment and management*, 18-23 May 2008, Hong-Kong, China. Edge Publication Group, 2008, 355 p.

VECHOT L., BIGOT J.P., TESTA D., KAZMIERCZAK M., VICOT P.

Runaway reaction of non-tempered chemical systems: development of a similarity vent-sizing tool at laboratory scale.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008, vol. 21, n° 4-6, pp. 359-366.

MAUGER S., PERRETTE L., OLLIER Y., PETITFRERE C., BOUDALAA M.

A new testing facility to characterize ESD hazards in industrial baghouse filters.

Proceedings of the AIChE spring national meeting, 6-10 April 2008, New Orleans, USA.

LANTERNIER B., ADJADJ A.

Allocation de niveau d'intégrité de sécurité (SIL) requis conformément à la norme CEI 61511.

Revue Internationale sur l'Ingénierie des Risques Industriels, 2008, vol. 1, n° 1, pp. 34-45.

DUQUERROY P., GRUET P.

Lightning risk analysis: guidance for method selection.

Proceedings of the 29th International conference on lightning protection, 23-26 June 2008, Uppsala, Sweden.

ROUSSEAU A., GRUET P.

Practical approach for economic losses lightning risk evaluation.

Proceedings of the 29th International conference on lightning protection, 23-26 June 2008, Uppsala, Sweden.

MARLAIR G., ROTUREAU P., BREULET H., BROHEZ S.

Booming development of biofuels for transport: is fire safety of concern?

Fire and material. [Accepté pour publication].

AUFAUVRE L.

European directive 2007/23/EC on the placing on the market of pyrotechnical articles: are you concerned?

Proceedings of the 35th International pyrotechnics seminar, 13-18 July 2008, Fort Collins, USA, pp. 57-61.

MARLAIR G., BITEAU H., BRANKA R., TORERO J.

Extending the use of the fire propagation apparatus to qualify burning scenarios of energetic materials and oxidative properties of chemicals.

Proceedings of the 35th International pyrotechnics seminar, 13-18 July 2008, Fort Collins, USA, pp. 677-686.

FAYET G., ROTUREAU P., JOUBERT L., ADAMO C.

Quantitative structure-property relationship studies for predicting explosibility of nitroaromatic compounds.

Proceedings of the 35th International pyrotechnics seminar, 13-18 July 2008, Fort Collins, USA, pp. 669-676.

LE COZE JC., DUPRE M.

The need for translators and new models of safety. In Resilience engineering perspectives: remaining sensitive to the possibility of failure.

Erik Hollnagel (Editor), Christopher P. Nemeth (Editor), Sidney Dekker (Editor), 2008.

Risques liés à l'après-mine, aux stockages souterrains et risques naturels

2007**SOULEY M., BOULON M., RAHMANI I., THORAVAL A.**

Laboratory measurements of hydraulic exchanges and associated hydromechanical couplings between fracture and rock mass in the case of a sandstone.

RIBEIRO E SOUSA L., OLALLA C., GROSSMANN N. (Eds.). *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, pp. 327-330.

DUNNER C., CLEMENT C., BIGARRE P., MERRIEN-SOUKATCOFF V., GUNZBURGER Y. Natural and thermomechanical stress field measurements at the "Rochers de Valabres" Pilot Site Laboratory.

RIBEIRO E SOUSA L., OLALLA C., GROSSMANN N. (Eds.). *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, pp. 69-72.

TASTET J., CONTRUCCI I., KLEIN E., BIGARRE P., DRIAD-LEBEAU L.

Large-scale field experiment to calibrate microseismic source parameters applied to real-time monitoring of post-mining instabilities.

RIBEIRO E SOUSA L., OLALLA C., GROSSMANN N. (Eds.). *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. 2, pp. 1147-1150.

MERRIEN-SOUKATCOFF V., CLEMENT C., GUNZBURGER Y., DUNNER C.

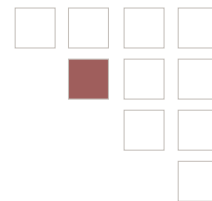
Thermal effects on rock slopes: case study of the "Rochers de Valabres" slope (France).

RIBEIRO E SOUSA L., OLALLA C., GROSSMANN N. (Eds.). *Proceedings of the 11th congress of the international society for rock mechanics*, 9-13 July 2007, Lisbon, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2007. (Specialized sessions).

CAUDRON M., EMERIAULT F., AL HEIB M.

Apport de la modélisation expérimentale et numérique à la compréhension du phénomène d'interaction sol-structure lors d'un fontis.

Proceedings of the 14th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, 24-27 September 2007, Madrid, pp. 943-948. [Poster].



GUEGUEN Y., DEFFONTAINES B., AL HEIB M., FRUNEAU B., DE MICHELE M., RAUCOULES D., GUISE Y., PLANCHENAUT J.
 Detection, Characterisation, of Residual Mining Subsidence Using SAR Interferometry. Application to Nord/Pas-de-Calais Coalmine.
 LACOSTE H., OUWEHAND L. (Eds.). *Proceedings of the Envisat Symposium 2007, 23-27 April 2007, Montreux, Switzerland. Noordwijk, The Netherlands: European Space Agency, 2007.*

DIDIER C., DAUPLY X.

MRPP: the french prevention procedure to manage post mining hazards.
 FOURIE A., TIBBETT M., WIERTZ J. (Eds.). *Proceedings of the 2nd International seminar on mine closure, 16-19 October 2007, Santiago, Chile. Nedlands, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2007, pp. 179-190.*

DIDIER C.

La politique française de prévention des risques liés à l'après-mine.
Réalités Industrielles - Annales des Mines, novembre 2007, pp. 86-97.

DIDIER C., DAUPLY X.

Le PPRM, clé de voûte de la politique française de prévention des risques miniers.
Réalités Industrielles - Annales des Mines, novembre 2007, pp. 74-85.

TOULHOAT P.

Nuclear waste disposal in deep geological formations: what are the major remaining scientific issues ?
 DUNN D.S., POINSSOT C., BEGG B. (Eds.). *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXX: Proceedings of the symposium NN, 26 November-2 december 2006, Boston, USA. Warrendale, USA: Materials Research Society, 2007. (Materials Research Society symposium proceedings, vol. 985).*

BELEM T., SOULEY M., HOMAND F.

Modeling surface roughness degradation of rock joint wall during monotonic and cyclic shearing.
Acta Geotechnica, 2007, vol. 2, n° 4, pp. 227-248.

MIMOUN A., THORAVAL A., PIGUET J.P.

Numerical modeling for cable bolting system under axial loading.
Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007, vol. 2, n° 9, pp. 1465-1469.

2008

CAUDRON M.

Mouvements de terrain et déformations d'un bâtiment consécutif à un fontis : approche expérimentale et numérique.
Revue Européenne de Génie Civil. [Accepté pour publication].

GUGLIELMI Y., CAPPÀ F., RUTQVIST J., TSANG C.F., THORAVAL A.

Mesoscale characterization of coupled hydromechanical behavior of a fractured-porous slope in response to free water-surface movement.
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, vol. 45, n° 6, pp. 862-878.

LIGNON S., LAOUAFA F., PRUNIER F., DARVE F., KHOA H.D.V.

Hydro-mechanical modelling of landslides with a material instability criterion.
Géotechnique. [Accepté pour publication].

PRUNIER F., NICOT F., DARVE F., LAOUAFA F., LIGNON S.

3D multi scale bifurcation analysis of granular media.
Mechanics of materials. [Accepté pour publication].

DRIAD-LEBEAU L., LOKMANE N., SEMBLAT J.F., BONNET G.

Local amplification of deep mining induced vibrations.
Part 1: Experimental evidence for site effects in a coal basin. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [Accepté pour publication].

MUDRY J., ANDREO B., CHARMOILLE A., LINAN C., CARRASCO F.

Some applications of geochemical and isotopic techniques to hydrogeology of the caves after research in two sites (Nerja Cave-S Spain, and Fourbanne system-French Jura).
International journal of Speleology, 2008, vol. 37, n° 1, pp. 67-74.

MAISON T., LAOUAFA F., FLEUREAU J.M.

Analyse microscopique des mécanismes de dessiccation et de gonflement des sols argileux.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 555-562.*

CHARRIERE D., POKRYSZKA Z., BEHRA P.

Cinétique de sorption du CO₂ dans le cadre du stockage géologique du CO₂ dans le charbon.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 297-304.*

LAOUAFA F., ARMAND G., KAZMIERCZAK J.B., MAISON T.

Modélisation tri-dimensionnelle avec phasage de l'intégralité du laboratoire expérimental de l'ANDRA.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 321-328.*

DRIAD-LEBEAU L., DAUPLY X., MERCERAT D.

Suivi d'une cavité saline jusqu'à son effondrement : analyse microscopique.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 313-320.*

AL HEIB M.

Influence de la déformation horizontale sur le bâti. Rôle d'une tranchée périphérique.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 159-166.*

CLEMENT C., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., DUNNER C., GUNZBURGER Y.

Estimation de l'incertitude sur les mesures de contraintes par sur-carottage dans un versant rocheux.
 THOREL L., SOUBRA A.H., DANO C., HICHER P.Y., GARNIER J., RIOU Y. (Eds.). *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, pp. 661-668.*



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 2008

Imprimé sur Symbol Freelifé 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 l'Aménagement
du Territoire.**



*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