

RAPPORT SCIENTIFIQUE 2006-2007

INERIS

*maîtriser le risque
pour un développement durable*

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques a pour mission de contribuer à la prévention des risques que les activités économiques font peser sur la santé, la sécurité des personnes et des biens, et sur l'environnement. Il mène des programmes de recherche visant à mieux comprendre les phénomènes susceptibles de conduire aux situations de risques ou d'atteintes à l'environnement et à la santé, et à développer sa capacité d'expertise en matière de prévention. Ses compétences scientifiques et techniques sont mises à la disposition des pouvoirs publics, des entreprises et des collectivités locales afin de les aider à prendre les décisions les plus appropriées à une amélioration de la sécurité environnementale. Créé en 1990, l'INERIS est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. Il emploie 561 personnes dont 317 ingénieurs et chercheurs, basés principalement à Verneuil-en-Halatte, dans l'Oise.

Sommaire

2 Avant-propos Georges Labroye, Directeur général

3 ■ **ÉDITORIAL** Pierre Toulhoat, Directeur scientifique

7 Orientations scientifiques et fonctionnement

8 ■ **AXES STRATÉGIQUES**

18 ■ **ÉVALUATION**

24 ■ **FINANCEMENT**

27 ■ **THÈSES**

28 ■ **PARTENARIATS**

29 Substances et produits chimiques

30 ■ La modélisation physiologique en toxicologie*

34 ■ Écotoxicologie : effets des perturbateurs endocriniens sur la reproduction chez le poisson*

37 ■ L'expertise de l'INERIS en toxicocinétique*

39 Risques technologiques et pollutions

TRANSFERT DES CONTAMINANTS

40 ■ Qualité de l'air et climat : la modélisation des aérosols atmosphériques*

46 ■ Contribution à l'évaluation de l'exposition d'enfants franciliens aux pesticides dans l'environnement intérieur*

49 ■ Application du laser à la caractérisation des nanoparticules dans l'air*

SYSTÈMES INDUSTRIELS COMPLEXES

52 ■ L'évolution des approches de la maîtrise des risques dans les infrastructures souterraines*

56 ■ Modélisation des systèmes instrumentés de sécurité*

58 ■ De l'humain dans le bayésien*

QUANTIFICATION DES PHÉNOMÈNES DANGEREUX

60 ■ Analyse stochastique de l'enchaînement catastrophique conduisant des fragments issus d'un accident industriel à impacter et à perforer des installations voisines*

64 ■ Aspects fondamentaux de la propagation de flamme dans les mélanges air-poussière*

PROCÉDÉS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

67 ■ La réglementation, la recherche en sécurité et le développement des nouvelles technologies*

70 ■ Typologie du risque d'incendie et d'explosion associée au cycle de vie des biocarburants*

74 ■ Approche méthodologique de l'évaluation des risques : articulation entre recherche européenne et appui aux pouvoirs publics*

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

79 ■ Effondrement de cavités souterraines et interactions sol-structure : développement d'un modèle expérimental*

82 ■ Caractérisation numérique et expérimentale de l'endommagement durant l'excavation d'une saignée et son reconfinement*

86 ■ Caractérisation hydromécanique des milieux rocheux fracturés en laboratoire et *in situ**

90 ■ Les Plans de Prévention des Risques Miniers*

93 Annexes

94 ■ Publications

104 ■ Sites Internet

* English summaries.

Avant-propos Georges Labroye



Georges Labroye,
Directeur général
de l'INERIS.

La dégradation de l'environnement, l'augmentation des risques sanitaires liés à la pollution deviennent chaque jour plus visibles, pour autant la croissance économique est indispensable à la vie des hommes. L'INERIS, par sa mission, fait siennes ces problématiques et mène des programmes de recherche pour faire face aux défis du développement durable. Les résultats de ses travaux répondent aux attentes sociétales et servent d'appui aux politiques publiques. Ils doivent également accompagner le besoin d'innovation des industriels dans le cadre de la recherche partenariale. Ce dernier impératif est d'ailleurs clairement affiché dans le Contrat d'objectifs de l'Institut, signé le 5 septembre 2006 pour la période 2006-2010. Des produits innovants peuvent ainsi voir le jour en répondant aux enjeux économiques tout en respectant l'environnement. C'est pourquoi, j'ai voulu que l'INERIS s'implique fortement dans les Pôles de compétitivité et inscrive, parmi ses priorités, la mise en place de la plate-forme d'essais CERTES, futur Centre européen de recherche sur les technologies de l'environnement et de la sécurité.

Un dialogue renouvelé entre la science et la société

Enfin, les connaissances acquises en recherche permettent à l'Institut de prendre part au débat citoyen. En effet, les inquiétudes générées par des thématiques nouvelles telles que les nanotechnologies, les perturbateurs endocriniens ou encore les nouvelles énergies nécessitent le développement d'un dialogue renouvelé entre la science et la société. Là encore l'Institut s'engage à y contribuer pour créer les conditions d'échanges favorables aux progrès technologiques.

The degradation of the environment and the increase in health risks linked to pollution are becoming more apparent every day, in so far as economic growth is indispensable to human life. As part of its fundamental role, INERIS has taken these problems on board and conducts research programmes to face the challenges of sustainable development. The results of its research work meet societal expectations and are used to provide support in determining national public policy. Its work must also support the need for innovation by industrial concerns within the scope of partnership research projects. This latter imperative is moreover clearly displayed in the Institute's Strategic Plan, signed on the 5 September 2006 to cover the period 2006-2010. Innovative products can thereby see the light of day while meeting economic challenges and at the same time respecting the environment. It is for this reason that I wanted INERIS to be closely involved in Competitiveness Clusters and to include, among its priorities, the set up of the CERTES test platform, the future European Research Centre for environmental and safety technologies. Finally, the knowledge acquired through research enables the Institute to take an active part in societal debates. In fact, the concerns generated by new themes such as nanotechnologies, endocrine disruptors or even new sources of energy necessitate the development of a renewed dialogue between science and society. Here again, the Institute is committed to making a contribution to create conditions for exchange that are favourable to technological progress.

Éditorial Pierre Toulhoat



Pierre Toulhoat,
Directeur scientifique
de l'INERIS.

Le Contrat d'objectifs 2006-2010 renforce la place de la recherche dans les activités de l'INERIS. La recherche à l'INERIS se décline sous trois formes. Tout d'abord, la recherche s'effectue dans le cadre de la subvention reçue en tant qu'opérateur de l'État (programme 189 de la LOLF). Cette subvention représente moins de 8% du budget de l'INERIS. Elle permet d'entretenir quelques équipes d'excellence et d'initier des projets exploratoires sur des thèmes liés notamment aux risques émergents ou aux risques liés à l'introduction de nouvelles technologies. L'INERIS est, par ailleurs, résolument engagé dans la recherche compétitive: il a soumis de nombreux projets au 6^e et maintenant 7^e PCRD européens, ainsi qu'à l'Agence Nationale de la Recherche et à d'autres « guichets » (ADEME, AFSSET...), avec un taux de succès tout à fait appréciable. L'INERIS peut ainsi doubler ses moyens, mais il reste limité par la nécessité d'abonder, par ses fonds propres, les projets retenus à l'ANR ou à l'Europe. Le développement de la recherche, vital pour l'INERIS, doit donc trouver de nouveaux moyens afin de renforcer la compétence et de garantir la taille critique de ses équipes de recherche, comme le soulignent régulièrement nos Commissions scientifiques (lire p.18). La recherche menée pour le compte de tiers, généralement des entreprises, permet d'assurer ce renforcement des équipes, tout en s'inscrivant dans une démarche de réponse à des besoins sociétaux et économiques. Ces trois aspects de la recherche représentent ensemble un quart des ressources de l'INERIS, mais nous devons continuer sur la voie de l'excellence pour convaincre nos tutelle et partenaires de nous aider à augmenter significativement la part de notre recherche, ceci au bénéfice notamment de l'expertise mise au service des pouvoirs publics et des industriels.

The 2006-2010 Strategic Plan reinforces the role played by research among INERIS' activities. These research activities are carried out under three main forms. Firstly, research is conducted thanks to State subsidies, which INERIS receives as a public operator. These funds represent less than 8% of INERIS' total revenues. They are mainly used to support top research teams and to initiate exploratory research projects, for instance research devoted to emerging risks or risks associated with new technologies. Secondly, INERIS is engaged in competitive research projects and has obtained a good success rate (around 35%) in the 5th and 6th EU framework programmes. The same success rate has been also obtained in the recent calls issued by the French National Research Agency (ANR), and other calls from various research programme agencies. Thanks to such efforts, INERIS' research revenues can be doubled, but its research activities are limited by INERIS' co-funding capacity. The necessary development of research activities has to find new sources of revenue, in order to increase its levels of expertise and to guarantee the critical size of its research teams. This necessity has been underlined by INERIS' scientific evaluation committees. Thanks to the development of third party research, in relation to societal or industrial needs, INERIS' research revenues represent 25% of total revenues, which enables skills and expertise to be maintained.

INERIS also invests in long-term topics, such as endocrine disruptors, understanding dangerous phenomena or the interpretation of weak signals for predicting catastrophic events. Large scale investments (ANIMEX, new generation animal testing facility, and CERTES, the experimental large scale test platform for industrial safety) are associated with these emblematic research programmes. Other research programmes are

L'INERIS investit ainsi de manière récurrente dans des thématiques à long terme, comme les perturbateurs endocriniens, la compréhension des phénomènes dangereux ou l'interprétation de signaux faibles pour la prévision. Les grands investissements (ANIMEX et CERTES) sont associés à ces programmes emblématiques des compétences de l'INERIS. D'autres programmes de recherche se caractérisent par des cycles plus courts, notamment ceux qui sont liés à la maîtrise des risques associés au développement de nouvelles technologies. Dans ce cas, après 3 ou 4 ans de recherche, les résultats peuvent être capitalisés pour l'expertise ou le développement technologique. L'Institut doit sélectionner de manière équilibrée ces deux types de programmes, tout en se projetant dans l'avenir, en anticipant l'émergence de nouveaux risques.

La cohérence d'ensemble de ces programmes de recherche s'articule autour des trois grands thèmes développés dans ce rapport. Ces thèmes de recherche correspondent à des sujets cruciaux et porteurs d'une forte attente sociétale. Ainsi, le premier thème vise à mieux comprendre les propriétés et le mode d'action des substances et produits chimiques et à en prévoir les conséquences sur la santé humaine et les écosystèmes. Le deuxième thème est consacré à l'étude des risques technologiques et des pollutions, pour évaluer et mieux maîtriser ces risques. Le troisième thème découle directement de l'héritage du CERCHAR dont est issu l'INERIS et aborde les risques liés à l'après-mine, aux stockages souterrains (hydrocarbures, CO₂, déchets) et les risques naturels. Ces activités de recherche entretiennent la capacité d'expertise au meilleur niveau, de même que cette capacité d'expertise est constamment nourrie par le retour d'expérience issu de la présence constante de l'INERIS sur le terrain, en prise avec la réalité quotidienne des installations ou des activités industrielles à risque. De même, la recherche plus amont conduite par l'INERIS produit de nouvelles connaissances qui se valorisent aisément sur des actions plus appliquées à destination des acteurs économiques s'inscrivant dans leur propre processus d'innovation et de développement.

characterised by shorter development cycles, namely those connected to technical innovation (industrial processes, energy systems, etc.). In this case, after 3 or 4 years, research results are used for expertise or sustainable technological development. A balance between long-term and shorter term research projects is necessary, together with a reasonable anticipation of emerging risks.

The overall consistency of INERIS research programmes is defined along three main themes, which are further illustrated in this report. These themes are connected to major societal expectations. Indeed, the first theme aims at a better understanding of the properties and action of chemicals and at predicting their consequences on human health and ecosystems. The second theme is devoted to the study of technological risks and pollution, for better evaluation and control. The third theme derives from a heritage of the CERCHAR (Research Institute of the French Coal Mining Industry, which formed the basis for the creation of INERIS, in 1990). It deals with post-mining activities, underground storage and disposal (hydrocarbons, CO₂, wastes) and natural hazards. These research activities maintain an expertise capability at its optimum level. In addition, this expertise capability is fed by experimental feedback, stemming from INERIS' daily presence in the field (industrial facilities, waste disposal, etc.). Basic research, conducted within INERIS, also produces new results, which are used in more applied activities, in response to the needs of economic actors, in the context of their own processes of innovation and development. Various examples will illustrate the links between research and expertise, and between basic and applied research.

In 2007, the newly elected French President decided to initiate a national debate on environment and sustainability.

Divers exemples illustrent dans ce rapport les liens entre recherche et expertise et entre recherche amont et recherche finalisée.

Les programmes de recherche de l'INERIS sont, pour la plupart, au cœur des grandes thématiques passées en revue lors du « Grenelle de l'Environnement » à l'été 2007. L'INERIS s'inscrit ainsi dans la lutte contre le changement climatique et la maîtrise de la demande d'énergie, en apportant des compétences spécifiques :

- modélisation du transport atmosphérique des polluants et aérosols, en prenant en compte les conséquences et effets du changement climatique ;
- évaluation et maîtrise des risques associés aux nouvelles filières : agrocarburants, captage et stockage du CO₂, hydrogène pour les transports, etc.

En ce qui concerne la préservation de la biodiversité et des ressources naturelles, l'INERIS est concerné à divers titres :

- approche écotoxicologique des atteintes à la biodiversité ;
- protection des ressources en eau, notamment à travers les actions menées dans le réseau AQUAREF, coordonné par l'INERIS, visant à établir des méthodes de référence pour l'analyse des substances prioritaires et des polluants émergents ;
- protection de la qualité des sols, évaluation des contaminations et procédés de remédiation des sites pollués.

L'INERIS est bien évidemment au cœur des recherches visant à instaurer un environnement respectueux de la santé :

- compréhension des effets des substances toxiques et nanoparticules, maîtrise de leurs impacts à travers l'application de dispositifs réglementaires (REACH, SGH), de procédés propres ou de substitution ;
- qualité de l'air intérieur et extérieur, maîtrise des impacts liés aux déchets.

Pour contribuer à l'émergence d'une démocratie écologique, l'INERIS a, depuis plusieurs années, développé des approches visant à une meilleure prise en compte des parties prenantes dans la gouvernance des risques et a contribué à l'implémentation de ces approches dans la mise en place des plans de prévention des risques (PPRN, PPRT et PPRM). L'Unité Gestion Sociétale des Risques, créée en 2005, a connu

The research programmes conducted at INERIS cover most topics to be dealt with in this debate.

Climate change and efficiently managing energy demand:

- modelling the atmospheric transport of pollutants, aerosols and fine particles, taking into account the effects of climate change, increasing pollution intensity and consequences;
- evaluation and control of risks associated with novel energy systems: biofuels, CO₂ capture and storage, hydrogen for transportation, etc.

Preservation of biodiversity and natural resources:

- ecotoxicological approaches to assess biodiversity damage caused by industrial activities;
- protection of water resources, thanks in particular to the involvement of INERIS in the creation of the AQUAREF reference network, the objective of which is to establish a set of reference analytical methods for priority and emerging pollutants;
- protection of soil quality, evaluation of contamination levels, and clean up of polluted land.

Preserving human health and the environment:

- understanding the toxicological effects of chemicals and nanoparticles, controlling their impact through the implementation of specific regulations, such as REACH or GHS), and through the promotion of cleaner substitution products or processes;
- quality of indoor and outdoor air, control of the health impacts of waste disposal.

In view of the promotion of an "ecological democracy", INERIS has developed approaches aiming at a better involvement of stakeholders in risk governance and has contributed to the implementation of these

un fort développement et de nombreux succès dans des projets européens ou à l'ANR, tout en étant très sollicitée en appui aux pouvoirs publics. Enfin, l'INERIS entretient une activité notable autour de l'évaluation économique des politiques environnementales et, lors de son séminaire du Conseil et des Commissions scientifiques (9 mai 2007), les perspectives de recherche dans ce domaine ont été recensées. Cette politique ambitieuse de développement de la recherche passe par le renforcement des compétences et de la reconnaissance des chercheurs de l'INERIS : les chercheurs seniors sont désormais vivement encouragés à candidater à l'habilitation à diriger des recherches. Ceci va de pair avec le renforcement des liens avec la recherche académique, qui s'exprime à travers des projets de recherche collaboratifs, impliquant souvent des jeunes chercheurs en doctorat ou post-doctorat. Dans ce domaine, l'INERIS, qui accueille 50 doctorants doit encore améliorer sa visibilité et son attractivité, à un moment crucial où chacun prend conscience de la nécessité absolue de repositionner le doctorat comme filière d'excellence pour la recherche et l'innovation, notamment en entreprise, la France accusant un retard inquiétant par rapport à la plupart des pays industrialisés.

L'INERIS poursuit une politique ambitieuse de valorisation de ses résultats scientifiques en augmentant régulièrement le nombre et l'impact de ses publications. En parallèle, l'INERIS veille à l'évaluation de ses programmes de recherche et de ses équipes par ses Commissions scientifiques. L'évaluation par les pairs permet de garantir en toute indépendance la qualité de nos travaux. Notre Conseil scientifique assiste et conseille la Direction de l'Institut sur sa stratégie de recherche. L'AERES (Agence d'évaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur), dont la mise en place opérationnelle est en cours, pourra naturellement s'appuyer, avec la meilleure efficacité possible, sur les structures d'évaluation actuelles et les fera évoluer si nécessaire.

approches in "risk prevention plans". A research and expertise unit, entitled "Societal management of risks" was created in 2005. In two years, this team has obtained many research grants (EU framework programmes and ANR) and is also frequently asked to provide its expertise and support to public bodies.

A significant activity in the field of economic assessment of environmental policies has been initiated and a recent workshop organised with the scientific council and commissions has allowed INERIS to draw on many different perspectives in this field of research and expertise.

Such an ambitious policy for the development of research activities requires a constant reinforcement of the expertise and external reputation of the research teams. Senior researchers are now strongly encouraged to apply for university diplomas enabling them to conduct research. This means that links between the Institute and universities or academic research centres have also to be reinforced, through collaborative research projects and by hosting an increasing number of doctoral students, or post docs in INERIS laboratories. Presently, around 50 PhD students are working in INERIS, but the Institute still has to increase its attractiveness and visibility in a situation (quite specific to France) in which a doctorate has to be re-assessed and repositioned as the best way for young students or engineers to begin a career in R&D and technological innovation.

The Institute is continuously increasing the number and impact of its publications, and, in parallel, regularly evaluates research programmes and teams, with the contribution of its three scientific commissions. External peer-reviews assure independent evaluation. The scientific council assists and advises the general management of the Institute regarding its R&D strategy. A national scientific evaluation agency has recently begun to operate, and will rely on the present evaluation bodies.

Orientations scientifiques et fonctionnement



8

AXES STRATÉGIQUES

- Point sur les nanoparticules
- Un contexte en pleine évolution : l'expertise dans l'Europe à 27
- ANIMEX/ANTIOPEs
- CERTES
- CENARIS

18

ÉVALUATION

- De la recherche
- Le Conseil scientifique
- Les Commissions scientifiques
- Comment voyez-vous évoluer la recherche à l'INERIS?

24

FINANCEMENT

- Les programmes de recherche de l'INERIS

27

THÈSES

- Une nouvelle politique de gestion

28

PARTENARIATS

- Accords-cadres et structures en partenariat

Point sur les nanoparticules

1



Détection de la présence de nanoparticules dans l'air par laser à impulsion.

2



Mesure de l'énergie minimale d'inflammation d'un nuage de poussières.

La capacité de travailler la matière à l'échelle du nanomètre – le millionième de millimètre – offre des perspectives considérables. Qu'il s'agisse de nano-objets (composants électroniques, par exemple) ou de relargage des composants nanométriques de matériaux (vêtements, pneus, matériaux de construction), des particules de taille nanométrique, les nanoparticules viennent polluer l'environnement. Cette pollution s'ajouterait à des nanoparticules de combustion déjà très présentes dans l'environnement.

Face aux nombreuses questions sociétales que pose le développement des nanotechnologies, des programmes de recherche sont mis en place pour anticiper et prévenir les éventuels risques en matière de santé et d'environnement. L'INERIS participe à plusieurs de ces programmes qui ont notamment pour finalité de contribuer au développement des méthodes de mesure et à l'acquisition de connaissances en expologie, toxicologie, écotoxicologie et sur les risques d'incendie et d'explosion.

MÉTROLOGIE

L'INERIS a développé une instrumentation utilisant une technique optique pour répondre à un double besoin :

- sécuriser un procédé de fabrication,
 - garantir une qualité constante de production de nanoparticules (taille, composition chimique).
- Il s'agit de la technique LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) reposant sur l'analyse spectrale d'un plasma généré par une impulsion laser intense. Elle permet de détecter la présence de nanoparticules manufacturées dans l'air, par leur identification chimique résolue en taille. Cette technique possède des limites de détection de l'ordre du nanogramme par mètre cube et permet

de détecter des particules dont la taille va de quelques nanomètres à quelques micromètres.

Elle permet aussi un suivi sur la ligne de production de la stœchiométrie des nanoparticules. C'est l'objet de la collaboration établie avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) sur une unité pilote de production de nanoparticules de silicium par pyrolyse laser.

Avec le développement de cette technique, l'INERIS a démontré la faisabilité d'une métrologie adaptée à la sécurisation et à la fiabilisation des procédés de fabrication des nanoparticules.

EXPOLOGIE

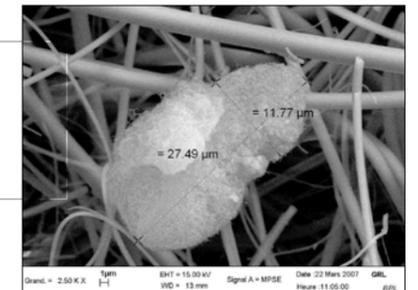
On peut globalement distinguer **deux types d'exposition de la population** aux nanoparticules manufacturées :

- d'une part, les expositions que l'on peut qualifier de directes : les nanomatériaux sont présents dans les produits courants que sont les produits d'hygiène corporelle, les médicaments, les emballages alimentaires, les vêtements et textiles, les prothèses médicales...
- d'autre part, les expositions indirectes aux nanoparticules ou nano-objets se retrouvant *in fine* dans l'environnement consécutivement à l'usure, à la dégradation ou à la fin de vie des biens faits de nanomatériaux, par exemple, dans les pneus, les encres, les essences, les appareils électroniques, les textiles ou bien encore les traitements de vitrages, les panneaux solaires...

Il n'a pas été trouvé dans la littérature d'évaluation des risques sanitaires au sens strict de la démarche. Des enquêtes ont été menées et des nouvelles méthodes de mesure sont développées à l'INERIS pour caractériser les expositions humaines. Soit dans l'atmosphère urbaine (comptages

Agglomérat de nanotubes de carbone.

3



des particules ultrafines) en partenariat avec le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA) et Airparif, dans le cadre de programmes de recherche nationaux, soit dans l'air intérieur en partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), dans le cadre du programme NANOP.

TOXICOLOGIE

L'INERIS mène différents travaux pour évaluer la toxicité et le devenir dans l'organisme de nanotubes de carbone et de nanoparticules de natures diverses.

In vitro

Toxicité pulmonaire (nanotubes et nanoparticules)

Le programme européen Nanosafe 2 vise, entre autres, à développer et à valider des tests de toxicité pulmonaire *in vitro*. Il s'agit de déterminer la cytotoxicité (capacité à provoquer des altérations cellulaires) de différents types de nanomatériaux (nanoparticules et nanotubes de carbone) et leur capacité à induire une réponse cellulaire de type nécrotique ou apoptotique (mort cellulaire). Les premiers résultats montrent que les nanotubes de carbone et certaines nanoparticules métalliques (noir de carbone, dioxyde de titane, aluminium, cobalt, acier) semblent peu cytotoxiques. En revanche, les nanoparticules à base de cuivre, de zinc et d'argent montrent une cytotoxicité importante.

D'autres travaux (programme Nanotox) quantifient l'effet taille : les nanoparticules d'oxyde d'aluminium de 2-4 nm induisent un effet toxique plus important sur les cellules que celles plus grandes (de 40 à 47 nm). La toxicité sur la cellule prédit mal l'effet sur l'organisme, d'où une série de travaux à d'autres échelles du vivant.

Neurotoxicité (nanoparticules)

Le système nerveux central est protégé par la barrière hémato-encéphalique (BHE), contrôlant les échanges entre milieux circulants et cellules cérébrales. La question du passage des nanoparticules à travers la BHE se pose car divers travaux ont montré que des particules pouvaient migrer vers le cerveau *via* les nerfs olfactifs. En collaboration avec l'Inserm, l'Unité de Toxicologie Expérimentale de l'INERIS a mis au point un modèle de BHE *in vitro* pour étudier la toxicité potentielle des nanoparticules et leur capacité à franchir cette barrière. Ce modèle utilise des cellules de rat (astrocytes et cellules endothéliales pour mimer les interactions existant dans l'organisme au droit de la BHE). Les premiers travaux ont porté sur des particules d'oxyde de silicium (10 nm), d'oxyde de fer (20 à 30 nm) et d'oxyde d'aluminium (2 à 4 nm et 40 à 47 nm). Ces particules induisent une cytotoxicité sur les cellules de la BHE, sans effet-dose démontré. Le rôle de la taille des particules est ici confirmé puisque, comme précédemment, les nanoparticules d'aluminium de 2-4 nm apparaissent plus toxiques que celles de 40-47 nm. Bien qu'une mortalité cellulaire ait été observée, il n'a pas été montré d'effet sur l'intégrité de la barrière hémato-encéphalique. Toutes ces particules induisent un stress oxydant plus ou moins marqué, qui est très important pour les nanoparticules d'oxyde de fer. Ces résultats préliminaires doivent être complétés pour augmenter le nombre de données par groupe et permettre une meilleure analyse statistique.

In vivo

Nanotubes de carbone

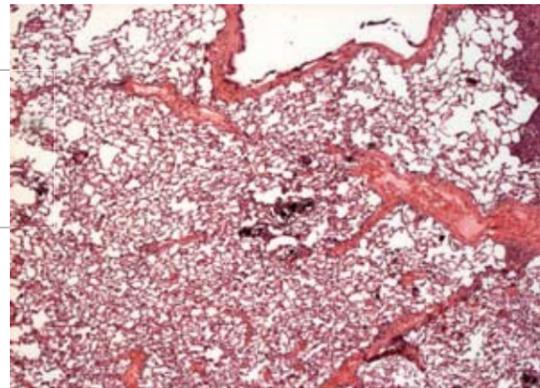
Le programme Nanoris s'attache à déterminer les effets induits par les nanotubes de carbone chez l'animal en identifiant la biodistribution, la biopersistance de phénomènes anatomopathologiques, l'inflammation

et l'apoptose au niveau pulmonaire. L'identification des enzymes et des voies de signalisation cellulaire capables de conduire à l'élimination des nanotubes de carbone est également recherchée. Les premiers résultats montrent que les nanotubes de carbone induisent une inflammation légère, dépendante de la dose, au lendemain d'une exposition pulmonaire unique à 1, 10 ou 100 µg de nanotubes. Le suivi des animaux à plus long terme montre le développement de granulomes dès sept jours après l'exposition. L'élimination pulmonaire des nanotubes semble se faire lentement. Un mois après l'exposition, on retrouve dans les poumons une quantité similaire à celle instillée chez les animaux. Au bout de trois mois, persiste encore environ la moitié des nanotubes. Les travaux se poursuivent pour déterminer le devenir de ces nanotubes (élimination ou migration vers d'autres organes). Ce projet de recherche est complété par un programme financé par l'ANR (RespiNTox), qui vise à mettre au point un système d'inhalation des nanotubes de carbone destiné à se placer au plus près des conditions réelles d'exposition. Ce programme est réalisé en collaboration avec l'Inserm notamment.

Nanoparticules

Concernant les nanoparticules, l'INERIS participe à un second programme ANR (Nanotox), visant à mesurer l'impact d'une exposition à des nanoparticules carbonées, sur des animaux présentant une pathologie respiratoire de type allergique. Grâce à un financement additionnel du ministère chargé de l'Écologie (programme 189), l'étude sera étendue également au système nerveux central (tests comportementaux) et aux fonctions de reproduction, pour lesquels aucune donnée sur les effets liés à une exposition aux nanomatériaux n'est à ce jour disponible.

4



Coupe histologique d'un poumon de rat exposé à des particules diesel.

In silico

(Travaux de modélisation)

Des modèles pharmacocinétiques physiologiques sont développés pour permettre l'extrapolation à l'homme des résultats obtenus chez l'animal. Ces modèles regroupent en « compartiments » les tissus et organes du corps ayant des caractéristiques cinétiques identiques. Ils permettent d'étudier le devenir des substances dans l'organisme. En collaboration avec l'Inserm et l'Université catholique de Louvain, dans le cadre du programme européen Nanosafe 2, il est prévu le développement de modèles numériques permettant d'intégrer, à des fins de validation, les résultats des tests de toxicité *in vitro* obtenus dans le cadre de ce projet mais également les résultats d'études de distribution réalisées chez l'homme ou l'animal. Ces données seront ensuite transposées à l'homme pour une évaluation prédictive de la toxicité ou l'innocuité de ces nouveaux matériaux pour la santé.

ÉCOTOXICOLOGIE

L'INERIS participe à des programmes de recherche qui ont pour objectifs, d'une part, l'évaluation des expositions environnementales (voies de rejet, quantités rejetées, compartiments cibles et comportement dans les compartiments); et d'autre part, la mise au point de méthodologies d'évaluation du risque environnemental. À l'INERIS, deux types d'essais standardisés ont été appliqués: l'inhibition de la mobilité des daphnies et l'inhibition de la croissance d'algues pour l'étude de nanoparticules d'oxydes de zinc

et de titane. Les résultats montrent une écotoxicité faible. Mais les nanoparticules s'agglomèrent et les agglomérats ont une taille de l'ordre du micron. *In fine* les daphnies ne sont pas exposées à des nanoparticules. Des nouveaux dispositifs et protocoles sont à développer.

LE RISQUE D'INCENDIE ET D'EXPLOSION

Au risque sanitaire lié à la toxicité des nanoproducts, s'ajoutent les risques d'incendie et d'explosion comme pour les poussières « plus traditionnelles ». Dans le cadre du programme Nanosafe 2, l'INERIS étudie les conditions de sécurisation des installations de production vis-à-vis de ces risques. Trois types de particules ont été choisies pour leur importance industrielle et stratégique: il s'agit du noir de carbone, des nanotubes de carbone (NTC) et des nanoparticules d'aluminium. Les paramètres d'inflammabilité et d'explosibilité ont été déterminés par les techniques usuelles. Contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la diminution de la taille n'entraîne pas systématiquement une augmentation de la sévérité de l'explosion. Mais il est difficile d'extrapoler les résultats obtenus avec des micropoudres aux nanopoudres car elles ont tendance à s'agglomérer. Un des principaux enjeux sera donc de proposer de nouvelles techniques permettant d'évaluer les caractéristiques d'explosion dans des conditions de dispersion véritablement nanométriques.

AXES STRATÉGIQUES

Un contexte en pleine évolution: l'expertise dans l'Europe à 27

À l'heure où l'Espace Européen de la Recherche ^[1] est en pleine consolidation, où l'Institut Européen de Technologie (EIT) ^[2] prend forme, les rôles et les missions des organismes de recherche nationaux sont en pleine mutation. L'expertise est devenue pluridisciplinaire et collective. En particulier sur les sujets sensibles à forts enjeux sociétaux, les spécialistes en charge de l'appui technique aux autorités publiques ou aux industriels non seulement se doivent d'être reconnus par leurs pairs, mais pis encore, seuls ceux dont la notoriété est incontestablement légitime ont le droit de formuler des avis. D'ailleurs, les autorités ou les industriels n'hésitent pas à aller chercher les experts en dehors des frontières nationales pour obtenir un avis incontestable. Par ailleurs, l'Europe à 27 ne peut pas se permettre d'avoir un organisme spécialisé pour chaque thématique à fort enjeu sociétal. En créant, dans le 6^e PCRD, les projets intégrés et les réseaux d'excellence, Philippe Busquin et son successeur Janez Potocnik ont mis en place les outils pour défrayer l'Europe de la Recherche et optimiser l'investissement des États membres dans la connaissance et l'innovation. En outre, pour l'établissement d'un processus de pilotage de la recherche communautaire, la Commission européenne, avec le soutien du Parlement et du Conseil, a créé les Plates-formes technologiques européennes qui ont un effet structurant sur une trentaine de thèmes prioritaires pour la construction d'une Europe dont la compétitivité doit se baser sur la connaissance et l'innovation technologique. Les Plates-formes constituent un outil puissant qui permet de coordonner la recherche entre les États membres et l'industrie. Elles concrétisent un souhait

de la Commission de piloter la recherche communautaire tout en ne dépensant que 4 % du budget total investi.

ÉVOLUTION DES MISSIONS

La mission de l'INERIS, ancrée dans son décret de création, est notamment d'assurer un appui technique aux pouvoirs publics sur les questions de sécurité environnementale. Dans un contexte changeant, la mission de l'INERIS, institut national, doit également évoluer. L'INERIS a donc entrepris plusieurs actions de fond pour devenir un acteur de dimension internationale et reconnu par ses pairs. L'Institut a fait évoluer son positionnement scientifique vis-à-vis de l'industrie. Une transition s'opère pour passer d'un rôle d'organisme d'évaluation à un rôle d'accompagnement de l'innovation technologique pour qu'elle soit d'emblée plus propre et plus sûre (dès la conception). Nous rapprocher de l'industrie innovante, conceptrice des technologies de demain nous permet d'être pro-actifs dans notre contribution au développement durable aux risques maîtrisés. La recherche partenariale sur le thème de la sécurité environnementale apporte une efficacité de l'investissement de recherche et accroît le bénéfice pour l'ensemble des parties prenantes.

UNE POSITION D'ACTEUR INCONTOURNABLE EN SÉCURITÉ ENVIRONNEMENTALE

Aussi, depuis cinq ans, l'INERIS a largement développé son activité européenne pour devenir un acteur européen majeur en sécurité environnementale. La politique de réponse aux appels à projets du 6^e PCRD a porté ses fruits. On a pu observer une augmentation du nombre et du volume des projets européens (voir tableau page 13). De même,



L'ETPIS a présenté le 7 février 2006, à Bruxelles, son agenda de recherche stratégique.

1

RÉFÉRENCES

- [1] Lacroix G., Rogerieux F., "Time course of TiO₂ and carbon black nanoparticles induced pulmonary inflammation in rats". 44th Congress of the European Society of Toxicology, 7-10 October 2007, Amsterdam, Pays-Bas.
- [2] Munoz F., Vignes A., Perrin L., Dufaud O., Laurent A., Thomas D., Bouillard J., « Comment assurer la sécurité d'un laboratoire utilisant des nanoparticules? ». 11^e Congrès SFGP 2007, 9-11 octobre 2007, Saint-Étienne, France.
- [3] Mandin C., Ji X., Ramalho O., Le Bihan O., Paireon J.C., Martinon L., Bard D., "Measuring levels, assessing determinants and variabilities of nanoparticles concentrations in residential environment, the NANOP project". 17th annual conference of the international society for exposure analysis, 14-18 October 2007, Durham, USA.

des contrats nouveaux ont été signés avec des services de la Commission européenne (DG ENV sur la directive-cadre sur l'eau...) et l'Agence Spatiale Européenne et l'on observe une demande de partenariat scientifique de groupes multinationaux à la recherche d'une expertise reconnue à l'international (c'est le cas de l'accord-cadre de R&D signé fin 2005 avec EDF).

L'INERIS a investi sur plusieurs réseaux qui lui permettent de développer sa notoriété et de générer de l'activité partenariale (projets et contrats) dans les domaines :

- de l'environnement : ENERO (European Network of Environmental Research Organizations, www.enero.eu) ;
- des procédés : EPSC (European Process Safety Centre, www.epsc.org) ;
- de l'analyse des risques sociétaux : SRA (Society for Risk Analysis, www.sra.org et www.sraeurope.org) ;
- des risques en milieu souterrain : L-surF (Large Scale Underground Research Facility, www.l-surf.org) ;
- de l'expérimentation en grand : CERTES, NEXIS.

En outre, l'INERIS a été à l'initiative de la création de la Plate-forme technologique européenne en sécurité industrielle [1] (European Technology Platform for Industrial Safety, www.industrialsafety-tp.org) qui permet de structurer les échanges avec la Commission européenne et l'industrie et de faire apparaître des sujets de recherche prioritaires soutenant les activités en sécurité industrielle. ETPIS est un succès. Elle rassemble et coordonne les ressources au niveau national, grâce à la mise en place des plates-formes miroirs nationales.

UNE EXPERTISE AU SERVICE DE LA SOCIÉTÉ

Dans la continuité des actions menées et rappelées ci-dessus, l'INERIS a été à l'origine de la création d'une entité à visibilité européenne qui lui permet de participer à la construction d'une expertise européenne en sécurité environnementale.

Cette structure est l'Institut européen pour une gestion intégrée des risques (European Virtual Institute for Integrated Risk Management – EU-VRI, <http://www.eu-vri.eu>). Il s'agit d'un groupement européen d'intérêt économique (GEIE) qui permet de dynamiser la recherche collaborative européenne, principalement la recherche partenariale, et de proposer une expertise multidisciplinaire et collaborative vers les instances européennes et l'industrie.

Le statut juridique (GEIE) et le nom « **European** » donnent une dimension européenne évidente, renforcée par les nationalités des membres fondateurs (Allemagne, Belgique, France, Hongrie). Le concept de « **Virtual Institute** » a été créé par la Commission européenne dans le 5^e PCRD dans le programme Croissance (Growth) pour permettre le rapprochement durable d'entités. D'après les documents officiels présentant ce concept, les missions des instituts virtuels sont à la fois de mener des activités de service sur des bases commerciales et de promouvoir des activités de recherche et de dissémination.

Le GEIE EU-VRI a pour ambition d'être un acteur majeur européen dans le domaine de l'évaluation des risques, reflétant



Première assemblée générale du GEIE EU-VRI.

2

une expertise pluridisciplinaire européenne grâce à la notoriété et la complémentarité de ses membres. Il a pour ambition de devenir un institut de référence, interlocuteur privilégié de la Commission capable de mobiliser l'expertise de ses membres pour apporter des solutions innovantes dans le domaine des risques industriels. L'INERIS a conquis une position d'acteur scientifique incontournable sur le thème de la sécurité environnementale. Ce positionnement scientifique sur la scène internationale correspond à un axe stratégique de développement de l'Institut. Au final, les outils et les structures qui ont été mis en place permettent d'accroître la pertinence de l'expertise au profit de son ministère de tutelle, mais également de la faire converger vers les attentes de l'industrie et de la société.

PROGRAMMES EUROPÉENS DE L'INERIS

AU 1^{ER} JANVIER 2007

SHAPE-RISK*	Sharing experience on risk management (health, safety and environment) for future industrial systems
INTARESE	Integrated assessment of health risks from environmental stressors in Europe
HyApproval	Handbook for Approval of Hydrogen Refuelling stations
FEBUSS	Fuel cell energy systems standardised for large transport, busses and stationary applications
NF-PRO	Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies
L-surF	Design study for a large scale underground research facility on safety and security
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
IMPULSE	Integrated multiscale process units with locally structured elements
HYSAFE	Safety of hydrogen as an energy carrier
GEMS	Global and regional earth-system monitoring using satellite and in-situ data
NANOSAFE 2	Safe production and use of nanomaterials
VIRTUALIS	Virtual reality and human factors applications for improving safety
SOCOPSE	Source control of priority substances in Europe
SAPHIR	Controlled production of high tech multifunctional products and their recycling
HYCHAIN MINI-TRANS	Deployment of innovative low power fuel cell vehicle fleets to initiate an early market for hydrogen as an alternative fuel in Europe
2-FUN*	Full-chain and uncertainty approaches for assessing health risks in future environmental scenarios
GEOMON	Global earth observation and monitoring

* Programme coordonné par l'INERIS

RÉFÉRENCES

- [1] Green Paper on the "European Research Area" et la consultation des parties prenantes; http://ec.europa.eu/research/era/questionnaire_en.html
 [2] http://ec.europa.eu/education/policies/educ/eit/index_en.html
 [3] Third Status Report on European Technology Platforms "At the launch of FP7" (ISBN 92-79-02529-5); http://cordis.europa.eu/technology-platforms/home_en.html

LES MEMBRES FONDATEURS DE EU-VRI

Steinbeis Foundation et Steinbeis GmbH – Advanced Risk Technologies (STW R-Tech)	Allemagne
Technologica Group c.v.	Belgique
Bay Zoltán Institute (Foundation for Applied Research)	Hongrie
University of Stuttgart, ZIRN	Allemagne
Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques	France

ANIMEX/ANTIOPE

Le Plan National Santé-Environnement (PNSE) et les recommandations du Comité national d'évaluation de la recherche sur la « Recherche sur l'animal et santé de l'homme » ont insisté sur le besoin de développer la toxicologie à l'échelle nationale.

À l'échelle européenne, le règlement REACH exige l'évaluation des dangers de plusieurs dizaines de milliers de substances. Ni les outils scientifiques, ni les capacités d'étude et de recherche ne suffisent aujourd'hui à répondre à ce besoin. C'est pour faire face à ces enjeux que l'INERIS a proposé une infrastructure de recherche en toxicologie expérimentale: ANTIOPES.

Couplant les approches *in vitro*, *in silico* et *in vivo* et regroupant des moyens français de recherche en toxicologie environnementale pour construire les futurs outils de la toxicologie prédictive, ce réseau scientifique formera la base d'une infrastructure nationale de toxicologie expérimentale où l'évaluation du danger des substances chimiques dans l'environnement pour l'homme et l'animal est au centre de ses préoccupations. ANTIOPES mettra en commun et développera des équipements lourds et semi-lourds. Parmi ceux-ci, un projet expérimental sur l'organisme entier, ANIMEX, porté par l'INERIS, jouera un rôle clé. Des plates-formes pour les méthodes analytiques en biologie et pour la numérisation l'accompagneront. ANTIOPES permettra à la France de contribuer à la stratégie européenne, en particulier en répondant aux besoins des acteurs économiques.

LES DÉFIS DE LA TOXICOLOGIE PRÉDICTIONNELLE ET LA STRATÉGIE ANTIOPES

Les attentes vis-à-vis de la toxicologie prédictive sont multiples: prédiction de la nature des dangers des agents chimiques classiques ou émergents (perturbateurs endocriniens, nanoparticules ou champs électromagnétiques); prédiction des

niveaux de risque (relations dose-effet, etc.); bio-indicateurs pour la surveillance de la pollution.

ANTIOPES contribuera à la construction des outils et modèles de prédiction des dangers des substances pour l'homme et les espèces de l'environnement exigés par REACH. En utilisant de moins en moins les animaux, même sur des sujets complexes et critiques comme la cancérogenèse ou la reprotoxicité, ANTIOPES développera de nouveaux tests *in vitro* et approches de modélisation chimique prédictive (par exemple QSAR; Quantitative Structure Activity Relationship).

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 vivo-in vitro* nécessite de meilleurs fondements théoriques. L'accès à l'expérimental sur l'organisme entier est, à cet effet, indispensable dans une stratégie de couplage entre modèles *in vitro* et expérimentation *in vivo*.

À cette stratégie de rapprochement des équipes s'ajoute une stratégie expérimentale propre car l'exigence d'utilisation des méthodes alternatives dans le cadre de REACH doit amener à reconsidérer le rôle de l'expérimentation sur l'animal entier. ANTIOPES placera donc les approches *in vivo* non plus comme un outil de test mais comme un outil de consolidation des méthodes *in vitro* visant à évaluer le danger, pour l'homme, de l'exposition aux produits chimiques. Le projet expérimental sur l'organisme entier ANIMEX constituera ainsi un maillon clé pour l'étude du passage des effets aux échelles moléculaires et cellulaires aux effets systémiques. Le projet ANTIOPES devrait aboutir à la constitution d'un groupement d'intérêt scientifique en janvier 2008, accompagnée d'un colloque scientifique. ANIMEX devrait être opérationnel fin octobre 2010.

CERTES

La sécurité des installations industrielles doit être fondée sur un ensemble de connaissances relatives aux produits, procédés et équipements sans cesse actualisées. Elle doit également s'appuyer sur des systèmes technico-organisationnels de plus en plus robustes et intégrer une capacité mieux adaptée de réaction face aux situations d'urgence. Ces progrès doivent être évidemment appliqués aux futures installations mais aussi aux installations existantes. L'émergence de nouvelles technologies doit donc s'accompagner d'approches innovantes reposant sur des concepts de procédés propres et sûrs et d'une ingénierie globale de la maîtrise des risques et de la protection de l'environnement.

L'EXPÉRIMENTATION INCONTOURNABLE

Dans un tel contexte, le recours à des activités expérimentales est une composante fondamentale de cette démarche (cf. schéma p. 16). En effet, l'expérimentation est incontournable:

- pour produire des connaissances nouvelles sur les phénomènes, les produits et les procédés;
- pour vérifier les hypothèses faites à partir d'observations diverses et les théories proposées;
- pour valider et caler les modèles analytiques ou numériques permettant ensuite l'interpolation, l'extrapolation et la prévision;
- pour évaluer, calibrer ou certifier, des procédés, des matériels et des produits;
- pour permettre l'entraînement, la formation des intervenants, tester une organisation;
- pour tester des stratégies d'intervention et de gestion des situations d'urgence.

DE LA RECHERCHE À L'EXPERTISE

Couplées à la modélisation, aux « dire d'experts », au retour d'expérience, les approches expérimentales sont souvent une composante essentielle pour asseoir les hypothèses théoriques ou pour valider une démarche scientifique. Le recours à des approches expérimentales croisées (essais de laboratoire, essais sur maquettes ou « pilotes », essais en grand) est une voie de production de savoir tout particulièrement adaptée à la recherche en sécurité industrielle.

En expertise, aussi bien dans les études amont (prévention des risques) que celles faites après accident pour la recherche des causes, le recours à des essais (petite échelle, moyenne échelle, essais en grand) complète, valide ou conforte les résultats des modélisations ou dire d'experts. Il est aussi souvent indispensable pour appréhender la complexité des situations réelles.

RÉPONDRE À DES BESOINS SOCIÉTAUX

Enfin, le recours à des approches expérimentales, encore insuffisamment utilisées aujourd'hui, est un moyen adapté pour répondre à des besoins sociétaux aussi bien en formation/entraînement des différents acteurs que pour alimenter le débat public.

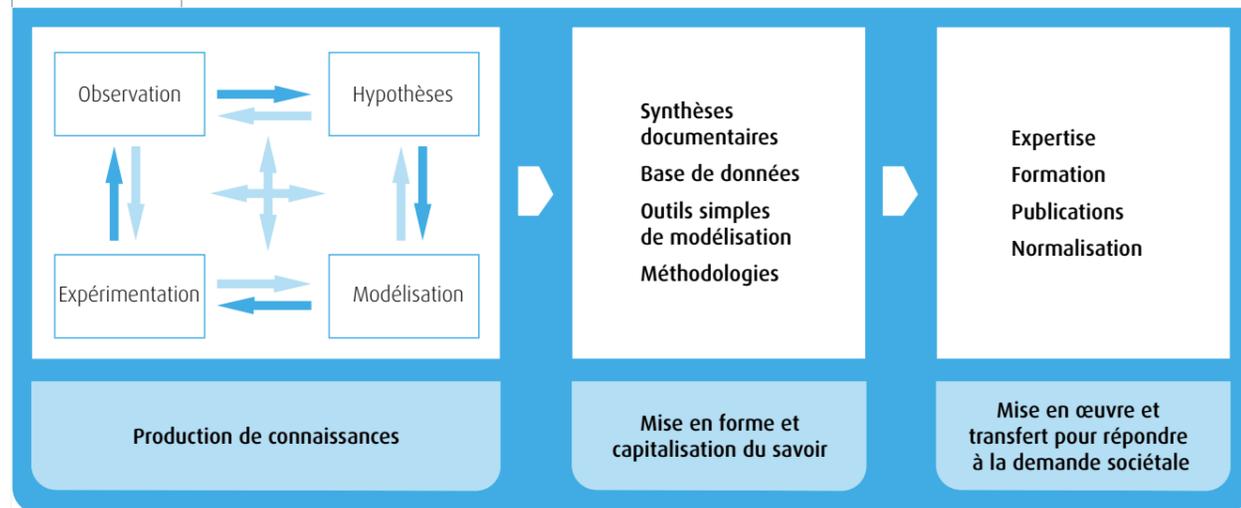
Ainsi, les principaux défis scientifiques en matière de sécurité industrielle auxquels les approches expérimentales peuvent apporter des réponses concrètes sont:

- produits: mieux connaître leur comportement en situation accidentelle;
- phénomènes accidentels et leurs impacts: acquérir de nouvelles connaissances pour développer des modèles qualifiés;
- procédés: réduire les risques

NOTES

1 - CERTES: Centre Européen de Recherche sur les Technologies de l'Environnement et de la Sécurité.

DE LA PRODUCTION DES CONNAISSANCES À LA VALORISATION



des procédés existants et développer des procédés propres et sûrs ;

- équipements de sécurité : acquérir des données sur les équipements actuels et favoriser l'émergence d'équipements innovants ;
- opérateurs : améliorer leurs performances dans des systèmes complexes à risques ;
- situations à risques : permettre aux différents opérateurs d'agir et de mieux se connaître pour être plus opérationnels en situation d'urgence ;
- nouvelles technologies énergétiques : intégrer la sécurité ;
- malveillance et sûreté : travailler en synergie avec la sécurité industrielle.

UNE GRANDE PLATE-FORME TECHNOLOGIQUE

Dans une logique de relance et de renforcement de ses capacités expérimentales, l'INERIS s'est engagé dans la construction d'une grande plate-forme technologique, le Centre Européen de Recherche sur les Technologiques de l'Environnement et de la Sécurité (CERTES). Ce projet associe plusieurs partenaires, dont l'Université de Technologie de Compiègne et le Service Départemental d'Incendie et de Secours de l'Oise et il est fortement soutenu par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables et les collectivités départementale et régionale.

Il vise notamment à favoriser la recherche partenariale et à faciliter le transfert

des connaissances dans les domaines de la sécurité industrielle, des technologies de l'environnement et de l'énergie, de la gestion des crises, ainsi que des technologies émergentes. Le CERTES, doté de moyens uniques en Europe, sera implanté en Picardie et totalement opérationnel à l'horizon 2012. Pour devenir un pôle reconnu au niveau international, il développera des réseaux de coopération et des alliances stratégiques avec des sites d'excellence complémentaires.

AXES STRATÉGIQUES

CENARIS



Dispositif de télésurveillance géotechnique installé sur la terrasse de la tour panoramique de Maxéville.

1



Station météorologique associée au dispositif de télésurveillance géotechnique installé sur la terrasse de la tour panoramique.

2



Station de mesure géotechnique installée sur le versant rocheux de Valabres.

3



Instrumentation sur le site de Valabres.

4

Depuis longtemps, l'INERIS réalise des surveillances opérationnelles de risques provenant du sol et du sous-sol et menaçant des personnes, des infrastructures et des biens. Ainsi, il conçoit, développe, construit et met en place des dispositifs techniques de surveillance et, au travers d'une organisation adaptée, il les exploite en continu pour le compte des pouvoirs publics ou d'industriels. Cette activité nécessite d'être à la pointe des connaissances dans ce domaine. La surveillance opérationnelle des risques du sol et du sous-sol s'applique à de nombreux domaines liés aux risques naturels (falaises, versants rocheux...) ou d'origine anthropique (cavités minières, anciennes carrières, stockages souterrains). La surveillance des phénomènes d'instabilité des terrains, tels que les effondrements localisés ou généralisés, les éboulements rocheux et les glissements de terrain, est basée sur la détection de facteurs déclenchants et de signes précurseurs dans des délais suffisants pour permettre d'anticiper efficacement le phénomène redouté. La mise en œuvre d'une surveillance contribue ainsi directement à diminuer la vulnérabilité des enjeux.

EN PRATIQUE

L'efficacité d'un dispositif de surveillance et d'alerte repose sur la capacité de son opérateur à :

- établir des valeurs seuils, liées aux mécanismes à l'origine du déclenchement de l'instabilité, à partir desquelles une action doit être entreprise qui peut déboucher sur l'évacuation des personnes menacées ;
- disposer d'une capacité d'expertise scientifique permettant, sitôt l'alarme déclenchée, de valider ou non, dans des délais généralement courts, l'occurrence imminente du processus catastrophique redouté ;
- maîtriser totalement le dispositif de surveillance d'un point de vue

météorologique et fonctionnel en faisant en sorte qu'il présente une fiabilité maximale pour en limiter les dysfonctionnements, pannes, fausses alarmes... L'identification des mécanismes gouvernant l'équilibre de la géostructure surveillée et des scénarios susceptibles d'en déclencher la rupture constitue un prérequis fondamental. Compte tenu de la nature souvent complexe des phénomènes d'instabilité géologique gravitaire, l'amélioration constante de la surveillance opérationnelle repose donc sur une activité continue de recherche et développement. Au-delà du bénéfice du retour d'expérience, la production de nouvelles connaissances scientifiques a pour enjeu de réduire les marges d'incertitude de l'expertise et de la prévision à court terme.

STRUCTURER

Le CENARIS – Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol –, organisation spécifique mise en place au sein de l'INERIS en 2004, a pour objectif de mieux structurer les activités d'expertise et de surveillance opérationnelles et les activités de recherche et développement en amont portant sur :

- l'architecture et les technologies de télémessure, capables de révéler les phénomènes déclenchants, de nature transitoire ou quasi statique, à l'échelle très locale ou régionale, en conditions d'accès souvent difficiles ;
- la physique des roches appliquée à l'étude de la stabilité de géostructures en milieux poreux, hétérogènes et fracturés, avec de forts gradients de contraintes. Une meilleure compréhension des couplages hydromécaniques constitue une voie de recherche majeure pour améliorer l'efficacité des systèmes de surveillance. Par ailleurs, les activités industrielles telles que l'exploitation de réservoirs d'hydrocarbures, le stockage géologique de déchets ou la séquestration de gaz à effet de serre soulèvent des questions scientifiques nouvelles. Au travers d'études et programmes de recherche spécifiques, l'INERIS est mobilisé par le développement de méthodes de surveillance appropriées, à vocation opérationnelle.

ÉVALUATION

De la recherche

1



Réunion de la Commission scientifique Risques Accidentels le 11 avril 2006.

2



Réunion de la Commission scientifique Risques du Sol et du Sous-sol en mars 2006.

NOTES

1 - ISI: Institute for Scientific Information.

L'INERIS dispose, depuis sa création, de ses propres instances d'évaluation de sa recherche. Après neuf ans de fonctionnement de ces entités, un arrêté du 20 décembre 1999 en a précisé les modalités, jusqu'ici inchangées, de constitution et de fonctionnement. L'orientation et l'évaluation scientifique sont assurées par un Conseil scientifique et trois Commissions scientifiques spécialisées. Ces quatre instances sont composées de personnalités appartenant au milieu académique, à des organismes pairs (EPIC, centres techniques...) ainsi qu'au monde industriel.

CONSEIL ET COMMISSIONS

Le Conseil scientifique a un rôle « stratégique ». Il se prononce sur l'intérêt, pour l'INERIS, de s'orienter vers tel ou tel domaine de recherche. Son éclairage est plus particulièrement utile lors de la préparation des contrats d'objectifs pluriannuels État-INERIS à laquelle il contribue par la formalisation des priorités scientifiques de l'Institut. Le Conseil donne également un avis global sur la production scientifique de l'Institut sur la base d'indicateurs académiques standards établis et communiqués par l'Institut: nombre total de publications, dont nombre d'articles dans des revues à comité de lecture, nombre de publications référencées par l'ISI... Les Commissions spécialisées, l'une traitant des risques chroniques, l'autre des risques accidentels et la troisième des risques du sol et du sous-sol, ont une activité d'évaluation plus « opérationnelle ». En effet, elles sont mises à contribution pour:

- conduire une évaluation *ex ante* des programmes de recherche que l'INERIS envisage de lancer dans le cadre de sa dotation budgétaire annuelle. En pratique, elles donnent ainsi chaque année leur avis sur la pertinence et la qualité de conception de 12 à 15 nouveaux programmes;
- évaluer les programmes de recherche achevés (évaluation *ex post*) ainsi que

produire un avis sur certains programmes en cours de réalisation;

- réaliser une évaluation, à tour de rôle, des différentes équipes opérationnelles constituant l'INERIS.

Ces évaluations sont encadrées par des documents et procédures spécifiques et les chercheurs de l'INERIS sont bien rompus à leur pratique, comme d'ailleurs ils sont lorsqu'ils proposent des projets de recherche à d'autres financeurs: près de 40% de la recherche sur fonds publics de l'INERIS en 2006 s'est faite dans un cadre concurrentiel (appels à projets de recherche de la Commission européenne et des agences et ministères français).

SÉMINAIRE

En plus des séances formelles que tiennent les instances d'évaluation de l'INERIS, l'ensemble de leurs membres sont chaque année invités à se réunir en séminaire pour réfléchir ensemble et orienter l'action de l'Institut dans sa recherche. Ces temps forts ont ainsi permis d'éclairer l'INERIS sur:

- la non-pertinence, pour lui, de se lancer dans l'étude des risques pour l'homme et l'écosystème liés au développement des bio-technologies mais, au contraire, celle de renforcer ses recherches sur les risques pour l'homme liés aux champs électromagnétiques (2001);
- son rôle en matière de recherche et développement dans le domaine des piles à combustible et dans l'approche socio-organisationnelle de la sécurité (2002);
- la diffusion des connaissances qu'il acquiert vers les différents acteurs de la société et sa contribution au développement durable (2003);
- la place de l'approche expérimentale (en particulier en grand) dans sa recherche ainsi que sa réflexion sur la perception sociétale des risques (2004);
- la formalisation de ses défis scientifiques et techniques en vue de la préparation du Contrat d'objectifs 2006-2010 (2005);
- le développement de la recherche finalisée qu'il conduit à destination des industriels (recherche partenariale) (2006);
- l'évaluation et la modélisation « avancée » des risques à leur limite (événements rares mais à fortes conséquences, risques faibles consécutifs à une exposition continue...) et la prise en compte des incertitudes associées (2007).

ÉVALUATION

Le Conseil scientifique

RENÉ AMALBERTI

Président

(jusqu'au 31 décembre 2006)
Docteur en médecine et psychologie cognitive
Chef du Département de recherche en sciences cognitives
Institut de Médecine Aérospatiale du Service de Santé des Armées (IMASSA)

EMMANUEL LEDOUX

Vice-président

Conseiller Scientifique - Directeur de Recherche
École des Mines de Paris

VÉRONIQUE BACH

Professeure des Universités
Physiologie Humaine
Pôle GBM « Périnatalité-enfance »
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
Pôle Santé et Biotechnologies
École Centrale de 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
Direction de la Recherche
Mission Relations Institutionnelles et Communication
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

Directeur 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

Professeure 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 »
CETP

Invités permanents au Conseil

Christian DELVOSALLE

Président de la Commission Risques Accidentels
Faculté Polytechnique de Mons

Patrick FLAMMARION

Président de la Commission Risques Chroniques
Institut National de la Recherche Agronomique

Jean-Louis DURVILLE

Président de la Commission Risques Sol et Sous-sol
Coordonnateur du collège « Génie civil et ouvrages d'art »
Conseil Général des Ponts et Chaussées

Ces listes ont été établies au 1^{er} septembre 2007.

Les Commissions scientifiques

“Risques Chroniques”

PATRICK FLAMMARION**Président**

Secrétaire général du collège de Direction
Institut National de la Recherche
Agronomique

SCOTT ALTMANN**Vice-président**

Direction Scientifique
Andra

JORGE-BERNARDO BOCZKOWSKI

Unité INSERM 700
Faculté Xavier Bichat

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 « Hydrosciences »
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, Centre de Méditerranée

HANS LUNDBERG

International Director
IVL Swedish Environmental
Research Institute

EMMANUEL MASSÉ

Chef du Bureau « Politique industrielle,
recherche et innovation »
Service des Politiques Publiques
Ministère de l'Économie, des Finances
et de l'Emploi

PIERRE MOSZKOWICZ

Directeur du LAEPSI
INSA

LAURENT ROSSO

Directeur
ENGREF

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
École Polytechnique

“Risques Accidents”

CHRISTIAN DELVOSALLE**Président**

Professeur
Faculté Polytechnique de Mons

JACQUES VALANCOGNE**Vice-président**

Responsable de l'Unité Maîtrise
des Risques Système
Département Présidence/Contrôle
Général de Sécurité
RATP

JEAN CHAPELAIN

Chargé de mission
ENSOSP

DENIS DUVAL

Chargé de mission à la Sécurité
Industrielle
Total

JEAN-MARIE FLAUS

Professeur des Universités
Laboratoire d'Automatique de Grenoble
ENSIEG

FRANCK GUARNIERI

Directeur
Pôle Cindyniques
École des Mines de Paris

JEAN-PAUL LACOURSIÈRE

Professeur
Département de Génie Chimique
Université de Sherbrooke (Québec)

MICHEL LLORY

Ingénieur consultant
Directeur de l'Institut du Travail Humain

LAURENT MAGNE

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

ABDELHAMID NAZIH

Service Sûreté Nucléaire
EADS ASTRIUM

LAURENT PERRIN

Maître de conférences
ENSIC

***CHRISTOPHE RENIER**

Directeur d'Objectifs Infrastructures
Gaz de France

ISABELLE SOCHET

ENSI de Bourges

RICHARD TURCOTTE

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

“Risques Sol et Sous-sol”

JEAN-LOUIS DURVILLE**Président**

Coordonnateur du collège « Génie civil
et ouvrages d'art »
Conseil Général des Ponts et Chaussées

FRANÇOIS-HENRI CORNET**Vice-président**

Physicien du Globe
Institut de Physique du Globe de Strasbourg

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 Énergies

***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 LALOUI

Professeur
EPFL (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

* En attente de nomination

Ces listes ont été établies au 1^{er} septembre 2007.

Comment voyez-vous évoluer la recherche à l'INERIS ?



PATRICK FLAMMARIÓN

Institut National de la Recherche Agronomique
Président de la Commission scientifique Risques Chroniques

Connaître et comprendre la chaîne qui va des installations industrielles ou des substances chimiques aux effets sur l'homme et les milieux, en s'appuyant sur des observations et mesures de terrain associées à des modèles : les activités de la Direction des Risques Chroniques de l'INERIS sont un véritable défi au quotidien. Mais un défi stimulant que celui de travailler pour une demande sociale croissante sur des questions majeures, et avec le souci de mobiliser les connaissances et l'expertise en appui aux politiques publiques.

La Commission scientifique Risques chroniques que je préside a pu constater au cours des évaluations d'unités de recherche et à l'occasion des avis donnés sur les programmes de recherche, en amont et après leur achèvement, que ce défi est pris à bras le corps par les équipes qui s'évertuent à rester sur la crête entre recherche et expertise, en mettant en œuvre des modèles et des outils performants (biologie à haut débit, modélisation systémique, métrologie des substances émergentes...), en développant, en partenariat scientifique, de nouvelles approches sur les perturbateurs endocriniens, les particules ultrafines, les transferts atmosphériques... C'est le côté passionnant, et probablement innovant, de la recherche de l'INERIS que d'inventer de nouvelles approches scientifiques, avec d'autres, sur des sujets peu défrichés jusqu'alors, et avec une réelle capacité de

réajustement en fonction des écueils rencontrés. Les marges de progrès sont encore à trouver, malgré les avancées récentes, en termes de meilleure valorisation par les publications, ce qui consolidera la crédibilité scientifique au niveau international. Les tailles critiques sur les sujets sont pour cela à atteindre si l'INERIS souhaite continuer à assumer en parallèle la nécessaire opérationnalité des résultats et des outils développés. Il me semble qu'en cela la posture scientifique de l'INERIS pose un défi au fonctionnement classique de la recherche ! C'est passionnant, et certainement porteur d'avenir.

1



Le développement de nouvelles approches scientifiques sur les perturbateurs endocriniens est un axe de recherche prioritaire pour l'INERIS.

TÉMOIGNAGE



CHRISTIAN DELVOSALLE

Professeur à la Faculté Polytechnique de Mons, Belgique
Président de la Commission scientifique Risques Accidentels

Dans le domaine des risques accidentels, depuis plusieurs années, les activités de recherche amont et de recherche finalisée de la Direction des Risques Accidentels de l'INERIS sont riches et se développent de façon très satisfaisante. La participation à plusieurs programmes européens importants (5^e et 6^e PCRD) en est une preuve évidente qui devrait se confirmer dans l'avenir (7^e PCRD). Ce dynamisme se retrouve aussi dans les programmes nationaux (programme 189 et ANR). Les efforts doivent maintenant porter sur l'articulation de ces différentes

sources de financement pour en augmenter les synergies. Le nombre de thèses en cours et la croissance du nombre de publications dans des revues sont également des indicateurs très positifs. Il faut, enfin, souligner les retombées scientifiques considérables qui seront associées au développement du projet CERTES. De son côté, la Direction de la Certification a mis en place une stratégie de recherche qui tient compte, aussi en amont que possible, de besoins nouveaux en termes d'évaluations de produits et de matériels associés aux technologies émergentes. Cette stratégie permet de consolider les connaissances et outils facilitant l'appui aux pouvoirs publics et elle doit être poursuivie. Il est à noter également l'accroissement remarquable de la recherche partenariale.

TÉMOIGNAGE



JEAN-LOUIS DURVILLE

Ministère chargé de l'Équipement - Conseil Général des Ponts et Chaussées
Président de la Commission scientifique Risques Sol et Sous-sol

Président depuis moins de deux ans de la Commission scientifique Risques Sol et Sous-sol, je commence à avoir une vue assez complète des activités de l'INERIS dans ce domaine. Je citerai simplement quelques traits marquants : la thématique de l'évaluation des risques est au cœur de toutes les recherches, risques liés aux cavités souterraines, mines ou carrières, risques liés aux stockages d'hydrocarbures ou de déchets radioactifs,

risques liés au stockage du CO₂, etc. ; la taille réduite des équipes intervenant sur ces problématiques est compensée par des partenariats solides (LAEGO, GISOS) et par une sélectivité des travaux de recherche ; la recherche de l'INERIS s'appuie à la fois sur l'expérimentation en laboratoire, sur les observations de terrain, souvent issues des expertises qu'il réalise, sur l'instrumentation *in situ*, sur la modélisation numérique. L'INERIS a su faire évoluer ses champs d'action, sans renier son passé minier, en se plaçant sur des thèmes porteurs comme la sécurité, relative à diverses utilisations de l'espace souterrain, vis-à-vis des populations comme des constructions.

TÉMOIGNAGE

FINANCEMENT

Les programmes de recherche de l'INERIS

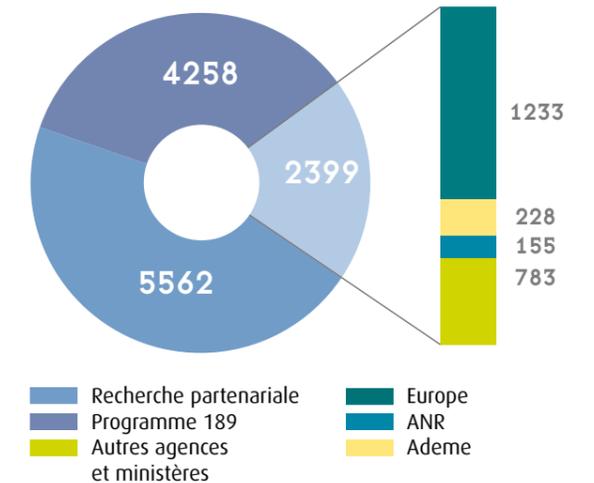
PROGRAMME 189

PROGRAMMES DE RECHERCHE FINANCÉS EN 2006

AU 31 DÉCEMBRE 2006

- 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
- Effet des particules diesel émises par les nouvelles motorisations dans le développement de l'allergie broncho-pulmonaire: l'asthme
- Effet des champs radiofréquences sur l'échauffement et les maux de tête
- Sensibilité de la fonction de reproduction aux atteintes de perturbateurs endocriniens
- LIDAR UV/IR multipolluant appliqué à la caractérisation de nouveaux polluants gazeux ainsi qu'à la validation de modèles d'émissions diffuses
- Amélioration 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)
- Enzymes de la stéroïdogenèse chez le *Danio Rerio*
- Impact radiatif des aérosols sur le climat européen. Étude des rétroactions sur la chimie atmosphérique
- Utilisation des biomarqueurs dans un contexte de multipollution
- Valorisation des déchets: identification des mécanismes physiques, chimiques et biologiques et de leur influence sur le relargage des polluants
- Perturbateurs endocriniens dans l'environnement: caractérisation à l'aide d'outils *in vitro*
- Intégration des modèles toxicocinétiques et toxicodynamiques pour les expositions multiples
- Plasticité génomique et toxicité des perturbateurs endocriniens
- Métrologie et toxicologie des nanoparticules et des particules ultrafines (NANORIS)
- Prise en compte d'observations tridimensionnelles pour l'évaluation et l'amélioration de modèles de chimie-transport atmosphérique
- Développement du pôle de neurotoxicologie à l'INERIS
- Contribution des granules intrapolliniques à l'allergénicité des pollens.
- Modulation par les polluants atmosphériques
- Étude des effets des perturbateurs endocriniens sur le développement précoce des poissons
- Viabilité technico-économique à l'échelle locale ou régionale de la récupération du dioxyde de carbone et de son stockage souterrain dans les terrains houillers (VELCO 2)
- Intégration probabiliste pour l'assimilation statistique de données d'observation dans les modèles de qualité de l'air
- Identification des perturbateurs endocriniens dans les matrices environnementales
- Exposition humaine aux particules ultrafines
- Modélisation du comportement et de l'impact des déchets sur les sols dans le scénario de stockage ou de valorisation
- Toxicité locale et systémique des nanoparticules (NANOTOX)
- Nouvelles cibles cellulaires et moléculaires des HAP: identification, validation et modélisation du risque cancérigène

LA RECHERCHE À L'INERIS EN 2006
ORIGINE DES FINANCEMENTS (k€ HT)



PROGRAMME 189 : PROGRAMMES DE RECHERCHE FINANCÉS EN 2006 (SUITE)

AU 31 DÉCEMBRE 2006

- Feux réels et effets dominos sur les réservoirs industriels et les canalisations (FREDRIC)
- Sécurité intrinsèque des réactions chimiques (INTENS)
- 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)
- Incendie et matières dangereuses en milieu confiné (STRATUS)
- Safe use of energy as an energy carrier (HYSAFE)
- Prédiction des mécanismes d'accélération de la combustion dans les atmosphères explosives (EXPRESS)
- Utilisation des diagrammes d'influence (réseaux bayésiens) dans la méthodologie d'analyse des risques pour les installations industrielles (DIRIS)
- Évaluation et prévention des risques accidentels et chroniques liés à la production et l'utilisation de nanoparticules (NANORIS)
- Approche d'évaluation de la maîtrise des risques d'accidents majeurs intégrant les dimensions techniques, organisationnelles et facteurs humains (MIRIAM)
- Libération accidentelle des produits dangereux transportés par canalisation (LACAN)
- Réalité virtuelle au service du management des risques et des facteurs humains
- Knowledge management pour la gestion des risques (KMGR)
- Acceptabilité et gouvernance des risques en gestion préventive (ACCEPTRIS)
- Le cycle de l'eau dans l'incendie industriel (O2Feu)
- Évaluation du risque d'inflammation d'atmosphères explosives par phénomène électrostatique en milieu industriel (BESP)
- Sécurité des biocarburants (BIOSAFUEL)

INDICATEURS DE LA RECHERCHE

	2004	2005	2006
Nombre annuel de publications	201	269	295
- dont articles dans des revues à comité de lecture ISI et publications dans des proceedings ISI	36	45	63
- dont articles dans des revues à comité de lecture (ISI et non ISI)	53	54	68
Nombre annuel de communications à des congrès	163	194	237
- dont internationales	104	143	178
- dont nationales	59	51	59

Agence Nationale de la Recherche

PROGRAMMES DE RECHERCHE FINANCÉS DANS LE CADRE DES APPELS
À PROJETS 2005, 2006, 2007*

2005	
Acronyme	Titre
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	Pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France
PICOREF	
GEOCARBONE	Surveillance et monitoring du stockage géologique du CO ₂
MONITORING	
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
PROPSD	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

* liste des programmes dont l'INERIS est partenaire, au 15 septembre 2007

THÈSES

Une nouvelle politique de gestion

L'INERIS compte en permanence une cinquantaine de doctorants réalisant une thèse en collaboration avec des laboratoires universitaires. Ces thèses se répartissent de manière assez équilibrée entre les trois principaux domaines de risques de l'Institut, à savoir les risques accidentels et la sécurité des matériaux, les risques chroniques et enfin les risques du sol/sous-sol. À titre d'exemple, sur 45 thèses en cours au 31 décembre 2006, 17 relevaient des risques accidentels, 18 des risques chroniques et 10 des risques du sol/sous-sol. Les thèses se déroulent pour un tiers d'entre elles, au sein même des laboratoires de l'INERIS à Verneuil-en-Halatte, Nancy, Bourges ou Aix-en-Provence, mais également pour les deux tiers d'entre elles, dans des laboratoires universitaires associés à l'INERIS.

Une nouvelle politique de gestion est en cours de mise en place, dans le but d'améliorer encore la qualité des thèses. Des entretiens avec les doctorants ont été réalisés par la Direction scientifique depuis fin 2005, afin de les sensibiliser sur la place qu'ils occupent dans le dispositif de recherche de l'Institut et de recueillir, à des fins de mutualisation, l'expérience de chacun. Il est ainsi apparu comme essentiel de mettre en place, à compter de janvier 2008, une nouvelle procédure de mobilisation du « couple doctorant / laboratoire universitaire », par publication des sujets de thèse sous la forme d'un appel à candidatures, avec notamment un statut de doctorant unique.

LE TÉMOIGNAGE DE MATTHIEU CAUDRON

TÉMOIGNAGE



Matthieu Caudron a reçu le Prix Mécanique des Roches 2007 et est le 3^e lauréat du Prix Jeune Chercheur René Houpert pour sa thèse de doctorat sur l'interaction sol-structure, soutenue à l'INSA de Lyon début 2007.

Ma thèse, intitulée « Étude expérimentale et numérique de l'interaction sol-structure lors de l'occurrence d'un fontis » résulte d'un partenariat entre l'INERIS et le Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale de l'INSA de Lyon. Ce partenariat scientifique et technique a généré un environnement stimulant pour cette recherche. J'ai ainsi pu mettre en évidence le fait que la prise en compte de l'interaction sol-structure est un facteur essentiel pour l'analyse des conséquences des mouvements de terrain sur le bâti. Soutenu en mars 2007, ce projet s'inscrit dans une démarche plus globale de l'INERIS qui se poursuit au-delà de ma propre thèse. Elle vise à développer des outils améliorant la compréhension et la modélisation des phénomènes d'interaction sol-structure lors de mouvements de terrain. Cela permettra, à terme, d'évaluer l'efficacité de solutions techniques réduisant la vulnérabilité du bâti et de déboucher ainsi sur des applications pratiques. Capitalisant les compétences complémentaires des deux partenaires, j'ai rejoint en décembre 2006 la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS, où une part importante de mon activité est consacrée à cette thématique.

Accords-cadres et structures en partenariat

ACCORDS, CONVENTIONS ET GROUPEMENTS

Dans le cadre de ces missions, l'INERIS entretient des relations étroites avec de nombreux partenaires et homologues au travers d'accords-cadres, de conventions-cadres et de groupements.

Accords-cadres et conventions-cadres :

ADEME, AFSSET, ANACT, Andra, BRGM, CCI Oise, CEA, Cedre, Cemagref, CEREGE, Central Mining Institute (GIG), CNRS, CRITT Polymères Picardie, CSTB, CTBA, DET-CEB, École des Mines d'Alès, École Nationale d'Arts et Métiers, EDF, ENSI de Bourges, IFP, Ifremer, INPL, InVS, IRSN, Météo France, Nancy Université, NKE, Université d'Orléans, UPJV, UTC, UTT.

L'INERIS a également signé des accords-cadres destinés à son financement avec le ministère chargé de l'Équipement et la Région Picardie.

Groupements d'intérêt scientifique (GIS), groupements d'intérêt public (GIP), associations à vocation scientifique :

3SP (GIS) : BRGM, École des Mines de Douai, Institut scientifique de service public (ISSeP), Centre technologique international de la terre et de la pierre (CTP)

AGECRIS (GIS) : École des Mines d'Alès et INESC

BERPC (Association) : INRS

ECCOREV* (Fédération de recherche) : Université Paul Cézanne Aix-Marseille, Université de Provence Aix-Marseille, Université de la Méditerranée Aix-Marseille, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, INRA, CEA, Cemagref, IRD, IRSN, Collège de France

ENERO (Association) : Demokritos, TNO, FzK, GIG, ISSeP, IVL, JSI, NILU, TECHNICALIA, VTT, EERC

EU-VRI (GEIE) : Steinbeis-Technologietransfer, Université de Stuttgart, Bay Zoltán Foundation, Technologica Group

GEODERIS (GIP) : BRGM

GISOS (GIS) : BRGM, INPL, École Nationale Supérieure des Mines de Paris

LCSQA (GIS) : École des Mines de Douai, LNE

Plate-forme nationale pour le développement des méthodes alternatives à l'expérimentation animale (GIS)* :

AFSSAPS, AFSSET, Inserm, CNRS

Pôle National des Risques Industriels (GIS)* : CEA, IRSN, ENSI de Bourges, ENSMA, Université d'Orléans

* En cours de mise en place

Substances et produits chimiques



La recherche sur les substances et produits chimiques est actuellement sous les feux de l'actualité, à la suite de l'entrée en vigueur, depuis le 1^{er} juin 2007, du règlement REACH. La preuve que le risque est valablement maîtrisé incombe désormais aux industriels qui les produisent, utilisent et commercialisent. Ceci doit s'effectuer, de plus, dans un contexte où la diminution du recours à l'expérimentation animale est fortement encouragée.

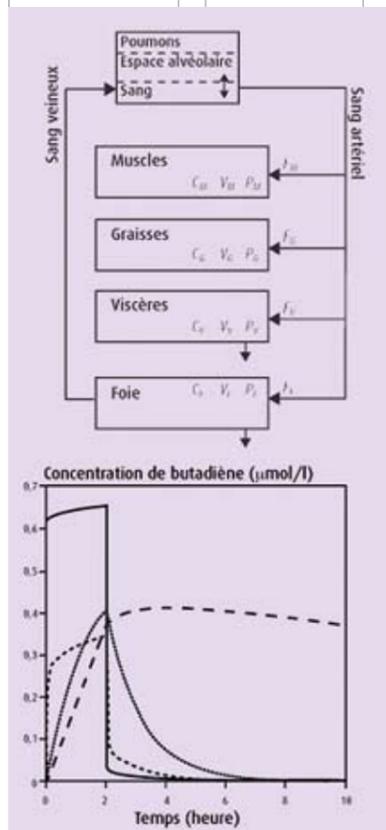
L'INERIS se doit d'accompagner cette nouvelle approche en continuant à développer la compréhension des effets des substances et produits, aussi bien en toxicologie environnementale humaine qu'en écotoxicologie. Ces travaux doivent déboucher rapidement sur des outils opérationnels permettant d'aider les parties prenantes à prendre des décisions sur les stratégies de test, en contribuant au développement d'approches prédictives, basées sur la modélisation QSAR (Quantitative Structure Activity Relationship), les tests *in vitro* et la modélisation physiologique. L'irruption des « omics » – génomique, protéomique, métabolomique – accélère le développement des concepts et des outils, notamment en matière de biomarqueurs d'exposition et d'effets.

Que ce soit en modélisation toxicologique ou en écotoxicologie des perturbateurs endocriniens, les compétences de l'INERIS sont largement reconnues. La mise en place de REACH a fait prendre conscience à la communauté scientifique nationale de la nécessité de stimuler la recherche dans ce domaine et l'INERIS entend y jouer un rôle de leader. Cela est, d'ores et déjà, attesté par les succès de l'Institut dans le 6^e PCRD et sur les appels à projets lancés cette année par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

La modélisation physiologique en toxicologie

Céline Brochot, Sandrine Micallef, Frédéric Bois

1



Modèle PBPK décrivant la cinétique du 1,3-butadiène chez les mammifères. Chaque compartiment est décrit par son volume (V), sa concentration de 1,3-butadiène (C), son coefficient de partage (P) et son flux sanguin (F). Évolution de la concentration de 1,3-butadiène dans 4 compartiments : les poumons (ligne pleine), les viscères (tirets courts), les muscles (ligne en pointillés) et les graisses (tirets longs). Une exposition à 5 ppm de 1,3-butadiène pendant 2 heures a été simulée pour un homme standard.

La toxicité d'une substance peut être évaluée par l'établissement d'une relation dose-effet. Cette relation provient de deux phénomènes : le cheminement de la substance dans l'organisme (toxicocinétique) et l'effet de la substance sur l'organisme (toxicodynamie). La toxicocinétique se réfère à l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion, et la toxicodynamie au mécanisme d'action. La modélisation de la toxicocinétique n'est pas indispensable à l'établissement d'une relation dose-effet mais elle contribue fortement à améliorer sa prédictibilité (notamment pour les extrapolations) et à réduire les incertitudes qui entourent sa définition. Les effets relatifs à l'exposition à une substance ne sont pas uniquement liés à la dose reçue lors de l'exposition mais dépendent aussi de la quantité de produit actif atteignant les cellules cibles. Du fait de la complexité des processus de biodistribution mis en jeu, la relation liant la dose efficace à celle d'exposition n'est pas forcément linéaire.

Parmi les modèles toxicocinétiques existants, les modèles physiologiques (ou PBPK pour Physiologically Based Pharmacokinetic) retiennent particulièrement l'attention des toxicologues. En effet, leurs structures et paramètres reposant sur une conceptualisation des mécanismes biologiques, ils offrent une description physiologique de l'organisme. Cependant, leur ajustement à des données expérimentales peut se révéler difficile en raison de la complexité du modèle, du nombre important de paramètres à estimer

et de la nature des données toxicocinétiques (généralement peu nombreuses, éparpillées et entachées d'erreur de mesure). Pour pallier ce manque de données, nous présentons trois méthodologies facilitant la paramétrisation des modèles PBPK par l'apport d'un complément d'information sur leurs paramètres [1].

LA MODÉLISATION PBPK [2, 3]

Le devenir d'une substance dans le corps est communément divisé en quatre phases : l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'excrétion. Dans un premier temps, la substance est absorbée et distribuée dans le corps par un fluide biologique (sang, lymphe, par diffusion...). Ensuite, la substance est soit stockée, soit éliminée (par métabolisme ou excrétion). Par leur description paramétrique de l'organisme, les modèles PBPK s'appuient sur les connaissances biologiques et anatomiques pour décrire ces processus. Plus précisément, le corps est modélisé par un ensemble de compartiments correspondant à des organes ou des tissus et les fluides biologiques représentent les interconnexions entre compartiments. Un modèle PBPK est défini par un système d'équations différentielles décrivant la variation de concentration dans les compartiments et permet de prédire la concentration de substance dans un tissu à partir de la dose d'exposition. Les paramètres du système se divisent en deux groupes : les paramètres spécifiques aux caractéristiques physiologiques de l'espèce considérée (par exemple,

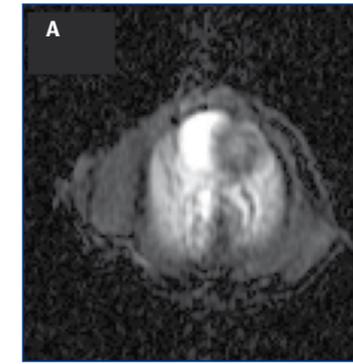
volume des tissus) et les paramètres spécifiques à la fois au toxique et à l'organisme (coefficient de partage par exemple). La figure 1 présente un modèle PBPK à 5 compartiments décrivant l'exposition par inhalation à de nombreux agents gazeux, ainsi que l'évolution temporelle de la concentration dans les compartiments.

LES DONNÉES D'IMAGERIE MÉDICALE [4]

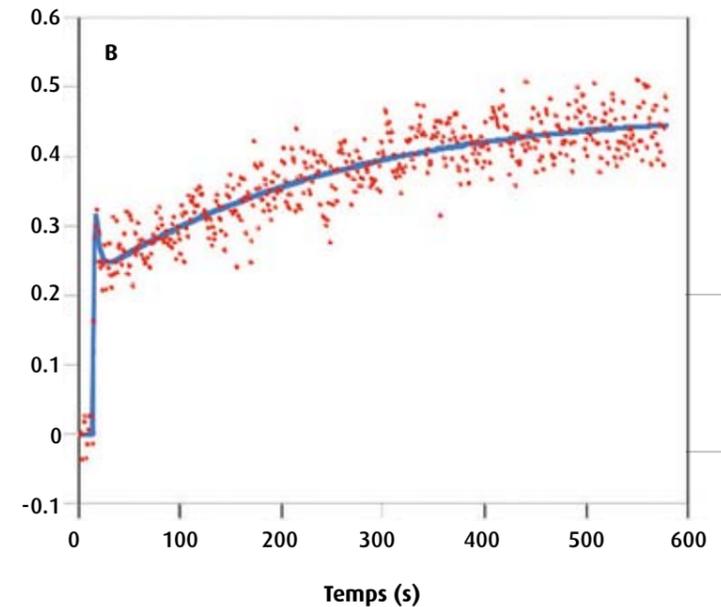
Nous avons développé un modèle PBPK pour décrire les cinétiques d'un agent de contraste (Vistarem®) mesurées par imagerie par résonance magnétique (IRM) afin de caractériser et quantifier la microcirculation dans une tumeur chez des souris. Les augmentations du signal RMN ont été enregistrées dans le sang artériel et les tissus de la tumeur pendant 10 minutes après l'injection du Vistarem®. Les données tissulaires ont permis une description détaillée de la tumeur (séparée en capillaires et interstitium) afin d'estimer ses paramètres de microcirculation. Notre approche a permis de construire un modèle « corps entier » de la biodistribution du Vistarem® et de tester l'efficacité d'un traitement angiogénique. La figure 2 présente une coupe IRM d'une souris (Panel A), ainsi que des données collectées et l'ajustement du modèle (Panel B). Pour ce travail, nous avons collaboré avec l'équipe Inserm U494 « Imagerie Médicale Quantitative » (CA Cuénod).

UTILISATION DE TRACEURS DANS LES ÉTUDES TOXICOCINÉTIQUES [5]

Nous proposons une méthodologie introduisant l'utilisation de traceurs non toxiques lors d'études de la



Taux de relaxation (signal RMN, 1/s)



2

Coupe IRM de la distribution du Vistarem® chez une souris (Panel A) et ajustement du modèle PBPK au signal RMN (Panel B).

cinétique d'une substance toxique chez des volontaires humains afin de réduire la dose d'exposition au toxique. L'utilisation d'un traceur a pour but de compenser la perte d'information engendrée par la réduction de la dose de toxique. Nous avons appliqué cette méthode pour développer des protocoles d'exposition pour le 1,3-butadiène chez l'humain. Pour valider notre procédure, nous avons simulé 12 expositions au butadiène. L'isoflurane a été utilisé comme traceur. Un modèle PBPK à 3 compartiments a été utilisé pour décrire les cinétiques des 2 substances. Lorsque les données butadiène et isoflurane sont analysées conjointement, la précision de la constante de métabolisme du butadiène est augmentée et le biais réduit (par rapport à une exposition

unique au butadiène). Ainsi, nous avons montré qu'une exposition à 10 ppm x min de butadiène et à 300 ppm x min d'isoflurane donne une précision et un biais équivalent à une unique exposition à 40 ppm x min de butadiène. En conséquence, la dose de butadiène reçue par les volontaires pourrait être divisée par 4 si l'exposition au butadiène était complétée d'une exposition à un traceur. Ce travail a été effectué en collaboration avec l'École de Santé Publique de l'Université de Harvard (TJ Smith).

AGRÉGATION DES MODÈLES PBPK [6]

Pour surmonter les difficultés liées à la manipulation de systèmes d'équations différentielles à grande dimension, des méthodes d'agrégation mathématiques sont disponibles. Elles ont pour but de réduire un système d'équations différentielles en agrégeant plusieurs variables entre elles. Typiquement, le modèle agrégé est toujours un système d'équations différentielles, dont les variables sont interprétables en termes de variables du système original. En pratique, le modèle agrégé doit satisfaire quelques restrictions, telles que ne pas agréger certaines variables d'intérêt. Pour tenir compte de ces restrictions, des méthodes d'agrégation sous contraintes ont été développées et sont appliquées avec succès dans l'industrie chimique et pétrolière. Nous avons appliqué ces techniques sur des exemples pratiques afin de tester leur potentiel pour la toxicocinétique. Pour cela, nous avons collaboré avec le département de mathématiques de l'Université de Technologie et Sciences Économiques de Budapest (J. Tóth). Comme applications, nous avons simplifié un modèle à 2 compartiments par des méthodes d'agrégation symbolique, puis un modèle PBPK à 6 compartiments pour le 1,3-butadiène par des méthodes numériques d'agrégation sous contraintes.

PERSPECTIVES

Plusieurs axes de recherche peuvent bénéficier des méthodologies développées ci-dessus.

Réduire les risques des expérimentations chez l'humain

Pour certaines substances, les études animales sont inappropriées pour prédire le comportement de substances chimiques chez l'humain. Dans ces cas précis, l'US EPA estime qu'il est prioritaire de conduire des études humaines engendrant un risque négligeable pour les volontaires exposés, afin de pouvoir prendre des décisions pertinentes pour la protection des populations.

Dans ce contexte, il est donc nécessaire de développer des techniques réduisant au maximum les doses d'exposition lors de ces études, tout en permettant la caractérisation appropriée des risques liés à l'exposition. Les méthodologies présentées ici s'inscrivent directement dans ce cadre.

Valider les modèles PBPK

Les données fournies par les techniques d'imagerie quantitative pourraient renforcer la fiabilité des modèles PBPK en permettant de les valider. Pour valider la structure mathématique d'un modèle PBPK, certains auteurs s'assurent uniquement de la concordance entre les prédictions du modèle et les observations. Cependant, les seules données toxicocinétiques disponibles sont typiquement les concentrations dans le sang, les urines ou l'air exhalé et sont insuffisantes pour discriminer les modèles entre eux. Une solution reste la vérification de la fiabilité des prédictions des doses tissulaires internes. Pour cela, il est donc essentiel de continuer le développement de méthodes expérimentales permettant la détermination de ces doses *in vivo* ou dans les cellules *in vitro*. Comme nous le proposons, un des axes de progrès serait le développement des techniques

d'imagerie permettant la quantification des concentrations internes.

Réduire la dimension des modèles

Les modèles PBPK ont tendance à décrire de plus en plus finement l'organisme et le cheminement de la substance en son sein. Cette tendance entraîne une augmentation de la dimension des systèmes d'équations différentielles à résoudre et ainsi augmente les risques de sur-paramétrisation et de non-identifiabilité des paramètres (dans un cadre d'ajustement à des données). La manipulation mathématique de ces modèles de grande dimension est donc souvent problématique et pourrait bénéficier des techniques d'agrégation.

Organiser les connaissances

Actuellement, plusieurs groupes de recherche travaillent sur des projets rassemblant diverses sources de connaissance sur l'homme (anatomie, physiologie, génétique, etc.) afin de fournir des outils permettant de simuler virtuellement un être humain ou d'y prédire le comportement de substances. On peut citer, par exemple, le « Virtual Human Program » ou le « Physiome Project ». Ces projets ambitieux nécessitent le développement de modèles biologiquement fondés permettant de rassembler, organiser et expliquer les diverses sources de données. Les modèles PBPK sont des outils qui s'intègrent parfaitement dans ces projets.



SUMMARY

PHYSIOLOGICAL MODELLING IN TOXICOLOGY

Physiologically-based pharmacokinetic (PBPK) models are used to describe the biodistribution (administration, distribution, metabolism and excretion) of substances in the body. However, fitting a PBPK model to experimental data can be difficult because of model complexity, the large number of parameters and the amount of toxicokinetic data available (typically, few and sparse). To overcome these difficulties, we propose developing two experimental protocols to parameterize PBPK models: the gathering of data on the spatio-temporal distribution of a substance in the body by imaging techniques, and the use of a non-toxic tracer (or probe) for toxicokinetic studies. These two protocols should provide complementary information for the model parameters.

For the first protocol, we applied image analysis to the development of a PBPK model for a contrast agent, Vistarem®. Through modelling of the experimental data obtained with magnetic resonance imaging, we characterized the whole-body vascularization, and the vascularization of a grafted tumour. Moreover, we statistically evaluated the effects of an antiangiogenic treatment. We also introduced the use of probes in toxicokinetic studies. We developed exposure scenarios to a chemical and to a probe for humans. With simulated data, we showed that it is possible to reduce the toxic exposure dose (by a factor of 4 in our example) while maintaining accuracy in parameter estimates, if the toxic exposure is completed with an exposure to a probe. The main disadvantage of this protocol is the complexity of the data analysis (two PBPK model calibrations should be performed). To reduce this complexity, we proposed applying lumping methods. Such methods aim at reducing differential equation systems. With simple examples, we showed their usefulness for toxico/pharmacokinetic models.

Each protocol developed here includes a supplementary substance. Our work shows that the use of this substance reinforces knowledge on the anatomy and physiology of the subject studied. This results in a better determination of the action of the substance of interest.

RÉFÉRENCES

- [1] Brochet C. (2004). « Paramétrisation des modèles physiologiques toxico/pharmacocinétiques ». Thèse de doctorat, Paris, Université Paris VI, soutenue le 19 octobre 2004.
- [2] Micallef S. and Bois F.Y. (2004). « Applications des modèles physiologiques à l'analyse de données de toxicocinétique ». *Journal de la Société Française de Statistique*, 45(3): 15-32.
- [3] Micallef S., Brochet C. and Bois F.Y. (2005). « L'analyse statistique bayésienne de données toxicocinétiques ». *Environnement, Risques & Santé*, 4(1): 21-34.
- [4] Brochet C., Bessoud B., Balvay D., Cuenod C.A., Siauve N. and Bois F.Y. (2006). "Evaluation of antiangiogenic treatment effects on tumors' microcirculation by Bayesian physiological pharmacokinetic modeling and magnetic resonance imaging". *Magnetic Resonance Imaging*, 24(8): 1059-1067.
- [5] Brochet C. and Bois F.Y. (2005). "Use of a chemical probe to increase safety for human volunteers in toxicokinetic studies". *Risk Analysis*, 25(6): 1559-1571.
- [6] Brochet C., Tóth J. and Bois F.Y. (2005). "Lumping in pharmacokinetics". *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 32(5-6): 719-736.

Écotoxicologie: effets des perturbateurs endocriniens sur la reproduction chez le poisson

Nathalie Hinfray, Sélim Aït-Aïssa, Jean-Marc Porcher, François Brion



Coupe transversale de cerveau de larve de poisson-zèbre témoin (TS) et exposée à l'œstradiol (E2). L'exposition à de l'œstradiol pendant 7 jours entraîne une synthèse de novo de la protéine aromatase B (aromatase cérébrale) dans les cellules gliales radiaires (flèche rouge) qui sont connues pour jouer un rôle prépondérant dans la neurogenèse. Collaboration Laboratoire d'Endocrinologie Moléculaire de la Reproduction UMR CNRS 6026-Université de Rennes.

La présence dans l'environnement aquatique des perturbateurs endocriniens (PE), c'est-à-dire des substances d'origine naturelle ou anthropique, comme les résidus de certains médicaments, capables d'interférer avec le système endocrinien est une préoccupation majeure depuis quelques années. Cette problématique s'est imposée au début des années 1990 avec la publication d'études sur des anomalies du système reproducteur chez diverses espèces d'invertébrés et de vertébrés aquatiques. Chez de nombreuses espèces de gastéropodes prosobranches du littoral a été décrit l'apparition d'individus imposex (apparition d'un appareil reproducteur mâle chez les femelles) dont la sévérité et l'occurrence sont corrélées aux concentrations d'exposition en TBT¹, un biocide utilisé dans les peintures anti-fouling. D'autres études réalisées sur des reptiles d'un lac de Floride accidentellement contaminé par un pesticide organochloré ont montré des perturbations des concentrations en hormones stéroïdiennes circulantes associées à des anomalies du développement de l'appareil reproducteur mâle et un déclin de la population. Chez des populations de poissons vivant dans des rivières recevant des eaux résiduaires ont été observées à cette même époque des féminisations de poissons mâles qui se traduisent, en particulier, par de l'intersexualité, c'est-à-dire par la présence d'ovocytes au sein du tissu testiculaire. L'ensemble de ces études, menées sur des espèces sauvages, a conforté l'idée que des substances chimiques contaminant le milieu aquatique sont capables d'induire des effets sur la reproduction.

DES OUTILS BIOLOGIQUES

Face aux risques qu'exercent ces substances sur la reproduction des organismes et/ou

leur descendance, l'Unité d'Évaluation des risques écotoxicologiques de l'INERIS a initié dès la fin des années 1990, des programmes de recherche visant à développer des outils biologiques *in vitro* et *in vivo* permettant de détecter et de caractériser le potentiel PE des substances chimiques afin d'en évaluer les dangers et les risques. Nos premiers travaux se sont focalisés sur les propriétés œstrogènes mimétiques des polluants et leurs effets sur la reproduction chez le poisson. Ces substances qui sont le plus souvent incriminées dans les désordres de la reproduction observés chez les populations sauvages sont capables de mimer l'action des œstrogènes en se liant comme agonistes aux récepteurs des œstrogènes. À l'aide de modèles cellulaires (e.g. cellules MELN développées par l'Unité Inserm 439) il nous a été possible de caractériser l'affinité des xénobiotiques pour les récepteurs des œstrogènes (RE) et de déterminer le potentiel œstrogénique d'échantillons environnementaux de sédiments^[1] et d'eaux de surface^[2]. Chez les poissons, l'exposition à des molécules agonistes des RE se traduit par une altération de la synthèse de protéines sous contrôle hormonal. Par exemple, une induction de l'expression de la vitellogénine (Vtg) normalement absente chez les mâles et les juvéniles témoigne de l'exposition présente ou passée de ces poissons à un ou plusieurs polluants œstrogènes mimétiques. Dans ce domaine, nous avons développé plusieurs méthodes immuno-enzymatiques de mesure de la Vtg chez différentes espèces de poisson.^[3-5] Ces outils permettent la conduite d'études *in vitro* sur culture primaire

d'hépatocytes de truite ou *in vivo* chez des poissons exposés en conditions contrôlées à des toxiques^[6] ou prélevés *in situ* afin de diagnostiquer l'impact environnemental de ces substances sur les populations autochtones^[7].

DES MÉCANISMES D'ACTION MULTIPLES

Les mécanismes d'action des PE sont multiples et afin de mieux considérer ces divers modes d'actions, nos travaux se sont orientés plus récemment vers l'étude des effets des PE sur la stéroïdogénèse. La stéroïdogénèse est le processus par lequel les hormones stéroïdiennes sont synthétisées. Parmi les enzymes qui sont impliquées dans la biosynthèse hormonale, le cytochrome P450 aromatase joue un rôle clé puisqu'il est responsable de la conversion irréversible des androgènes en œstrogènes. Il joue un rôle majeur dans la différenciation sexuelle et la reproduction. De plus, son expression dans le système nerveux central jouerait un rôle majeur dans la neurogenèse. Les travaux menés chez le poisson confirment que dans notre modèle d'étude, le poisson-zèbre, espèce préconisée pour la réalisation des tests *in vivo*, il existe deux isoformes de l'aromatase, l'aromatase gonadique (AroA) et l'aromatase cérébrale (AroB). Dans le cerveau des adultes, l'expression du gène, de la protéine AroB ainsi que les activités d'aromatase sont particulièrement élevées comparativement aux ovaires confirmant que le cerveau est le siège d'une synthèse importante de neuro-œstrogènes^[8,9]. Au-delà de ces informations d'ordre physiologique, nos travaux montrent que diverses classes de molécules sont capables de perturber les expressions et les activités d'aromatase cérébrales et gonadiques. Ainsi, à l'aide d'un test *in vitro*, nous avons caractérisé le potentiel inhibiteur des activités d'aromatase de plusieurs pesticides parmi lesquels les pesticides

possédant un noyau imidazole tels que le clotrimazole, le propiconazole ou le fenbuconazole se sont avérés être les plus actifs^[10]. *In vivo*, le clotrimazole induit des effets plus complexes qui sont à la fois dépendants du tissu cible étudié et de la concentration d'exposition, les effets sur les gènes ne reflétant pas nécessairement les effets observés au niveau enzymatique. Outre les pesticides imidazolés, les œstrogènes (i.e. œstradiol) et certains œstrogènes mimétiques (i.e. nonylphénol) altèrent les expressions des aromatases.

DES EFFETS INDUCTEURS

Dans le cerveau, ils sont capables d'induire l'expression du gène et de la protéine AroB (figure 1) par un mécanisme qui implique des récepteurs des œstrogènes fonctionnelles^[9,11,12]. Ces effets inducteurs sont particulièrement forts chez les larves chez qui la mesure de l'induction de l'aromatase B constitue un marqueur biologique d'exposition des composés œstrogènes mimétiques. Chez les adultes exposés à ces mêmes substances, les effets inducteurs de l'AroB sont moins marqués et l'on observe des inhibitions de l'aromatase ovarienne démontrant des effets tissu spécifiques de ces molécules et, par là même, la complémentarité

des mesures des aromatases dans ces deux tissus. L'ensemble des informations acquises permet de conclure que les P450 aromatases sont des cibles moléculaires et biochimiques des PE. Les mesures d'expression et d'activité enzymatiques dans le cerveau et les gonades permettent de mieux appréhender les multiples mécanismes d'action des PE. Toutefois, il reste nécessaire, d'une part, de mieux cerner les mécanismes de régulation de l'aromatase (en particulier dans les ovaires) et, d'autre part, de déterminer les conséquences de ces perturbations sur la physiologie et la reproduction des individus. Par ailleurs, la stéroïdogénèse étant supportée par une cascade d'enzymes et les PE pouvant potentiellement agir sur chacune d'elles, ces travaux doivent être complétés par l'étude des interactions des PE avec d'autres enzymes impliquées dans la stéroïdogénèse. Nous avons récemment initié des travaux dans ce sens, travaux montrant que les œstrogènes perturbent l'expression testiculaire du gène qui code pour le cytochrome P450c17 dont le rôle est de synthétiser un précurseur essentiel à la biosynthèse des androgènes et des œstrogènes. Nos travaux ouvrent donc de nombreuses perspectives de recherche et trouvent également leurs applications dans



Échantillonnage des poissons dans les rivières artificielles (mésocosme) de l'INERIS.

NOTES
1 - TBT: tributylétain

RÉFÉRENCES

- [1] Michallet-Ferrier P, Ait-Aïssa S., Dominik J., Haffner G.D., Balaguer P. and Pardos M. (2004). "Assessment of estrogen (ER) and aryl hydrocarbon receptor (AhR) mediated activities in organic sediment extracts of the Detroit River, using MELN and PLHC-1 *in vitro* assays". *Journal of Great Lakes Research*, 30(1): 82-92.
- [2] Ait-Aïssa S., Flammarion P., Balaguer P., Siret C., Noury P., Brion F. and Porcher J.M. (2002). "In vitro estrogenic and dioxin-like activities in French river waters: correlation with *in vivo* biomarkers induction in inhabiting fishes". SETAC-EUROPE, Vienne, May 2002.
- [3] Brion F., Rogerieux F., Noury P., Migeon B., Flammarion P., Thybaud E., Porcher J.M. (2000). "Two step purification of vitellogenin from three teleost fish species: rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), gudgeon (*Gobio gobio*) and chub (*Leuciscus cephalus*)". *Journal of Chromatography B*, 737, 3-12.
- [4] Nilsen B.M., Berg K., Eidem J.K., Kristiansen S.L., Brion F., Porcher J.M., Goksøyr, A. (2004). "Development of Quantitative Vitellogenin ELISAs for fish test species used in endocrine disruptor screening". *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 378: 621-633.
- [5] Brion F., Nilsen B.M., Eidem J.K., Goksøyr A., Porcher J.M. (2002). "Development and validation of an ELISA to measure vitellogenin in the zebrafish (*Danio rerio*)". *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21, 1699-1708.
- [6] Brion F., Porcher J.M., Bazzon M., Gondelle F., Cornu L., Gillet C., Garric J., Flammarion P., Thybaud E. (1999). "Vitellogenin induction in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after long term water exposure to 4-Nonylphenol and 17β-estradiol". Conférence internationale sur les perturbateurs endocriniens, 7-8 octobre 1999, Nantes, France.
- [7] Flammarion P., Brion F., Palazzi X., Babut M., Garric J., Migeon B., Noury P., Thybaud E., Tyler C. R. (2000). "Estrogenic effects on chub (*Leuciscus cephalus*): induction of vitellogenin and effects on the testicular structure". *Ecotoxicology*, 9, 127-135.
- [8] Hinfray N. (2006). « Étude de l'expression des cytochromes P450 aromatasés comme marqueur biologiques d'une perturbation endocrinienne chez le poisson. » Thèse de doctorat, 135 p. + annexes.
- [9] Hinfray N., Palluel O., Turies C., Cousin C., Porcher J.M., Brion F. (2006b). "Brain and gonadal aromatase as potential targets of endocrine disrupting chemicals in a model species, the zebrafish (*Danio rerio*)". *Environmental Toxicology*, 21(4): 332-337.
- [10] Hinfray N., Porcher J.M., Brion F. (2006c). "Inhibition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) P450 aromatase activities in brain and ovarian microsomes by various environmental substances". *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 144 (3): 252-262.
- [11] Menuet A., Pellegrini E., Brion F., Gueguen M.M., Dujardin T., Anglade I., Marmignon M.H., Pakdel F. and Kah O. (2005). "Expression and estrogen-dependent regulation of the zebrafish brain aromatase gene". *Journal of Comparative Neurology* 485(4): 304-320.
- [12] Hinfray N., Palluel O., Porcher J.M., Kah O., Pakdel F., Brion F. (2006a). "The xeno-estrogen nonylphenol affects brain and ovarian aromatase expression in the zebrafish (*Danio rerio*)". 2nd International conference on Molecular Research in Environmental Medicine, Paris, 7-8 September 2006.
- [13] Sanchez W., Ait-Aïssa S., Palluel O., Ditche J.M., Porcher J.M. (2007). "Preliminary investigation of multi-biomarker responses in three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) sampled in contaminated streams". *Ecotoxicology* 16: 279-287.

l'élaboration de la stratégie d'évaluation des risques des PE. Ces applications sont rendues nécessaires par le règlement REACH qui introduit la notion d'autorisation pour les substances possédant ce type de propriété perturbatrice du système endocrinien. Sous l'égide de l'OCDE, des tests *in vitro* et *in vivo* sont en cours de développement afin de caractériser les propriétés PE des substances chimiques. Chez les poissons, les tests actuellement en cours de validation, préconisent la mesure de l'induction de la Vtg chez le mâle afin de déterminer le potentiel œstrogène mimétique des substances. Dans ce cadre, l'INERIS a pris en charge un exercice d'inter-calibration international de la mesure de la vitellogénine chez le poisson-zèbre. Par ailleurs, nos travaux sur les mesures des aromatasés chez le poisson-zèbre espèce préconisée pour la réalisation des tests *in vivo*, pourraient avantageusement venir compléter les mesures de vitellogénine afin de prendre en compte d'autres modes d'action des substances sur le système endocrinien.

MESURER UN ENSEMBLE DE VARIABLES BIOCHIMIQUES

Par ailleurs, la transposition des mesures des activités aromatasés chez des espèces autochtones des rivières françaises (chevaine, gardon, épinouche) est actuellement en cours et vise à déterminer dans quelle mesure ces activités peuvent constituer des marqueurs biologiques d'une perturbation endocrinienne. Elle participe à une démarche qui consiste à mesurer chez le poisson un ensemble de variables biochimiques (biomarqueurs) apte à fonder un diagnostic sur la qualité des milieux aquatiques [13]. Ces mesures utilisables dans une perspective de biosurveillance sont en cours d'évaluation en partenariat avec le Conseil Supérieur de la Pêche. Ces études permettent de confronter les mesures de biomarqueurs chez le poisson aux indices écologiques (indice poisson en rivière, IPR réalisé par le Conseil Supérieur de la Pêche et indice biologique global normalisé, IBGN) et ainsi d'envisager leur utilisation en routine dans le cadre de la directive-cadre sur l'eau qui impose un bon état chimique et écologique des milieux aquatiques.

SUMMARY

ECOTOXICOLOGY: EFFECTS OF ENDOCRINE DISRUPTORS ON REPRODUCTION IN FISH

In recent years, it has been shown that man-made chemicals and natural substances are able to disrupt the normal physiology and endocrinology of organisms. The presence of these compounds, termed endocrine-disrupting chemicals (EDCs), has been a major concern for more than 10 years. Given the risk posed by EDCs on the reproductive function of organisms, the ecotoxicological risk assessment unit of INERIS initiated at the end of the 1990s research programmes aimed at developing in vitro and in vivo biological tools to detect and to characterise the endocrine disrupting potency of chemicals in fish with a view to assessing the hazards and the risks of EDCs. Our work initially focused on an important class of EDCs, i.e. those acting as estrogens (xeno-estrogens). However, EDCs can affect the endocrine system through various pathways and action mechanisms. Therefore, with the aim of broadening our knowledge on the effects of EDCs on fish development and reproduction, more recently we have conducted research that aims to investigate the effect of several classes of chemical compounds, on P450 aromatase, an essential sex-related enzyme involved in the final rate-limiting conversion of androgens into estrogens. By conducting in vitro and in vivo experiments in our model fish species, the zebrafish, we demonstrated that a wide range of compounds such as xeno-estrogens, dioxins or pesticides were able to perturb aromatase expression and/or activities by acting at the transcriptional level or by modulating aromatase activities. While the biological significance of these molecular and biochemical effects on fish development and reproduction need to be determined, aromatase could be integrated in new or existing in vitro/ in vivo fish assays to assess potential aquatic organism endocrine activity in a testing strategy that is required particularly within REACH.

EXPERTISE

L'expertise de l'INERIS en toxicocinétique

Frédéric Bois

La toxicocinétique (aussi appelée pharmacocinétique) d'une substance chimique est, par définition, l'ensemble des phénomènes conduisant de son absorption à sa concentration dans un organe ou un tissu particulier du corps où il pourra causer un effet thérapeutique ou toxique. Plusieurs phénomènes concurrents entrent en jeu: ceux de l'absorption, de la distribution par l'intermédiaire du sang, de la lymphe, ou par simple diffusion, du métabolisme et de l'excrétion. Sur cette base, on imagine facilement combien la pharmacocinétique d'une substance conditionne sa toxicité. Le savoir-faire de l'INERIS en la matière a fait l'objet dernièrement de plusieurs applications pré-réglementaires: appui à la réglementation REACH, quantification de l'incertitude et de la variabilité dans les évaluations de risque, mise au point de valeurs toxicologiques de référence (VTR), appui à la réglementation des mélanges de substances (ce qui concerne la majorité des produits commercialisés).

APPUI AU RÈGLEMENT REACH

Les experts de l'INERIS ont participé à la rédaction d'un guide technique de REACH sur l'utilisation des données de pharmacocinétique pour l'appréciation des risques de toxicité des substances chimiques. Bien que REACH ne demande pas explicitement de collecter des données de pharmacocinétique, l'Annexe I, 1.0.2 du règlement dit textuellement que « l'évaluation des dangers pour l'homme considérera le profil toxicocinétique (c'est-à-dire l'absorption, le métabolisme, la distribution et l'élimination) de la substance ». On ne saurait être plus clair. La production de données de pharmacocinétique est donc implicitement encouragée comme un moyen pour définir les stratégies de test, interpréter les données collectées et les extrapoler selon les besoins de l'évaluation des risques (entre doses, espèces, durées et voies d'exposition). Le guide rédigé indique comment des données de pharmacocinétique peuvent être produites *in vivo*, *in vitro* et *in silico* et comment les résultats obtenus peuvent être intégrés dans un ensemble cohérent de relations dose-concentration-effet. Au total, il en ressort que l'information pharmacocinétique est indispensable aux stratégies de test intelligentes et aux évaluations de risque appelées de leurs vœux par REACH et la Commission européenne. Par ailleurs, l'INERIS et la société SCIENOMICS ont proposé le projet de recherche et développement « Intégration de méthodes d'analyse décisionnelle et de chimie prédictive pour l'évaluation de la toxicité (CANTO) » qui a été retenu par l'ANR. Il s'agit de la première étape du Consortium Decision driven intelligent chemical analysis testing strategies (DEDICATES) dont l'un des objectifs est de valider ou proposer une stratégie optimale de tests à réaliser pour satisfaire aux critères de REACH.

INCERTITUDE ET VARIABILITÉ DANS LES ÉVALUATIONS DE RISQUE

L'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis d'Amérique (US-EPA) a organisé, en octobre 2006, une conférence internationale sur la caractérisation de l'incertitude et de la variabilité dans les modèles physiologiques pharmacocinétiques (dits modèles «PBPK»). Ces modèles sont utilisés dans les évaluations de risques basées sur le mode d'action pour estimer les doses internes chez l'animal et l'homme. La caractérisation

des incertitudes et des variabilités inhérentes à cet exercice est de plus en plus reconnue comme indispensable. L'INERIS y a été invité pour présenter le fruit de ses travaux sur cette question. Le dialogue multidisciplinaire entamé lors de cet atelier a pour but de promouvoir les collaborations, recherches, collectes de données et les formations nécessaires pour faire de la caractérisation de l'incertitude et de la variabilité une pratique standard de l'évaluation du risque. Cette conférence a été suivie d'une seconde, organisée par HSL (UK) à Chania (Crète) en avril 2007, ayant pour but de faire dialoguer les experts scientifiques et les agences réglementaires pour harmoniser ces pratiques au plan international.

DÉRIVATION DE VALEURS TOXICOLOGIQUES DE RÉFÉRENCE

L'éthylène glycol éthyl éther (EGEE) est un solvant toxique pour la reproduction. Cet effet s'exerce par l'intermédiaire de son métabolite, l'acide 2-éthoxy acétique (2-EAA). Les risques associés à l'exposition à l'EGEE sont donc mieux évalués lorsqu'ils sont basés sur une mesure de la dose de 2-EAA dans le corps, plutôt que sur la concentration inhalée, par exemple.

Une étude de l'INERIS a développé une relation dose-réponse pour quantifier la toxicité de l'EGEE sur les tissus testiculaires. Cette relation dose-réponse a été basée sur le couplage d'un modèle toxicocinétique physiologique (pour estimer la dose interne de 2-EAA) avec un modèle toxicodynamique construit à partir d'un estimateur non paramétrique à noyau. Sur de tels sujets, l'INERIS est à la pointe de l'expertise française.

RÉGLEMENTATION DES MÉLANGES DE SUBSTANCES

Nous sommes généralement exposés à des mélanges de substances chimiques, plus qu'à des substances seules. La complexité et le nombre quasiment infini de mélanges chimiques possibles empêchent le recours systématique à l'expérimentation pour évaluer leur toxicité. La toxicologie prédictive associée au développement de la modélisation mathématique est une approche prometteuse pour estimer les risques de toxicité des mélanges. Selon la composition d'un mélange, des interactions toxicologiques significatives entre ses composés peuvent se produire. Ces interactions peuvent être de nature toxicocinétique, c'est-à-dire affecter la biodistribution des substances dans l'organisme, ou de nature toxicodynamique, c'est-à-dire altérer les effets (ou modes d'action) des substances sur l'organisme.

Un rapport récent de l'INERIS traite en profondeur des interactions toxicocinétiques. Il en ressort que la modélisation toxicocinétique physiologique est un outil efficace pour déterminer les doses de substances dans les tissus cibles et évaluer les interactions toxicocinétiques. Un effort de recherche et de développement d'applications à l'expertise sont des axes prioritaires d'action de l'INERIS dans ce domaine.

SUMMARY

INERIS' EXPERTISE IN TOXICOKINETICS

The toxicokinetics (or pharmacokinetics) of a substance are a quantitative description of the set of absorption, distribution, elimination or metabolic steps that lead from an applied dose to an effective or toxic dose in target organs of the body. It is easy to imagine to what extent pharmacokinetics condition the toxicity of a given chemical. For example, no absorption or rapid elimination lead to reduced risks of toxicity. INERIS' expertise and know-how in this field have recently been the object of several (pre-)regulatory applications: Technical support of REACH, quantification of uncertainty and variability in risk assessments, definition of toxicological reference values and support with regard to the regulation of mixtures of substances.

Risques technologiques et pollutions



Ce thème de recherche se rapporte à une part prédominante des activités de l'INERIS. Ainsi, toute la chaîne des événements dangereux liés aux activités industrielles est passée en revue, les phénomènes dangereux sont identifiés et caractérisés, la gravité et la fréquence d'occurrence des événements sont étudiées, ainsi que l'exposition des personnes et des écosystèmes, en cas de phénomène chronique ou consécutif à un accident. L'INERIS a ainsi développé des compétences très bien reconnues en matière de transfert atmosphérique des polluants, aussi bien pour la métrologie, que pour la prévision des transferts par la modélisation. Ceci permet d'évaluer avec pertinence l'exposition des populations touchées par les polluants. En matière de métrologie, l'INERIS a notamment développé des applications du laser à la métrologie très performantes (LIDAR, LIBS) permettant d'analyser spatialement la répartition et la composition chimique des polluants ou même des nanoparticules. Ces connaissances nouvelles conduisent à l'élaboration de politiques publiques de protection de la santé adaptées.

L'INERIS s'intéresse de près aux phénomènes dangereux pouvant affecter les installations industrielles : origine, propagation, conséquences, ce qui permet ensuite d'évaluer les distances d'effets, information nécessaire aux pouvoirs publics pour élaborer les plans d'urbanisation et pour organiser les secours en cas d'accidents. Les résultats de ces études contribuent à concevoir ou renforcer les barrières de sécurité, techniques ou organisationnelles, destinées à prévenir les accidents ou à limiter leurs conséquences. Souvent déterministes au départ, ces approches font de plus en plus appel aux analyses probabilistes ou stochastiques. L'évaluation s'efforce également de prendre en compte l'ensemble des facteurs de risque dans les installations et leur environnement, et il est indispensable de mieux prendre en considération les facteurs humains et organisationnels. C'est ainsi que les sciences dites « dures », ou sciences de l'ingénieur, sont amenées à s'hybrider avec les sciences humaines et sociales, sociologie, ergonomie, voire anthropologie. Enfin, l'INERIS est de plus en plus consulté pour ses compétences dans le domaine de la gouvernance des risques.

Au-delà de la gestion des risques, il s'agit d'impliquer l'ensemble des parties prenantes dans les décisions relatives à la gestion des territoires (plans de prévention des risques, urbanisme, projets d'implantation, etc.). De très nombreux champs de recherche s'ouvrent ainsi et sont susceptibles de s'étendre encore plus largement quand on y ajoute les dimensions économiques et politiques. Dans le contexte du développement durable, l'INERIS s'engage résolument sur la contribution au développement de nouvelles technologies et de nouveaux procédés, en plaçant l'évaluation et la maîtrise des risques dès la conception et en intégrant l'analyse des risques à l'ensemble du cycle de vie des produits. Après des contributions très appréciées dans le domaine de l'hydrogène utilisé comme source d'énergie dans les transports, l'INERIS s'intéresse aux biocarburants sous l'angle des risques comme sous celui des impacts sur la santé et sur l'environnement, et ce sur l'ensemble de leur cycle de vie.

Qualité de l'air et climat: la modélisation des aérosols atmosphériques

Bertrand Bessagnet, Laurence Rouil

Depuis 2004, le système PREV'AIR, système national de prévision de la qualité de l'air fournit, outre des prévisions des concentrations d'ozone, des prévisions des particules à l'échelle européenne et, depuis 2006, des cartes dites « analysées » de particules de diamètre inférieur à 10 microns – PM10 – (les seules réglementées à l'heure actuelle) à l'échelle de la France. Ces dernières sont établies à partir de résultats de simulations corrigés quotidiennement à l'aide des observations réunies dans une base par l'ADEME. Les particules, par les effets sanitaires qu'elles génèrent, font l'objet d'une attention de plus en plus grande des décideurs et des politiques. En particulier, les particules fines dont le diamètre est inférieur à 2,5 microns (PM2,5) seront certainement réglementées dans la future directive européenne unifiée de qualité de l'air. Cet intérêt croissant ainsi que le manque de connaissances sur bien des aspects de la pollution particulaire expliquent qu'au-delà de la question de la prévision et de la représentation cartographique des concentrations, des travaux de recherche et d'appui aux pouvoirs publics soient toujours activement menés à l'INERIS. Il s'agit de contribuer à une meilleure connaissance de la phénoménologie liée à la formation et au transport des aérosols, de leur mesure et de leur modélisation. L'objet du présent article est de proposer les résultats des travaux de modélisation menés à l'INERIS sur ce polluant, qui représente un réel enjeu scientifique, par la complexité des processus de formation des aérosols issus de transformations chimiques (dits secondaires), par

l'impact sanitaire et environnemental qui le caractérise et par les aspects réglementaires qui le concernent.

LA MODÉLISATION POUR UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DES ÉPISODES DE POLLUTION PARTICULAIRE

Le modèle de Chimie-Transport CHIMERE utilisé dans le cadre de PREV'AIR, est développé conjointement par l'IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace) et l'INERIS. L'INERIS développe plus spécifiquement le module d'aérosol depuis 2001 ce qui a permis d'établir les premières prévisions opérationnelles de PM10 et PM2,5 en 2004. Ces développements ont fait l'objet de nombreuses publications scientifiques. Les efforts de l'Institut ont porté ces dernières années sur deux thèmes principaux : l'évaluation de l'outil de modélisation, et sa mise en œuvre pour l'analyse des épisodes de pollution particulaire survenant en France.

Validation du modèle

Une large partie des travaux de ces trois dernières années a été consacrée à l'évaluation de l'approche de modélisation retenue [1]. En effet, considérant les enjeux opérationnels de prévision et de cartographie auxquels est astreint PREV'AIR, il est indispensable de s'assurer de la fiabilité et de la pertinence des résultats simulés. La comparaison aux mesures disponibles montre que les concentrations en particules modélisées sont généralement inférieures aux concentrations mesurées. Il s'agit d'une limite actuelle bien connue de l'ensemble des modèles disponibles comme cela

a été révélé au cours de plusieurs exercices européens d'intercomparaison. On citera en particulier les projets City-Delta et Eurodelta réalisés à la demande respectivement de la Commission européenne et de la Convention sur le transport des polluants à longue distance (CLRTAP).

Ces travaux ont permis de comparer les résultats produits par six modèles européens (dont CHIMERE) en réponse à différentes hypothèses de réduction des émissions de particules primaires et de polluants précurseurs de l'ozone et des aérosols secondaires. Ils ont permis de révéler les performances de ces modèles à l'échelle européenne et d'en proposer des interprétations selon les caractéristiques des paramétrisations physico-chimiques implantées dans les modèles [6, 3, 5].

Les raisons pour lesquelles les modèles sous-estiment globalement les concentrations massiques de particules sont multiples :

- Mauvaise connaissance et sous-estimation des émissions. Cela est vrai,

en particulier, pour certains secteurs d'activités tels que la combustion du bois (chauffage résidentiel et tertiaire), les activités agricoles et le trafic routier et non routier. De plus, les émissions en particules dont le diamètre est inférieur à une certaine taille (fraction granulométrique) résultent généralement de facteurs de spéciation affectés à la masse totale de particules émises. Cela impacte directement les niveaux de concentration de particules primaires simulés.

- Connaissance limitée des processus de formation des aérosols organiques secondaires qui résultent des émissions, généralement gazeuses, de composés organiques d'origine anthropique ou biotique.

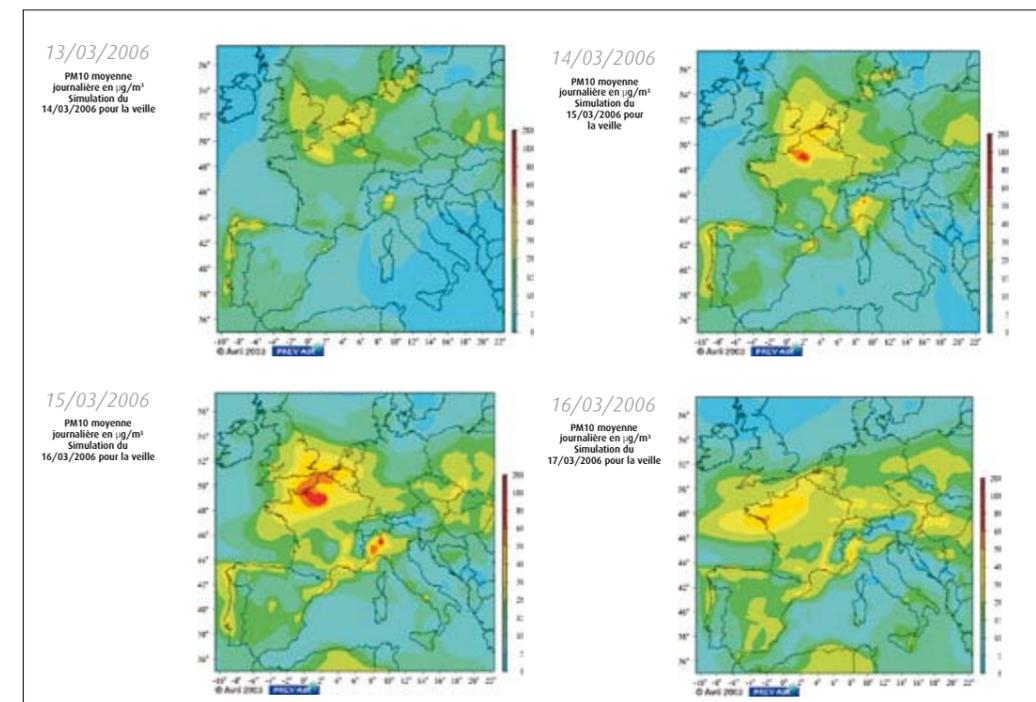
- Prise en compte parfois approximative des sources naturelles : sels marins, poussières sahariennes, débris végétaux.

- Difficultés liées à la simulation de paramètres météorologiques influents tels que les nuages ou les précipitations. Malgré ces difficultés, les résultats

d'évaluation des modèles d'aérosols atmosphériques sont jugés très encourageants et parfois même satisfaisants lorsque, par exemple, on s'intéresse à la part inorganique des aérosols. CHIMERE est considéré comme conforme à l'état de l'art au niveau européen, avec un bon comportement lors des différents exercices d'intercomparaison auxquels l'INERIS a participé (Eurodelta, City-Delta). Ceci n'empêche pas l'INERIS de poursuivre ses efforts afin d'améliorer la qualité des résultats produits par le modèle.

Analyse d'épisodes de pollution particulaire

Les travaux de modélisation de l'INERIS concernent aussi l'étude d'événements spécifiques de pollution particulaire [2]. Ils ont permis de montrer le développement de larges panaches de pollution particulaire à l'échelle de l'Europe (figure 1, par exemple, en 2006) notamment dus à la production de nitrate d'ammonium. La France est fréquemment impactée par ces panaches



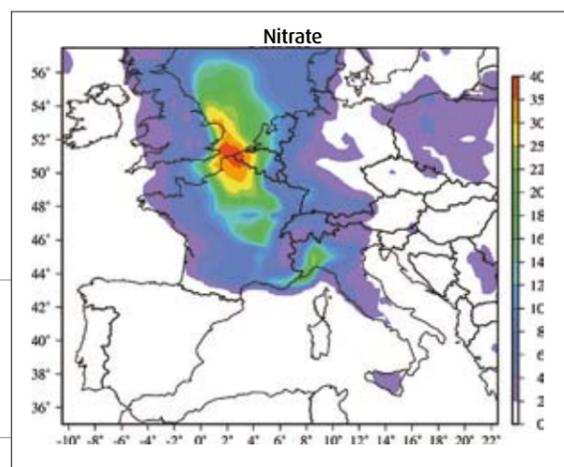
1

Concentrations moyennes journalières de PM10 en µg/m³ sur l'Europe - Historique du panache.

NOTES

1 - Convention sur le transport des polluants à longue distance (CLRTAP) : programme mené par la Commission Économique pour l'Europe des Nations-Unies.

2



Concentration de nitrate simulée par CHIMERE le 21 février 2003 (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

qui prennent naissance dans des zones géographiques de forte émission d'oxydes d'azote (Pays-Bas, Europe de l'Est). Ils se forment généralement en fin de période hivernale lorsque les températures sont encore assez basses et l'ensoleillement suffisamment important pour générer les polluants secondaires nécessaires au développement de ces épisodes. La figure 2 montre le développement d'un épisode particulièrement important de ce type, apparu en février 2003. Cette représentation cartographique permet de bien identifier la source de l'événement et son amplification avec les apports des émissions locales.

PROSPECTIVE : INTERACTIONS CHIMIE-CLIMAT

L'INERIS, en collaboration avec l'ADEME et le Laboratoire d'Aérodologie (CNRS/LA/OMP), s'est engagé sur la voie des études prospectives de la qualité de l'air à l'échelle climatique.

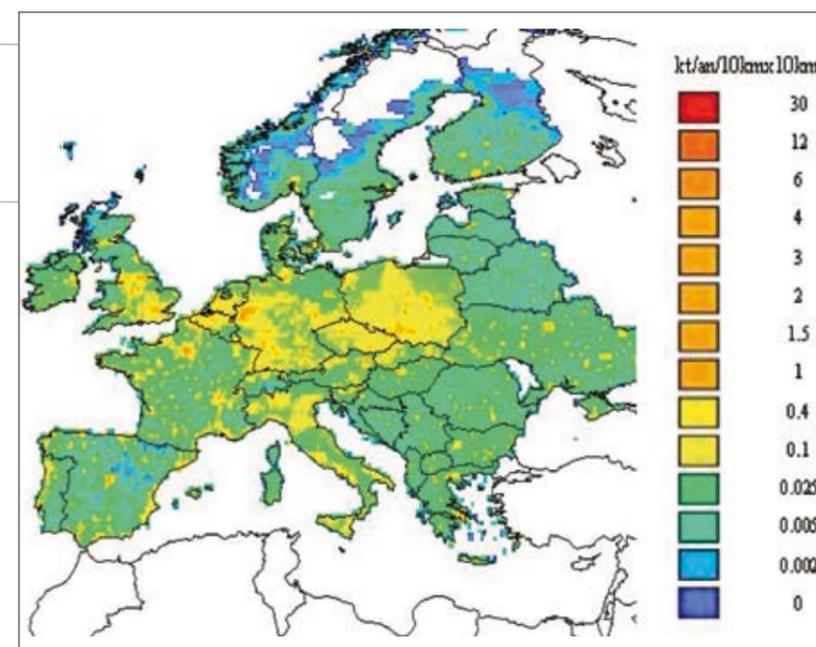
Le climat est un thème majeur des études d'interaction aérosols-rayonnement. Le rayonnement solaire incident (ultraviolet, visible, infrarouge) réagit avec l'atmosphère (gaz et particules) et la surface de la Terre à différents degrés. L'ultraviolet est majoritairement absorbé dans la stratosphère (couche d'ozone), le proche ultraviolet résiduel

jouant cependant un rôle essentiel dans les réactions photochimiques de la troposphère (e.g. dans l'équilibre photostationnaire $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{O}_3$). Le rayonnement infrarouge est absorbé et réémis (rayonnement thermique) sélectivement par certaines molécules atmosphériques (gaz à effet de serre GES/GHG: CO_2 , CH_4 , vapeur d'eau...). Schématiquement, la notion de forçage radiatif (IPCC, 2001) exprime toute modification apportée au bilan énergétique du système climatique par des facteurs externes, e.g. l'évolution des concentrations en gaz à effet de serre et/ou la charge de l'atmosphère en aérosols. Ce concept de forçage radiatif traduit ainsi les effets anthropiques sur le climat des pollutions photochimique et particulaire associées aux activités humaines, notamment les divers types de combustion. Dans la troposphère, les gaz à effet de serre ont un effet positif de réchauffement. En revanche, les aérosols ont un comportement sensiblement plus complexe, positif et/ou négatif, avec des effets directs, semi-directs et indirects. Ainsi, pour les sulfates, du fait d'une diffusion prépondérante, le forçage radiatif est négatif (refroidissement). Les aérosols carbonés peuvent avoir des effets soit positifs (carbone suie -BC), soit négatifs (carbone organique -OC). De plus, les incertitudes sur l'impact radiatif des aérosols sont encore très grandes, d'où leur importance dans les études climatiques. Et ce, d'autant plus, qu'à la différence des gaz à effet de serre, les aérosols présentent des distributions localisées et régionalisées. Plus spécifiquement, il a ainsi été établi, notamment durant ces 20 dernières années, que les aérosols jouent un rôle crucial dans le changement climatique, selon trois formes de forçage :

- Le forçage lié à l'interaction directe des aérosols avec l'énergie solaire incidente et le rayonnement terrestre. La présence d'aérosols, principalement

Distribution des émissions de carbone suie en 1995: hypothèse pessimiste (1024 kt/an).

3



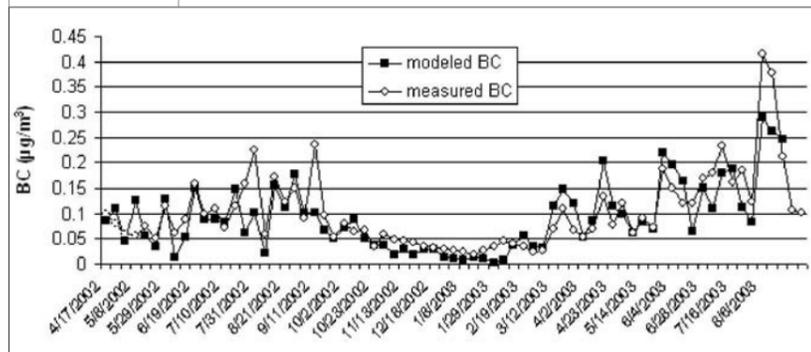
dans les basses couches de l'atmosphère, abaisse localement la température atmosphérique (« forçage négatif ») du fait d'aérosols essentiellement diffusants (sulfates et carbone organique) ou bien l'augmente localement (« forçage positif ») du fait d'aérosols absorbants (du type carbone suie ou poussières). Ce forçage est qualifié d'« effet direct ».

- Le forçage exercé par les aérosols sur le profil vertical de température, agissant ainsi sur la formation et le type des nuages : c'est l'« effet semi-direct » étudié notamment lors de la campagne INDOEX sur l'océan Indien. Une étude similaire a été réalisée sur l'Atlantique Nord.

- Les forçages de type « effet indirect » par les aérosols, du fait des interactions aérosols/nuages. Les aérosols servent de noyaux de condensation dans la formation des nuages. Une forte charge en aérosols en air pollué détermine un grand nombre de petites gouttelettes d'eau et, par suite, donne lieu à la formation d'un nuage fortement réfléchissant. C'est le premier effet indirect, refroidissant. De plus, les gouttelettes étant plus petites, elles n'atteignent pas la taille critique au-delà de laquelle se déclenchent les précipitations, la durée de vie du nuage est, de ce fait, augmentée et la couverture nuageuse moyenne de la Terre est ainsi accrue. Ce processus constitue le second effet indirect des aérosols sur le climat, positif ou négatif, selon l'altitude des nuages.

De nombreuses estimations ont été avancées pour ces trois types distincts de forçage, compte tenu des niveaux de connaissance très différents et des fortes incertitudes. Le forçage direct est le plus étudié, à l'opposé des forçages indirects et du forçage semi-direct. L'INERIS, dans le cadre d'un projet de recherche et par l'intermédiaire d'une thèse de doctorat cofinancée par l'ADEME et co-encadrée par le laboratoire d'Aérodologie, s'est intéressé à la contribution de l'aérosol carboné sur le climat. En effet, il regroupe des espèces dont l'effet peut être contradictoire, d'où la difficulté de traiter de cette question de manière exhaustive. La première étape a été de mettre au point une procédure permettant d'établir un cadastre d'émission sur l'Europe de ces différentes espèces (figure 3).

Un nouveau modèle de chimie-transport incluant les aérosols à l'échelle globale a été développé à partir du modèle TM4^[4]. Ce modèle détaille plus précisément les espèces carbonées d'origines primaire



4

Série temporelle de carbone suie au Pic du Midi (simulation et observations).

et secondaire. La figure 4 représente une série temporelle de carbone suie durant l'été 2003 au pic du Midi simulée par le modèle développé dans le cadre de ce travail de recherche et comparée à des observations.

Ce travail de thèse a permis de développer un modèle d'aérosol global complet particulièrement détaillé sur la fraction carbonée. Ce type de modèle permettra de travailler plus précisément sur l'évolution du climat et de la qualité de l'air à l'échelle régionale en Europe.

SUMMARY

ATMOSPHERIC AEROSOL MODELLING: BEYOND THE PREV'AIR SYSTEM

Since 2004, the French national air quality forecasting system, PREV'AIR, has been providing maps of forecasted ozone and particulate matter (PM) concentrations throughout Europe. At the national level, "analysed maps" based on simulations corrected with observations are also available daily. These products have been elaborated using modelling capacities developed within INERIS. Significant efforts have been placed on particulate matter modelling, considering the growing interest of the people in charge of air quality management and monitoring for these tools. Thus, beyond the PREV'AIR applications, research studies are being conducted within INERIS for improving knowledge in the fields of aerosol phenomenology, modelling and monitoring. The evaluation and the improvement of the CHIMERE-aerosol model is a priority. Comparison with available measurements generally shows that models underestimate the measured concentrations. This is a well-known limit of the current modelling systems, highlighted by several European model inter-comparison exercises: City-Delta and Eurodelta. INERIS participated in these projects, which enabled several phenomena to be clarified: uncertainties in emissions (wood burning, traffic), secondary aerosol formation processes, natural sources, cloud chemistry, etc. These topics are likely to be considered as future priorities for model development.

Nevertheless the current performance of the CHIMERE model is satisfactory enough to use its results for analysing large scale pollution events involving PM (fig. 1), and especially secondary compounds such as ammonium nitrate (fig. 2). INERIS is also involved in research activities related to the links between air pollution and climate change. Aerosols, depending on their nature, play a special role through three main pathways: 1) Affecting the impact of solar radiation and having a cooling (sulphate, organic carbon) or warming (black carbon) effect on the atmosphere. 2) Impacting the vertical distribution of temperature and cloud formation 3) Changing the reflecting properties and lifetime of clouds, inducing a positive or negative effect on climate warming. INERIS has elaborated with the Laboratoire d'Aérodologie (CNRS/LA) and with the support of ADEME a new aerosol model that can take the carbonaceous fraction accurately into account (fig. 4). A first step to reach a more accurate representation of links between future climate and air pollution.

RÉFÉRENCES

[1] Bessagnet B., Hodzic A., Vautard R., et al. (2004). "Aerosol modeling with CHIMERE- preliminary evaluation at the continental scale". *Atmospheric Environment*, 38 (18): pp. 2803-2817.
 [2] Bessagnet B., Hodzic A., Blanchard O., et al. (2005). "Origin of particulate matter pollution episodes in wintertime over the Paris Basin," *Atmospheric Environment*, 39 (33): pp. 6159-6174.
 [3] Cuvelier C., Thunis P., Vautard R., Amann M., Bessagnet B., Bedogni M., Berkowicz R., Brandt J., Brocheton F., Builtjes P., et al. (2007). "CityDelta: A model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 189-207.
 [4] Guillaume B. (2007). «Les aérosols: émissions, formation d'aérosols organiques secondaires, transport longue distance – Zoom sur les aérosols carbonés en Europe». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
 [5] Vautard R., Builtjes P.H.J., Thunis P., Cuvelier C., Bedogni M., Bessagnet B., Honoré C., Moussiopoulos N., Pirovano G., Schaap M., et al. (2007). "Evaluation and intercomparison of Ozone and PM10 simulations by several chemistry transport models over four European cities within the CityDelta project". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 173-188.
 [6] Thunis P., Rouil L., Cuvelier C., Stern R., Kerschbaumer A., Bessagnet B., Schaap M., Builtjes P., Tarrason L., Douros J., et al. (2007). "Analysis of model responses to emission-reduction scenarios within the CityDelta project". *Atmospheric Environment*, volume 41, Issue 1, pp. 208-220.

Les épisodes de pollution de particules de diamètre inférieur à 10 microns (PM10 – les seules réglementées à ce jour) ne font pas l'objet, à l'heure actuelle, de procédures d'information ou d'alerte auprès de la population, généralisées au niveau national. Les concentrations annuelles et journalières de PM10 sont surveillées de façon à garantir le non-dépassement de seuils réglementaires. Ainsi, la prévision et la cartographie journalières des concentrations de PM10 et PM2,5 (de diamètre inférieur à 2,5 microns) telles que réalisées dans PREV'AIR (www.prevoir.org) ont essentiellement une vocation d'information du public et des autorités locales en charge de la gestion de la qualité de l'air. Cependant, il est intéressant de noter que ces données, produites de manière totalement opérationnelle, sont utilisées par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables pour contribuer à l'amélioration de la surveillance des particules en France. En effet, afin d'accéder à des données horaires, les systèmes de mesure automatiques de type microbalances ou jauges bêta, par ailleurs largement utilisés en Europe et aux États-Unis, ont été privilégiés par les pouvoirs publics français et les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA) pour la mesure de la pollution particulaire. Cependant, depuis quelques années, des écarts ont été mis en évidence entre ces méthodes de mesure et la méthode de référence de l'Union européenne. En effet, les appareils automatiques qui chauffaient l'échantillon à mesurer ne tenaient pas compte, jusqu'alors, de la fraction volatile des particules, essentiellement du nitrate d'ammonium. Plutôt que d'imposer un facteur de correction global qui ne tiendrait compte ni des caractéristiques régionales, ni de la variabilité saisonnière des concentrations de particules, la France a préféré mettre en œuvre un ajustement métrologique des données à partir de stations de référence équipées de systèmes de mesure permettant de prendre en compte la fraction volatile des particules. Les données PM transmises à l'Europe seront ainsi ajustées à partir de l'année 2007.

Les données de simulation de concentrations de particules calculées et archivées depuis 2004 à l'INERIS pour chaque heure de l'année par PREV'AIR (et le modèle CHIMERE-aérosol) ont contribué à la mise en place de cette procédure :

- d'une part, en validant la pertinence de la notion de station de référence. En effet, le caractère régional des épisodes de nitrate d'ammonium a été clairement mis en évidence par leur représentation cartographique ;
- d'autre part, en permettant de procéder à la correction des données de mesure de particules antérieures à 2007. Il est en effet probable que la Commission européenne souhaite disposer de données corrigées pour les deux années passées. Le bon comportement de PREV'AIR pour la simulation des aérosols inorganiques secondaires (en particulier le nitrate d'ammonium) et la disponibilité de données horaires simulées permet d'envisager ce type de procédure. Ces exemples montrent bien que PREV'AIR constitue désormais, au-delà de sa mission d'information, une composante incontournable du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air.

SUMMARY

IMPLEMENTATION OF THE CHIMERE-AEROSOL MODEL IN PREV'AIR FOR POLICY SUPPORT

Nowadays, pollution events due to particulate matter are not highlighted by regulatory information or alert procedures as those due to ozone. Yearly and daily concentrations are monitored and reported to the European Commission and should not exceed regulatory thresholds. PM10 and PM2.5 concentration forecasts and maps produced daily by the PREV'AIR system in an operational manner are used by the French Ministry in charge of Ecology for improving the particulate monitoring system in France. In order to obtain hourly concentration values, measurements are provided by automatic devices such as TEOM or beta-gauges. However, these observations are generally not comparable to those measured with the European reference method (gravimetric approach). Automatic methods use heating processes and the volatile fraction of particle collapses, inducing a loss in the total mass concentration. Rather than correcting the TEOM and beta-gauges measurements with a global correction factor, France has chosen to develop a metrological adjustment method. It uses a network of reference stations where the volatile fraction of PM is correctly estimated. PREV'AIR data archives available since 2004 for PM10 and PM2.5 concentrations have contributed to the implementation of this procedure, which has been in operation since January 2007.

- Particulate patterns modelled by the CHIMERE-aerosol model showed that the notion of reference stations makes sense in France. The large scale nature of ammonium nitrate events has been demonstrated.
- If necessary, the model will be used for correcting past data (years prior to 2007), with an appropriate secondary inorganic fraction simulated on an hourly basis by the model. The good performance of the model for these components has enabled confidence to be built in such an approach.
- PREV'AIR is not only an information tool; it has become a real part of the national air quality monitoring system.

Contribution à l'évaluation de l'exposition d'enfants franciliens aux pesticides dans l'environnement intérieur

Cas particulier des insecticides organophosphorés Olivier Blanchard

L'expologie est le nom proposé¹ pour traduire le terme anglais « exposure assessment ». Un article récent de Wallace LA., un des « pères fondateurs » de l'expologie, tire le bilan des implications de ce concept [6]. Pour l'auteur, cette nouvelle discipline scientifique est apparue, il y a 20 ans, dans le but d'évaluer l'exposition humaine aux polluants environnementaux. Le principe fondamental de cette nouvelle science est de « mesurer là où sont les personnes ». Un premier principe a été le développement de dispositifs de prélèvements petits, légers et silencieux. Un second principe a été de mesurer la charge corporelle, pour déterminer la relation entre l'exposition et la dose. Le développement de ces outils a mis en évidence que les sources de pollution étaient disséminées, proches des personnes et échappant à toute réglementation. Ce constat a remis en cause la vision que l'on pouvait avoir dans les années 1970, à savoir une pollution d'origine industrielle provenant des cheminées d'usine et se répandant dans les milieux environnants. Le biomonitoring humain (BMH), ou biosurveillance, est un outil d'identification, de contrôle et de prévention de l'exposition des populations aux substances chimiques. Basé sur l'analyse de tissus ou liquides organiques, il permet d'évaluer l'exposition humaine aux polluants environnementaux et leurs effets sur la santé. Aux États-Unis, depuis deux à trois décennies, de larges programmes nationaux de biomonitoring (NHANES², NHEXAS³, NHATS⁴, etc.) sont développés pour suivre l'évolution de l'exposition de la population américaine à certains métaux lourds, composés organiques persistants ou pesticides organochlorés/organophosphorés, par

exemple. En Europe, le recours au BMH, seule approche permettant une mesure intégrée d'une exposition multisource et multivoie, reste plus marginal. Seule l'Allemagne propose depuis le milieu des années 1980 un suivi de l'exposition de sa population par biomonitoring. Toutefois, d'importants efforts ont été engagés, ces dernières années, par l'Union européenne notamment avec le Plan d'Action Environnement-Santé 2004-2010 et la stratégie SCALE⁵ lancés par la Commission européenne. La Commission vise, dans l'une de ses actions, à définir une approche cohérente de la biosurveillance en Europe. En France, en relation avec les réflexions européennes menées dans le cadre de l'initiative communautaire SCALE, l'action 37 du PNSE⁶ vise à « étudier les modalités d'utilisation des indicateurs biologiques d'exposition en milieu professionnel et en population générale ». Parallèlement à ces programmes nationaux ou internationaux, la publication d'un nombre de plus en plus important d'études ayant recours à l'utilisation de biomarqueurs (d'exposition, d'effet ou de susceptibilité) témoigne également de l'intérêt croissant de cette approche pour mieux caractériser l'exposition des populations à l'échelle nationale, régionale ou locale. Les substances recherchées sont variées, allant des métaux ou des dioxines, qui bénéficient de techniques de mesure relativement bien maîtrisées dans les milieux biologiques usuels, à des substances plus émergentes (phtalates, pesticides, polybromodiphényléthers...) pour lesquelles des améliorations ou standardisations analytiques sont encore

nécessaires. Si le sang ou les urines restent les milieux biologiques les plus largement employés, des valeurs de référence y étant même aujourd'hui proposées pour la population générale, certains travaux testent le recours à des milieux alternatifs (air expiré, ongles, méconium...) pour mieux ou plus aisément caractériser l'exposition des populations.

LE PROJET EXPOPE

Réalisé à l'INERIS en collaboration avec la Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de l'Université de Paris 5, le projet EXPOPE s'inscrit dans cette démarche d'expologie [2-5]. Son objectif est de contribuer à évaluer l'exposition non alimentaire d'enfants franciliens, à un certain nombre de pesticides. Les outils d'évaluation reposent sur des questionnaires, des prélèvements de résidus présents dans l'air intérieur, de résidus cutanés manuportés et des recueils d'urines pour doser les métabolites urinaires communs à de nombreux insecticides organophosphorés (OPs). Trente-huit composés d'action insecticide, herbicide ou fongicide ont été choisis, en fonction de leurs utilisations, de leur toxicité et de leur rémanence.

Les conditions de l'étude

L'étude a été menée chez 73 enfants vivant en pavillon et 57 enfants vivant en appartement, âgés de 6 à 7 ans, scolarisés en écoles élémentaires de trois zones d'Île-de-France. Les logements étaient répartis comme suit : 46 % dans Paris intra-muros et la petite couronne, 39 % dans l'Essonne, et 15 % dans le Val-d'Oise. Le logement était, selon les cas, une maison individuelle avec jardin (55 %), un appartement (41,5 %) ou un autre type d'habitat – maison de ville sans jardin, appartement en rez-de-jardin privatif – (3,5 %). La date de construction du logement était antérieure à 1955 dans 29 % des cas, comprise entre 1955 et 1969 (12 %) et postérieure à 1969 (54 %). Pour six logements, il n'a pas été possible de renseigner la période de construction. Un animal était présent dans 26 % des foyers, plus d'un animal dans 6 % et aucun

animal dans 68 %. Un chat ou un chien était présent dans 29 % des foyers. Concernant l'environnement du logement, 55,5 % des foyers possédaient un jardin privatif, 32 % bénéficiaient d'une cour intérieure, 24 % d'une cour paysagée, 95 % de jardins attenants ou d'espaces verts à proximité (à moins de 100 mètres du domicile) et 31,5 % des domiciles donnaient sur une rue plantée d'arbres. Durant l'année précédant l'enquête, 87 % des familles ont utilisé au moins un pesticide, le plus souvent un insecticide. Dans 94 % des foyers, au moins un produit de type pesticide a été retrouvé, dont au moins un insecticide dans 93 %, au moins un fongicide pour plantes dans 30 %, et au moins un herbicide dans 32 % des foyers. Les formes présentes au domicile étaient le plus souvent des bombes aérosols ou des sprays, suivies par les formulations liquides puis les plaquettes diffusives. Les autres formulations les plus fréquentes étaient les poudres, suivies des pièges fermés et des shampooings. La famille chimique d'insecticides la plus fréquente était celle des pyréthrinoides, présente dans 88,5 % des logements (en moyenne 3,2 ± 2,1 composés par foyer), suivie des OPs, dans 39 % des logements (en moyenne 0,7 ± 0,8 composé par foyer). Au moins un insecticide appartenant à une autre famille était retrouvé dans 41 % des foyers (carbamates 21,5 %, dont propoxur 15,5 %, fipronil 16 %, dicofol 15,5 %). Plus d'un quart des familles ont rapporté l'intervention d'un professionnel de la désinsectisation au domicile.

Les résultats

Au total, 130 prélèvements d'air, 129 prélèvements de résidus cutanés, 126 prélèvements d'urines et 65 prélèvements de poussières de sols ont été effectués. Les mesures ont montré que le lindane, l'alpha-HCH et le propoxur étaient les pesticides les plus fréquemment retrouvés dans l'air (dans respectivement 88 %, 49 % et 44 % des logements). Les niveaux d'OPs dans l'air et sur les mains étaient significativement corrélés, mais aucune corrélation n'a été retrouvée avec les niveaux de métabolites

urinaires. Les niveaux de propoxur dans l'air et sur les mains étaient également significativement corrélés. Le type de logement et son ancienneté sont des facteurs influençant les concentrations aériennes en lindane et en alpha-HCH. La présence d'un jardin ou d'une cour paysagée influence de façon significative les concentrations d'insecticides OPs dans l'air. La saison, le type de logement ainsi que la présence de plantes à l'intérieur du domicile sont significativement associés aux niveaux de résidus cutanés d'insecticides OPs. Soixante-dix pour cent des enfants (88 enfants sur 126) ont excrété au moins un des six métabolites urinaires des OPs (dialkylphosphates), la moyenne est de 1,6 ± 1,4 métabolites urinaires mesurés par échantillon d'urine. Le nombre de dialkylphosphates urinaires par enfant varie de zéro à cinq. Les métabolites méthyl (DMP⁷ et DMTP⁸ surtout) sont plus fréquents que les métabolites éthyl : 65 % des enfants excrètent au moins un métabolite méthyl et seulement 30 % un métabolite éthyl. Le DMP est le métabolite le plus fréquemment mesuré, mais les concentrations les plus élevées sont observées avec le DMTP et dépassent 1,6 µmol/g créatinine. Le traitement anti-termite est significativement associé à des niveaux plus élevés de dialkylphosphates urinaires. Enfin, le fait d'habiter une maison est associé à des concentrations plus importantes en isopropoxyphénol urinaire (marqueur spécifique de l'exposition au propoxur). En conclusion, l'étude a permis de mettre en évidence l'exposition d'enfants franciliens, dont les parents ne sont pas professionnellement exposés, à des pesticides variés et dont certains sont interdits depuis plusieurs années. Les niveaux observés sont globalement du même ordre de grandeur que ceux des études menées antérieurement, aux États-Unis pour la plupart. Toutefois, les composés les plus fréquents diffèrent sensiblement. Le lindane, le propoxur, le diazinon et le dichlorvos sont les composés pour lesquels une évaluation plus approfondie des expositions dans la population générale nous semble nécessaire.

NOTES

- 1 - Dictionnaire Robert Édition 2007.
- 2 - National Health and Nutrition Examination Survey : <http://www.cdc.gov/nchs/nhanes.htm>
- 3 - National Human Exposure Assessment Survey : <http://www.epa.gov/nerl/research/nhexas/nhexas.htm>
- 4 - National Human Adipose Tissue Survey
- 5 - Science Children Awareness Legislation Evaluation : http://ec.europa.eu/environment/health/pdf/com2004416_fr.pdf
- 6 - Plan National Santé-Environnement : <http://www.sante.gouv.fr/html/dossiers/pnse/rapport.pdf>
- 7 - DMP : diméthylphosphate.
- 8 - DMTP : diméthylthiophosphate.



SUMMARY CONTRIBUTION TO THE ASSESSMENT OF EXPOSURE TO INDOOR PESTICIDES IN FRANCE

Pesticides are widely used for agricultural, industrial and residential purposes. This causes concern for animals, humans and ecosystems. The non-dietary exposure of populations has not been well studied, especially in France. In this context, we focused on indoor environment and cutaneous contamination by selected pesticides and tried to determine the internal exposure to some organophosphorus (OP) insecticides. This work was conducted in three phases.

First, we selected and developed the measurements and questionnaires to perform the study. A series of questionnaires were created, gathering sociodemographic information, data on the environment of the houses studied and on lifestyles and probable sources of pesticide exposure (pesticide use habits, description of the products used) of the subjects. Selected measurements were indoor air measurement, cutaneous residues assessed by means of hand wipes and urinary dialkylphosphates, metabolites common to numerous OP insecticides. Analytical methods (gas and high performance liquid chromatography combined with selective detectors) were chosen, adapted and validated in collaboration with the INERIS laboratories. A selection of various insecticides, herbicides and fungicides was made, according to their use, their toxicity and their remanence.

The **second** phase was the application of this protocol to an adult population (n=41) occupationally exposed or non-occupationally exposed to pesticides. Measurements were taken at the workplace of gardeners, florists and veterinary workers and at home for non-occupationally exposed subjects. OPs, organochlorine and propoxur insecticides, as well as some herbicides and fungicides, were detected in the air of every type of premises and on the hands of every group of subjects. In our sample, gardeners and florists were mostly exposed to methyl-OPs, and veterinary workers to ethyl-OPs. The general population was exposed to the same pesticides, but at somewhat lower levels. Urinary metabolites of OP insecticides did not significantly differ between the different exposed groups. This work allowed us to assess the feasibility of our study design.

The **third** part of this work consisted in studying the non-dietary exposure to pesticides of children aged 6-7 years, attending school in three predetermined areas in the Ile-de-France region. Our hypothesis was that the type of housing and housing environment could influence children's exposure to pesticides. We recruited 73 children living in houses and 57 living in apartments. In addition to the measurements already described, house dust was also sampled for approximately 50% of the households. A garden, a cat and/or a dog were present in 55.5% and 29% of the households, respectively. At least one pesticide product was present in 94% of the homes, mostly insecticides. During the year preceding the study, 87% of the parents reported the use of at least one pesticide product, mostly insecticide (average quantity of 2.5 products used). More than 25% of the parents mentioned at least one professional pest-control operation at home. Lindane, alpha-HCH and propoxur were the most frequently detected compounds in indoor air (in 88%, 49%, and 44% of the samples, respectively). Due to the great number of non quantifiable values, non parametric statistics were performed. Air and hand OP levels were significantly correlated, whereas no correlation was observed with urinary DAP levels. Propoxur levels in air and on hands were also significantly correlated. The sampling season, type of housing and ventilation were predictors of lindane and alpha-HCH air concentrations. Ventilation, use of insecticides against head lice and the presence of a garden were significantly associated with air concentrations of OP insecticides. The sampling season, type of housing and plants inside the home were associated with levels of hand OP contamination of the children. Termiticide treatment, the presence of a cat or a dog and use of insecticide against head lice for the child studied significantly influenced urinary dialkylphosphate concentrations.

To conclude, the study design and the measurements we chose allowed us to describe non-dietary exposure to various urban populations in the Ile-de-France region. The factors that seem to influence this exposure suggest new orientations for future studies, to better define which subjects are overexposed.

RÉFÉRENCES

- [1] Blanchard O. (2006). «Exposition de la population générale aux pesticides présents dans l'environnement intérieur». *Pollution Atmosphérique*, n° 191, juillet - septembre 2006.
- [2] Bouvier G., Blanchard O., Momas I., Seta N. (2005). "Contribution to the assessment of the exposure to indoor pesticides in France". *Pollution Atmosphérique*, numéro spécial - Décembre 2005.
- [3] Bouvier G., Blanchard O., Momas I., Seta N. (2006). "Environmental and biological monitoring of exposure to organophosphorus pesticides: Application to occupationally and non-occupationally exposed adult populations". *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 16, pp. 417- 426.
- [4] Bouvier G., Blanchard O., Momas I., Seta N. (2006). "Pesticide exposure of non-occupationally exposed subjects compared to some occupational exposure: A French pilot study." *Science of the Total Environment*, 366, issue 1, pp. 74-91.
- [5] Bouvier G., Seta N., Vigouroux-Villard A., Blanchard O., Momas I. (2005). "Insecticide urinary metabolites in nonoccupationally exposed populations". *Journal of Toxicology and Environment Health*, Part B, 8, pp. 485-512.
- [6] Wallace LA. (2001). "Human exposure to volatile organic pollutants: Implications for Indoor Air Studies". *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, pp. 269-301.

TRANSFERT DES CONTAMINANTS

Application du laser à la caractérisation des nanoparticules dans l'air

Émeric Fréjafon, Olivier Le Bihan, Tanguy Amodeo, Christophe Dutouquet

La technique LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) consiste à focaliser de brèves impulsions lasers (femtosecondes, nanosecondes) à la surface de solides, de liquides ou bien encore dans des gaz afin de transformer la matière présente en un plasma de volume sub-millimétrique. Cela permet d'analyser ensuite la composition élémentaire originelle à partir du spectre émis par les atomes de ce plasma. Cette technique est développée à l'INERIS pour la détection des nanoparticules présentes dans l'air ou préservées sur des substrats. Si la fraction gazeuse des polluants est de mieux en mieux évaluée, la fraction particulaire reste difficile à caractériser car les paramètres à mesurer sont complexes. En effet, la concentration massique et son évolution temporelle s'avèrent être des indicateurs très insuffisants. D'autres caractéristiques des particules doivent être prises en compte :

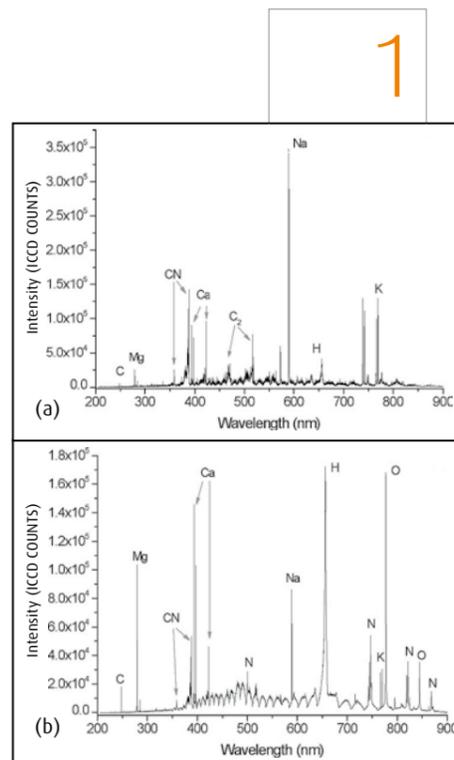
- leur composition chimique ainsi que les éventuels composés adsorbés à leur surface dont certains peuvent être toxiques (mutagènes, cancérigènes...);
 - leur distribution de taille afin de quantifier les fractions inhalées;
 - leur spatialisation et leur évolution dans la colonne atmosphérique.
- Pour répondre à ce besoin de caractérisation, de nouvelles méthodologies physico-chimiques ont été mises en place, puis validées lors de campagnes de mesurages spécifiques. Elles ciblent les nanoparticules car leur production et leur utilisation sont en développement exponentiel depuis la découverte des propriétés particulièrement intéressantes des matériaux à l'échelle nanométrique, alors que leurs effets potentiels sur la santé font craindre une toxicité accrue de ces dernières par rapport aux particules de même composition

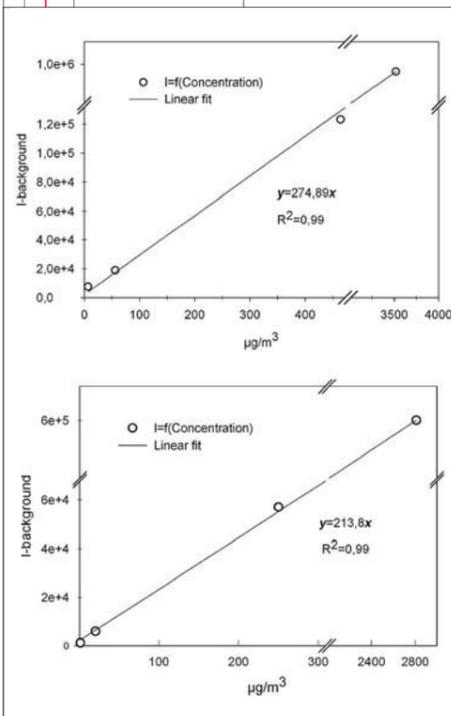
chimique mais de taille supérieure. Dans ce contexte, la technique LIBS, centrée sur l'identification des espèces chimiques, a été développée dans une configuration permettant un couplage avec les dispositifs de mesure du nombre et de la taille des particules. En pratique, les dispositifs expérimentaux ont pu faire appel à l'instrumentation SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). L'INERIS s'est engagé dans ce développement, au plan européen comme partenaire majeur de Nanosafe 2, au plan régional dans le cadre d'une convention entre l'INERIS et la Région Picardie et enfin dans le cadre du programme spécifique NANORIS financé par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables. Des développements ont été réalisés dans des domaines très divers.

FAISABILITÉ DE DIFFÉRENCIATION DE BACTÉRIES

Afin de démontrer la possibilité de détection de nanoparticules présentes en faible quantité dans un niveau de fond important pouvant présenter des compositions chimiques élémentaires très voisines, nous avons réalisé une première action visant à optimiser la réponse LIBS dans le cas d'une détection d'éléments à l'état de traces. L'étude de la réponse LIBS de bactéries a permis d'optimiser cette instrumentation pour la détection de composés présents à l'état de trace. Nous avons mis en évidence que l'étude du rapport entre les différents constituants élémentaires d'une bactérie, et notamment le rapport Carbone/Magnésium, permettait de différencier plusieurs types de bactéries et ainsi, comme le montre l'exemple ci-dessous, d'identifier la signature propre de chacune. Dans l'exemple donné ici nous constatons

Spectres de E. coli obtenus en utilisant un laser femtoseconde (figure a) et nanoseconde (figure b).



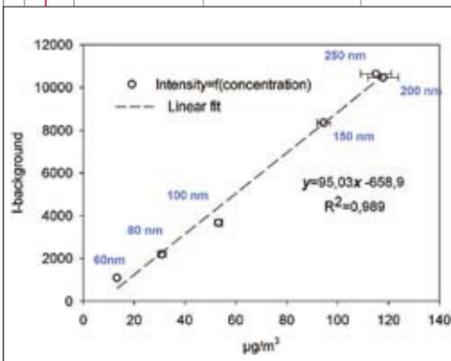


2

Réponse LIBS (intensité du spectre après soustraction du bruit de fond) en fonction de la concentration massique dans l'air de nanoparticules de sodium (en bas) et de potassium (en haut).

Réponse LIBS en fonction de la concentration massique pour différentes tailles de particules.

3



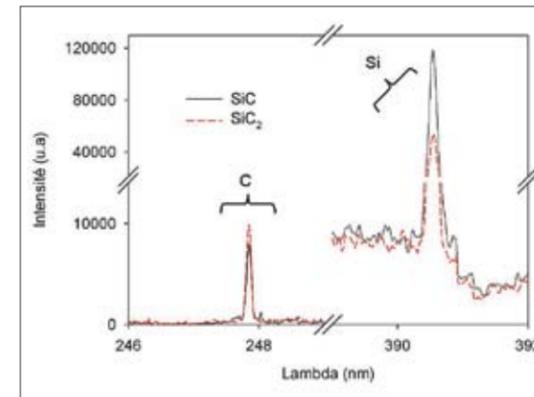
que la réponse spectrale normalisée des raies Carbone/Magnésium est différente pour des bactéries E. coli de type « Gram - » contenant plus d'éléments Mg que des bactéries B. subtilis qui sont de type « Gram + ». Les premiers essais ont été obtenus en utilisant un laser femtoseconde. Puis nous avons pu obtenir des résultats équivalents en utilisant un laser industriel configuré pour émettre des longueurs d'onde UV. Cela a permis de démontrer la faisabilité du mesurage en laboratoire mais également qu'un instrument industriel est envisageable à très court terme.

DÉTECTION DE NANOPARTICULES MANUFACTURÉES DANS L'AIR AMBIANT

L'étape suivante est passée par la construction d'un générateur de particules calibrées afin de quantifier la sensibilité de la technique LIBS dans le cas de nanoparticules générées dans l'air. Des premiers tests ont ainsi été menés sur des aérosols polydispersés de type salin. Des spectres ont été réalisés pour différentes concentrations d'aérosols. Une réponse linéaire de l'intensité LIBS en fonction de la concentration en nanoparticules a été observée. Des résultats de mesurage équivalents ont été ensuite obtenus pour différentes nanoparticules manufacturées. Puis, nous avons évalué l'influence de l'effet de la taille des particules sur l'analyse LIBS. Une étude [Hahn & Carranza, (2002)] avait mis en évidence une non-linéarité quand la taille des particules augmente. Un aplatissement de la courbe d'étalonnage était observé, effet attribué par les auteurs à une vaporisation incomplète par le plasma. Il n'en est rien dans notre application où le plasma est suffisamment énergétique (50 mJ) pour vaporiser la totalité des nanoparticules jusqu'à des tailles de 200 nm. Nous avons ainsi pu mettre en évidence que le signal LIBS est quasi linéaire, démontrant qu'il rend compte de la quantité de matière pour les tailles de particules considérées. Enfin, nous avons pu accéder à une première estimation de la limite de détection instrumentale de l'ordre de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, qui semble dépendre de la concentration de matière, mais non de la taille de particules.

ASSERVISSEMENT DES PROCÉDÉS DE FABRICATION DE NANOPARTICULES

Dans un contexte de développement à l'échelle industrielle de produits à base de nanoparticules, il était nécessaire de s'engager dans une démarche visant à lever les verrous relatifs à l'industrialisation des procédés et notamment d'engager des travaux pour fiabiliser et sécuriser les installations. Pour ce faire, il est notamment nécessaire de mesurer sur la ligne de process et en continu un certain nombre de caractéristiques physico-chimiques des nanoparticules. Les études ci-dessus ont permis de montrer que, de par sa nature flexible, la technique LIBS est une méthode facile à mettre en œuvre et les applications sont nombreuses et variées. Les analyses peuvent être réalisées à distance, sans prélèvement d'échantillons, avantage significatif dans les environnements hostiles. Ainsi, la technique LIBS est très bien adaptée aux analyses en ligne. Dans ce contexte, nous avons réalisé en collaboration avec le CEA un essai de faisabilité de suivi d'un procédé de fabrication de nanoparticules de carbure de silice. L'enjeu visait à évaluer la faisabilité d'une analyse stœchiométrique en temps réel dans un réacteur de production de nanoparticules par technique LIBS non intrusive. Pour ce faire, nous avons utilisé des modélisations de physique statistique pour interpréter les résultats des mesures LIBS afin de relier l'intensité du signal spectroscopique aux rapports des densités des espèces sondées. Les plasmas produits par un faisceau laser impulsif ayant un caractère transitoire mais de forte densité électronique qui, sur un intervalle de temps donné, vont se trouver à l'équilibre Thermodynamique Local (ETL) où l'équilibre collisionnel est réalisé mais pas l'équilibre radiatif (le rayonnement n'est pas donné par la loi de Planck mais par un spectre de raies). En utilisant ces propriétés mais également en optimisant les paramètres des conditions et des outils d'analyses, nous avons donc pu mettre en évidence qu'il était alors possible de déterminer par LIBS les rapports stœchiométriques des nanoparticules atomisées dans le plasma. Ces résultats prometteurs ont conduit à engager des études spécifiques visant à confirmer ces premières conclusions.



4

Spectre de carbure de silice pour deux stœchiométries SiC et SiC_2 . Visualisation de la modification d'intensité des raies de carbone et de silice en fonction du dosage.

Ils visent à permettre à moyen terme d'accéder à une instrumentation permettant l'asservissement d'un procédé de fabrication de nanoparticules, et/ou la détection d'émissions de ces nanoparticules non contrôlées.

COLLABORATIONS

Ces études ont eu le support de la Région Picardie, du MEDAD et de la Commission européenne. Outre les nombreuses équipes impliquées telles que les 25 partenaires présents dans le projet européen Nanosafe 2 (www.nanosafe.org), ces études

ont été réalisées en étroite collaboration avec :

- des laboratoires : Paris XII-Créteil, UCBL-CNRS-LASIM-Lyon, UPJV-CNRS-LRCS-Amiens ;
 - des centres de recherche : CEA/DEN/DPC, CEA/DRT/LITEN ;
 - des constructeurs et fabricants de matériels : ANDOR, AVANTES, IVEA, KALUTI ;
 - des partenaires industriels : GRL-ARKEMA.
- Ces premiers résultats très encourageants vont donner lieu à de nombreux développements inscrits dans deux projets ANR 2007 et deux projets européens du 7^e Programme-cadre en cours de construction.

SUMMARY

OPTICAL TECHNIQUES APPLIED TO THE DETECTION AND CHARACTERISATION OF ATMOSPHERIC PARTICULATE MATTER

If pollution by gaseous compounds is nowadays evaluated more and more accurately, that relating to particles remains difficult to quantify in a precise manner because their characteristic parameters are much more complex than those of gaseous pollutants. Indeed, monitoring of temporal evolution of the mass concentration in the ambient air or in the workplace proves to be an insufficient tool to predict the environmental or toxic impact. Thus, nanoparticle leak detection in the workplace cannot be addressed using instrumentation based on mass concentration metric. Thus, in the framework of the European Nanosafe 2 project, we have developed new methodologies in order to characterise or detect manufactured nanoparticles. This instrumentation was able to produce on-line size resolved chemical identification of nanoparticles in air, where physical characterisation was obtained using electrical mobility analysis (DMA) and chemical identification was obtained using laser induced plasma spectroscopy (LIBS or LIPS). Performance analyses have shown a detection limit of several $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for 40nm nanoparticles associated with really good reproducibility and without humidity dependency. Moreover, the Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) technique was also evaluated as a quality process monitoring tool. LIBS was employed for on-line and real time process monitoring during nanoparticle production by laser pyrolysis, where on-line and real time monitoring systems could greatly enhance the process optimisation and accordingly improve its performance. For this purpose, experiments aiming at demonstrating the feasibility of an on-line monitoring system for silicon carbide nanoparticle production using the LIBS technique were carried out. Nanosecond laser pulses were focused into a cell through which part of the nanoparticle flux diverted from the production process was flowed for LIBS analysis purposes. The nanoparticles were vaporised within the laser induced plasma created in argon used as background gas in the process. Temporally resolved emission spectroscopy measurements were performed in order to control nanoparticle stoichiometry. Finally, promising results were obtained and on-line Si/CX stoichiometry was successfully observed.

RÉFÉRENCES

- [1] Baudelet M., Guyon L., Yu J., Wolf J.-P., Amodeo T., Fréjafon E., Laloi P. (2006). "Spectral signature of native CN bonds for bacterium detection and identification using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy". *Applied Physics Letters*, vol. 88.
- [2] Baudelet M., Guyon L., Yu J., Wolf J.-P., Amodeo T., Fréjafon E., Laloi P. (2006). "Femtosecond time resolved laser-induced breakdown spectroscopy for detection and identification of bacteria: a comparison to the nanosecond regime". *Journal of Applied Physics*, vol. 99.
- [3] Baudelet M., Yu J., Bossu M., Jovelet J., Wolf J.-P., Amodeo T., Fréjafon E., Laloi P. (2006). "Discrimination of microbiological samples using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy". *Applied Physics Letters*, vol. 89.
- [4] Amodeo T., Baudelet M., Attoui M., Le Bihan O., Yu J., Fréjafon E. (2006). "Chemical and physical survey as a tool for accidental and chronic risk assessment". IAC 2006, St Paul, USA.
- [5] Amodeo T., Baudelet M., Attoui M., Le Bihan O., Yu J., Fréjafon E. (2006). "Physical and chemical identification of manufactured nanoparticles in ambient atmosphere using LIBS technique". 4th International Workshop on Optics and Spectroscopy, Viet-Nam.
- [6] Yu J., Baudelet M., Guyon L., Bossu M., Jovelet J., Wolf J.-P., Amodeo T., and Fréjafon E., Laloi P. (2006). "Femtosecond Laser-Induced Breakdown Spectroscopy for Microbiological Sample Analysis". LIBS 2006, 4th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Montreal, Canada.
- [7] Yu J., Baudelet M., Guyon L., Méjean G., Salmon E., Kasparian J., Wolf J.-P., Rohwetter Ph., Stelmazczyk K., Wöste L., Amodeo T., Fréjafon E., Laloi P. (2006). "New frontiers in laser-induced breakdown spectroscopy". First China-France Workshop on Intense Lasers and Applications, Zhenjiang, China.
- [8] Yu J., Baudelet M., Guyon L., Laloi P., Amodeo T., Fréjafon E., Wolf J.-P. (2006). "Bacterium detection and identification using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy". Pitcon 2006, Organized session "21st century LIBS", Orlando, USA.
- [9] Amodeo T., Dutouquet C., Attoui M., Fréjafon E., Le Bihan O. (2006). «Méthode de caractérisation physico chimique pour la sécurisation des procédés de fabrication des particules ultrafines et des nanoparticules.» Actes du 22^e Congrès français sur les aérosols, 29/30 novembre 2006, pp. 193-197.

L'évolution des approches de la maîtrise des risques dans les infrastructures souterraines

Emmanuel Ruffin

1

CONTEXTE

La sécurité des milieux souterrains confinés repose sur un ensemble de normes et standards utilisés pour construire, exploiter et maintenir les différents types d'ouvrages souterrains. Cet ensemble de règles permet de réduire les coûts d'étude, d'opération et de développement des ouvrages tout en assurant un niveau global de performance en matière de sécurité. Cependant, il est clair que la seule application de ces règles ne permet pas de garantir la maîtrise des risques dans les ouvrages souterrains, surtout si ceux-ci sont novateurs dans leur conception. En effet, l'application des différentes obligations techniques portées sur les sous-systèmes de sécurité ne permet pas de garantir un niveau de sécurité global, surtout lorsque les ouvrages comportent des systèmes techniques innovants ou un concept d'utilisation différent. L'application de ces multiples règles n'assure pas non plus une compréhension globale et efficace du système (dans son ensemble) permettant aux utilisateurs et aux exploitants d'adopter aisément les comportements adéquats pour un usage sûr de l'infrastructure souterraine. L'approche globale et systémique de la maîtrise des risques dans les milieux souterrains fait l'objet d'un ensemble de recherches engagées à l'INERIS depuis les années 1990. Ces recherches ont largement contribué à l'évolution des pratiques de maîtrise des risques dans ces ouvrages et des programmes structurants pour l'avenir de la recherche européenne dans ce domaine sont en cours de réalisation.

1990 - PASSER D'UNE APPROCHE LOCALE À UNE APPROCHE GLOBALE D'ESTIMATION DES RISQUES

Scientifiquement et en pratique, de nombreux freins existent pour passer d'une approche locale à une approche globale et systémique de la sécurité. Notamment :

- le découpage en sous-systèmes « physiques » qui implique une réelle difficulté à faire communiquer différents modèles physiques (modèle de ventilation, modèle de dispersion tenant compte de la stratification, modèle de combustion et d'incendie...) dans une approche globale des effets accidentels en milieu souterrain ;
- la prise en compte simultanée de tous les éléments moteurs, dissipateurs ou de transformation du système souterrain qui influencent le déroulement des situations accidentelles. Il s'agit par exemple, des ventilateurs, du déplacement de véhicules induisant des courants d'air, de l'effet des brouillards d'eau sur un incendie ;
- les interactions dynamiques entre les effets physiques et les systèmes, et sous-systèmes de sécurité. La simple combinaison d'un train entrant dans une ramification munie d'un unique puits d'aéragage naturel peut conduire, en situation d'incendie, à des bifurcations de comportement du système selon les conditions limites appliquées [1]. Dans la pratique cela peut se traduire par un « retournement de fumées », c'est-à-dire l'inversion du sens de propagation des fumées d'un incendie. Cette situation peut s'avérer dramatique en intervention d'urgence.

Évaluation comparée des systèmes d'évacuation dans une situation simple d'incendie en tunnel – lignes noires : les usagers confrontés à des zones très dangereuses – lignes blanches : les usagers pouvant évacuer normalement.

2

Ces constats et les recherches engagées par l'INERIS dès 1990 ont permis de mettre en place un nouvel outil de simulation [2], nommé NewVendis®, qui permet de prévoir les comportements dynamiques globaux d'un ouvrage simple (tunnels routiers ou ferroviaires), (figure 1), ou complexe (plusieurs centaines de galeries de mines, métro ou stockage souterrain) en tenant compte temporellement de l'ensemble des phénomènes physiques requis et des systèmes qui influencent le comportement de la source accidentelle et de ses effets dans l'ouvrage. La catastrophe du Mont-Blanc [3], survenue en 1999, est dramatiquement venue rappeler que la cinétique et l'approche globale de la maîtrise des risques devaient venir compléter le corpus de normes et standards recouverts par les instructions techniques. Dans le domaine des tunnels routiers, les recherches de l'INERIS ont fortement contribué à l'évolution des réglementations qui ont alors vu l'introduction des études spécifiques de dangers, actant de la prise en compte des approches systémiques et de la cinétique [4] dans la maîtrise des risques.

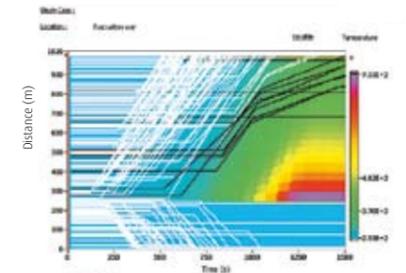
1997 - PASSER D'UNE APPROCHE TRÈS TECHNIQUE À LA PRISE EN COMPTE DES FACTEURS HUMAINS ET ORGANISATIONNELS

À cette époque, les facteurs humains et organisationnels étaient trop souvent mis au second plan dans l'étude des risques en milieux confinés. C'est aujourd'hui un axe fort de travail de nombreux organismes. L'INERIS a contribué activement, dès 1997, à cet axe de recherche de différentes façons. Schématiquement plusieurs

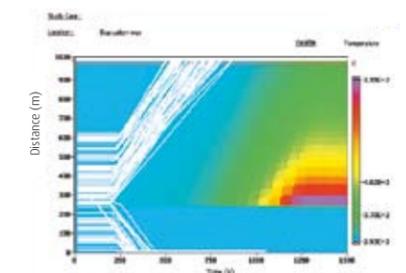
composantes importantes peuvent être listées :

- le comportement des usagers en situation pré-accidentelle ou en situation d'évacuation ;
- le comportement des personnels d'exploitation et les opérateurs des centres de contrôles ;
- l'organisation et la gestion des risques aux différentes phases d'exploitation.

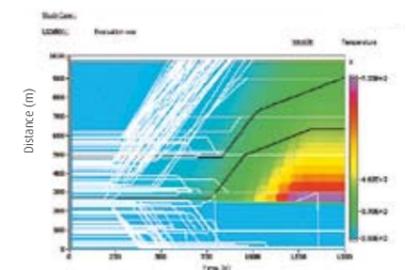
Dans le cadre des ouvrages souterrains, le premier axe a fait l'objet d'une contribution de l'INERIS au projet de recherche européen UPTUN. Il s'est avéré que de nombreuses questions étaient encore à résoudre dans ce domaine et que surtout les moyens expérimentaux permettant la validation des modèles de comportement en situation accidentelle faisaient encore cruellement défaut. Cependant, des résultats intéressants ont été obtenus, qui permettent de mettre au point l'intégration d'un modèle d'évacuation de personnes (CRISP) au modèle NewVendis® d'évaluation globale des situations accidentelles [5]. La figure 2 montre qu'il est aujourd'hui possible, par exemple, de tester l'influence des caractéristiques des dispositifs d'évacuation de personnes. Ces travaux de recherche ont également permis, avec la compréhension des éléments clés de l'organisation de l'exploitation, des plans de secours et des facteurs humains associés d'analyser l'accident catastrophique du métro de Daegu [6], survenu en 2003. Les résultats montrent qu'aujourd'hui encore, il convient de renforcer ces démarches d'analyse globale de la sécurité des systèmes souterrains afin de rendre ces systèmes plus robustes aux effets accidentels ou aux malveillances et de mieux tenir compte du comportement des usagers dans la conception des ouvrages.



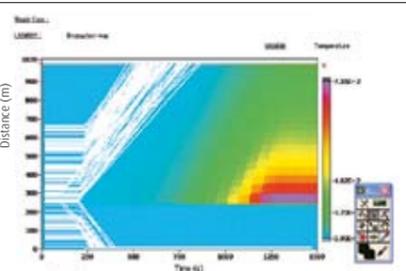
Pas d'issues de secours
Pas de détection ni d'alarme



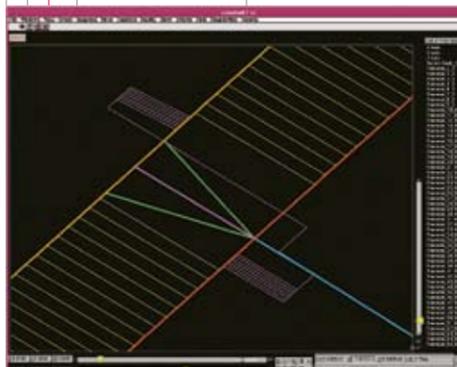
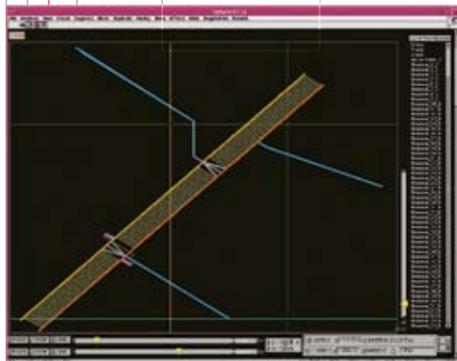
Pas d'issues de secours
Avec détection et alarme



Issues de secours (200 m)
Pas de détection ni d'alarme



Issues de secours (200 m)
Avec détection et alarme



Exemple de simulation de risques accidentels avec NewVendis® dans le tunnel ferroviaire de base du Lötschberg.

3



Fumées sortant du métro durant l'incendie de la catastrophe de Daegu, près de Séoul.

2000 - PASSER DE LA PRISE EN COMPTE DES SITUATIONS D'INCENDIE À LA PRISE EN COMPTE D'AUTRES SOURCES DE DANGERS

Outre les événements accidentels fortuits, les événements à caractère intentionnel ou mettant en jeu des substances dangereuses amènent aujourd'hui des voies de recherche communément admises. Dès 2000, l'INERIS a lancé un projet de recherche dédié à l'étude des effets accidentels de produits dangereux en milieu souterrain.

Ceci résultait d'un double constat :

- trop peu de connaissances existent sur le comportement des sources de produits dangereux dans les ouvrages souterrains et notamment sur le développement des rejets de gaz lourds ou cryogéniques ;
- les études des couches stratifiées sont presque toujours réalisées dans un cadre académique, c'est-à-dire sans les perturbations engendrées dans les situations réelles, où la présence d'équipements, d'obstacles ou de véhicules constitue la situation normale de dispersion rencontrée dans la réalité.

De ce fait, les modèles physiques théoriques et analytiques ne peuvent donner qu'une image très éloignée de la réalité pour ces situations accidentelles. Le projet STRATUS a donc abordé cette question par une double approche expérimentale et numérique.

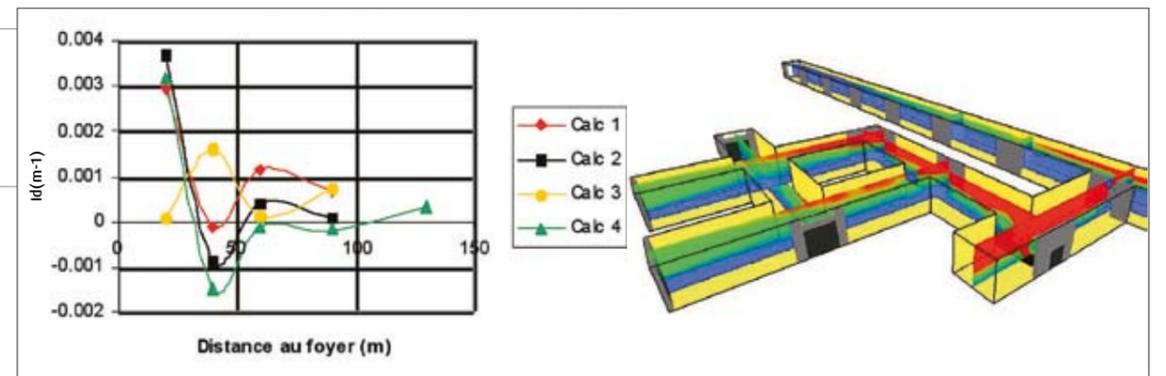
Des premiers résultats [7], qui seront complétés par ceux d'un projet plus large initié dans le cadre du programme « Sécurité Globale » de l'ANR, ont permis de confirmer l'importance de réaliser une recherche appliquée des situations accidentelles mettant en scène des situations réalistes. En effet, trop souvent, la perception des services de secours diffère de celle issue des recherches plus académiques sur le comportement des couches stratifiées. Le développement de situations réalistes qui seront étudiées dans le projet EGSISTES devrait permettre, à terme, de mieux concevoir et modifier les infrastructures souterraines de

transport pour les rendre moins vulnérables, tout en permettant la mise en place de plans d'intervention mieux adaptés aux situations réelles (figure 4).

LES ENJEUX ACTUELS - PASSER D'UNE RECHERCHE EXPÉRIMENTALE FRAGMENTÉE EN EUROPE À LA COORDINATION EFFICACE DES OUTILS DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT

Aujourd'hui, l'INERIS, en collaboration avec ses partenaires européens VSH - TNO - STUVA et SP, participe à la mise en place d'une plate-forme européenne dédiée à la recherche expérimentale pour la sécurité et la sûreté des milieux souterrains. Ce projet, nommé L-surF pour Large-Scale Underground Research Facility (www.l-surf.org), est issu du constat suivant: la recherche en sécurité des milieux souterrains est de plus en plus basée sur des démarches de conception par objectif de performance, qui impliquent des innovations lors de la conception de ces ouvrages et généralement le besoin de démonstrations expérimentales à grande échelle des niveaux de performance atteints. Ceci est le cas de tous les nouveaux ouvrages qui ont été construits récemment ou sont en cours de construction. L'introduction des démarches par objectif de performance (appelée ISI pour le secteur de l'incendie), dans certaines réglementations, ne fait qu'amplifier ce besoin. On peut d'ailleurs noter que les directives européennes prévoient et permettent ces évolutions par l'introduction systématique d'un article précisant la prise en compte des « innovations techniques ». Ceci est le cas de la directive relative à la sécurité des tunnels routiers mais l'est également pour les autres secteurs industriels utilisant des ouvrages souterrains, comme, par exemple, les transports ferroviaires. La Commission européenne a donc confié au consortium L-surF la définition d'une plate-forme européenne d'essais

4



Mesure d'intensité de déstratification (à gauche) - Simulation de dispersion de fumées en milieux souterrains complexes (à droite).

qui permettra de répondre aux besoins de recherche et d'évolution technologique pour la sécurité et la sûreté des milieux souterrains. Outre les aspects de développement technologique, la recherche appliquée dans l'ensemble des domaines importants pour la sécurité et la sûreté des milieux souterrains sera un objectif de cette plate-forme. Ainsi, les chercheurs européens disposeront d'un outil leur permettant d'étudier à grande échelle la mise en scène

de situations réalistes d'accidents. Ceci viendra compléter le travail de développement sectoriel des systèmes de sécurité et participera à la sécurité des ouvrages souterrains par la possibilité de tester un système souterrain ou un nouveau concept dans son ensemble et de façon réaliste. Cette démarche s'accompagnera de la mise en place d'un organisme européen permettant également la mise en réseau des moyens expérimentaux déjà existants et des chercheurs européens.



SUMMARY EVOLUTIONS IN THE RISK MANAGEMENT OF UNDERGROUND INFRASTRUCTURES

In the 90's, INERIS very quickly came to the conclusion that a fragmented approach to risks using sub-systems was not sufficient to ensure a good level of preparedness of safety and security in underground infrastructures. Based on this consideration, INERIS has developed a full set of research topics that has led to a global risk management approach. In 1990, INERIS developed completely new software known as NewVendis® allowing a global and dynamic simulation of accident risks in underground infrastructures. As a result, since 2000 complete safety assessments of infrastructures have been possible, taking into account ventilation and propagation of smoke, vehicle movements and the behaviour of hazardous sources such as fire and toxic substances. These results have directly contributed to the French methodology for Specific Hazard Studies for road tunnels that was set up in 2001. These developments are also applicable in rail tunnels, metros, underground storage sites, etc. Since 1997, INERIS has completed its research by studying the human factors in underground safety. In particular, the behaviours of road and rail tunnel users, operators and emergency services were studied during the UPTUN project. This allowed INERIS to carry out a full systemic and global approach to risks considering a combination of technical, human and organisational factors. For example, it is now possible to assess the safety margin offered with emergency exits, taking into account important aspects of evacuation procedures and rescue plans. Research is now being carried out in specific fields of new hazards, such as terrorist acts, brought about by society changes. Nowadays, besides this research, INERIS is involved in the L-surF project that will result, in 2008, in the emergence of a new European organisation to increase the efficiency of the European Research Area in the field of underground safety and security. An important objective is the re-organisation of large-scale European experimental R&D programmes and facilities to support a performance-based approach to the risk management.

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] Brousse B., Voeltzel A., Le Botlan Y., Ruffin E. (2001). "Ventilation and fire tests in the Mont-Blanc Tunnel to better understand the catastrophic fire of March 24th 1999". International congress on Tunnel Fires. October 2001, Washington, USA.
- [4] Cwiklinski C., Marlair G., Ruffin E. & Lacroix D. (2002). "Upgrading fire scenarios for typical vehicles and their loads in the context of roads tunnels". International Symposium of Fire Safety, June 2002, Worcester, USA.
- [5] Waymel F., Fraser-Mitchell J., Ruffin E. (2006). "A new tunnel risk assessment procedure integrating smoke dispersion and evacuation models". 2nd international symposium on tunnel safety and security, 15-17 March 2006, Madrid, Spain.
- [6] Marlair G., Le Coze J.C. and Kim W.H. (2006). "The Daegu Metro Fire: a review of technical and organisational issues that led to a major disaster". 2nd international symposium on tunnel safety and security, 15-17 March 2006, Madrid, Spain.
- [7] Waymel F., Fournier L., Ruffin E. (2005). « Étude numérique de l'influence des véhicules sur la déstratification des fumées d'un incendie en tunnel ». Congrès AFTES, Les tunnels, clé d'une Europe durable, 10-12 octobre 2005, Chambéry, France.

SYSTÈMES INDUSTRIELS COMPLEXES

Modélisation des systèmes instrumentés de sécurité

Dominique Charpentier, Jean-Michel Dranguet

1



Centrale électrique de General Electric (Kemalpaspa, Turquie).

La qualification des fonctions de sécurité nécessite de modéliser les systèmes instrumentés de sécurité pour calculer les probabilités de défaillance dangereuse. L'INERIS mène des recherches sur cette thématique en partenariat avec des industriels et oriente ses travaux vers la fiabilité dynamique des systèmes.

L'étude des dangers d'une installation industrielle conduit à déterminer les fonctions importantes pour la sécurité et à déterminer le niveau de sécurité requis pour ces fonctions. Le Laboratoire d'évaluation des équipements électriques de l'INERIS s'assure ensuite que les solutions techniques retenues satisfont aux exigences requises. Ces fonctions sont de plus en plus fréquemment réalisées par des systèmes instrumentés de sécurité constitués de capteurs, d'unités logiques de traitement et d'actionneurs agissant sur l'installation. Ces systèmes ont beaucoup évolué au cours des deux dernières décennies, passant de technologies simples et robustes dont l'évaluation était aisée à des technologies plus performantes, paramétrables, assemblées en systèmes complexes tant par l'architecture que par les modes de fonctionnement.

MODÉLISER LES SYSTÈMES UTILISÉS DANS LES INSTALLATIONS À RISQUE

L'INERIS a engagé une recherche visant à modéliser les systèmes utilisés dans les installations à risque, en partenariat avec des industriels, concepteurs d'équipements avec Schneider Electric et concepteurs de centrales électriques avec General Electric. Ces recherches partenariales ont consisté à analyser le comportement et la fiabilité de boucles de sécurité en déterminant les différents états du système associé aux nombreux modes de fonctionnement ainsi qu'aux événements redoutés correspondants. Par exemple, il est nécessaire de déterminer les états amenant le système à un état sûr (l'arrêt pour certains systèmes, la continuité de service pour d'autres). Ces principes fondamentaux de la sûreté de fonctionnement ont été mis en œuvre pour déterminer les probabilités de défaillance dangereuse de ces systèmes en considérant les différents modes de fonctionnement.

Les problèmes relatifs à la nature des probabilités calculées et aux outils mathématiques associés ont été identifiés et des solutions ont été apportées pour les résoudre. Certains systèmes n'interviennent qu'en secours par rapport à d'autres dispositifs. Ils ne sont utilisés que sur sollicitation externe ou lors de tests périodiques. Le mode de fonctionnement est alors à faible sollicitation, contrairement au mode continu où la fonction de sécurité est toujours sollicitée. Un système est donc caractérisé par la probabilité de défaillance dangereuse pour une utilisation à la sollicitation et par la probabilité de défaillance dangereuse par unité de temps pour un fonctionnement continu.

Les outils mathématiques comme les arbres de défaillances, les blocs-diagrammes de fiabilité, adaptés à une analyse statique ou les graphes de « Markov » adaptés à une étude de fiabilité dynamique sont déterminants dans la modélisation et influencent considérablement le résultat.

DÉTERMINER LES LIMITES D'UTILISATION DE CES MÉTHODES

Contrairement à la pratique courante consistant à fournir un résultat en termes de probabilité sans spécifier les outils de modélisation et les hypothèses associées, l'INERIS poursuit des recherches afin de déterminer les limites d'utilisation de ces méthodes. Parmi les paramètres déterminants dans la qualité d'un résultat, il est nécessaire d'analyser la couverture des tests lors des inspections périodiques et la prise en compte de la réparabilité partielle de ces matériels.

Pour un système redondant, le tableau ci-dessous montre l'influence du taux de couverture des tests (DC), du temps de réparation (MTTR) et de la période entre tests (TI) sur le calcul des probabilités. Plus on parvient à détecter les défaillances dangereuses (DC élevé), plus il est important de tenir compte de l'aptitude à effectuer les réparations; la probabilité calculée de défaillance du système dépend ainsi de l'organisation industrielle (stockage, rapidité d'intervention...) et il est nécessaire de vérifier cette hypothèse avant de réaliser une évaluation probabiliste.

L'écart entre P1 et P2 s'explique par la nature des réparations qui ne suivent pas une distribution stochastique (ne se produisent pas au hasard dans le temps) car la réparation n'a lieu qu'après test périodique et identification de la défaillance du système. Dans ce cas, une analyse par graphe de « Markov » n'est valable qu'à condition d'éviter les confusions entre le temps de réparation et le temps entre les tests périodiques.

LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES COMPLEXES

Les travaux de recherche de l'INERIS s'orientent donc vers la modélisation de systèmes complexes afin de prendre en compte les facteurs d'influence des modes de fonctionnement, du type de maintenance, dans le but de déterminer les limites d'utilisation des outils de la sûreté de fonctionnement et de retenir les méthodes les mieux adaptées. Ces travaux sont valorisés sur des applications industrielles dans le cadre de recherches partenariales.

Ainsi, l'INERIS a étudié les systèmes instrumentés de la centrale électrique de General Electric à Kemalpaspa, en Turquie. La conformité à la norme CEI/EN 61511, qui spécifie les exigences techniques de conception, de construction et de validation du niveau de sécurité de ces systèmes instrumentés, a été évaluée. Les exigences de ce référentiel portent principalement sur la gestion de la sécurité fonctionnelle au travers des deux thèmes suivants :

- le cycle de vie de sécurité, de la conception jusqu'à la fin de vie de l'installation;
- l'évaluation qualitative et quantitative d'un système en déterminant les probabilités de défaillance dangereuse lors d'un dysfonctionnement.

MODÉLISATION D'UN SYSTÈME REDONDANT EN 1002

DC	MTTR (h)	Ti (h)	P1*	P2*	P1/P2
0,6	8	8760	1,2 e ⁻⁵	1,2 e ⁻⁵	0,995
0,8	8	8760	3,1 e ⁻⁶	3,1 e ⁻⁶	0,986
0,95	8	8760	1,9 e ⁻⁷	2,1 e ⁻⁷	0,935
0,99	8	8760	7,7 e⁻⁹	1,1 e⁻⁸	0,73

* P1 probabilité de défaillance dangereuse sans tenir compte des réparations du système

* P2 probabilité de défaillance dangereuse en tenant compte des réparations du système

SUMMARY

MODELLING OF SAFETY INSTRUMENTED SYSTEMS

Safety Instrumented Systems (SIS) have to be assessed in order to determine the probability of dangerous failure. These SIS are important safety devices in high-risk level process industries and need to be highly reliable.

Preventive maintenance and periodic tests are tools for maintaining such SIS at a low probability of failure.

The assessment of SIS incorporates modelling and calculation. The research identifies modelling topics and the limits of the mathematical methods used. We have analysed the influence of test coverage and repair capability to calculate the probability of dangerous failure.

We have shown that models based on Markov graphs can only be used if confusion is avoided between the repair time and the interval between periodic tests. We have also demonstrated that the reliability and safety of a redundant system constituted of two detectors, two programmable logic controllers (PLC) and two actuators depend on the desynchronisation of periodic tests for each channel. The optimisation of safety levels is a function of the interval between tests and the desynchronisation between periodic tests.

INERIS carries out research in partnership with industry (manufacturers and users) and develops assessment of dynamic reliability. The aim is to define methods for analysing complex systems composed of sensor networks, communication field bus and PLC.

De l'humain dans le bayésien Régis Farret

Le programme de recherche DIRIS, mené en collaboration avec EDF R&D (Département Maîtrise des Risques Industriels), a pour objectif principal de permettre une analyse de risques dite « transverse » d'un système industriel en incluant son environnement humain et organisationnel, en plus des facteurs techniques, via un « réseau bayésien ». Également appelés « diagrammes d'influence », les réseaux bayésiens sont des outils très intéressants à exploiter dans le cadre de l'analyse des risques, car ils peuvent représenter les relations de dépendance entre différents éléments ainsi que les probabilités associées, le tout *via* un support graphique. Ils permettent donc d'élargir la notion d'arbre des défaillances et d'estimer la probabilité d'occurrence de différents scénarios d'accident tout en intégrant la complexité de l'ensemble du système industriel. Cette complexité se caractérise par de nombreuses interactions entre les éléments du système et par une dynamique propre, soit l'aspect évolutif et adaptatif de l'organisation [5-7]. Le réseau bayésien permet, par exemple, de traiter plus rigoureusement des causes liées et incontournables dans l'analyse des systèmes organisationnels. Plus largement, l'objet de notre programme de recherche est d'intégrer des facteurs humains et organisationnels, telles la gestion du REX (retour d'expérience), les stratégies de maintenance, la gestion des procédures. Nous avons prédéfini un cadre général, ou schéma conceptuel, structuré en trois niveaux principaux. Une grande souplesse à l'intérieur de ces niveaux est affirmée, et la construction du modèle est basée sur l'environnement réel du système à risque – approche cas par cas (figure 1).

Le niveau 1 est focalisé sur les éléments techniques, il s'agit d'un premier réseau bayésien élaboré comme un diagramme en « nœud papillon » et représentant les scénarios accidentels : ce mode de représentation, centré sur un ERC (Événement Redouté Central), est construit selon les règles précisées par le projet européen ARAMIS [1], à partir d'une analyse de risques classique (de type APR ou HAZOP). À partir de l'approche développée par Paté-Cornell [9] et en cohérence avec les approches existant au sein d'EDF comme de l'INERIS [2, 10], nous avons complété par deux niveaux d'influences supplémentaires : - au niveau 2, les décisions et actions individuelles : l'humain peut ici être considéré comme initiateur d'un événement indésirable (exemple : erreur humaine), comme acteur direct ou indirect sur le bon fonctionnement d'une barrière (exemple : application d'une procédure d'urgence, ou encore action de maintenance) ; - au niveau 3, les facteurs managériaux et organisationnels : ceux-ci traitent des processus relatifs à l'organisation, aux moyens qu'elle met en place ou aux contraintes qu'elle génère (exemple : formation, pression de production).

TRAVAIL SPÉCIFIQUE SUR LES INCERTITUDES

Nous avons réalisé un important travail de typologie des incertitudes car l'objectif est d'intégrer l'incertitude sur les données recueillies. Nous inspirant notamment des travaux de Rowe [11], nous distinguons *in fine* les incertitudes dites de modélisation, qui ont trait à l'interaction entre l'homme d'étude et son système, et les incertitudes dites de quantification, regroupant les étapes qui constituent une estimation ou un calcul, et plus généralement

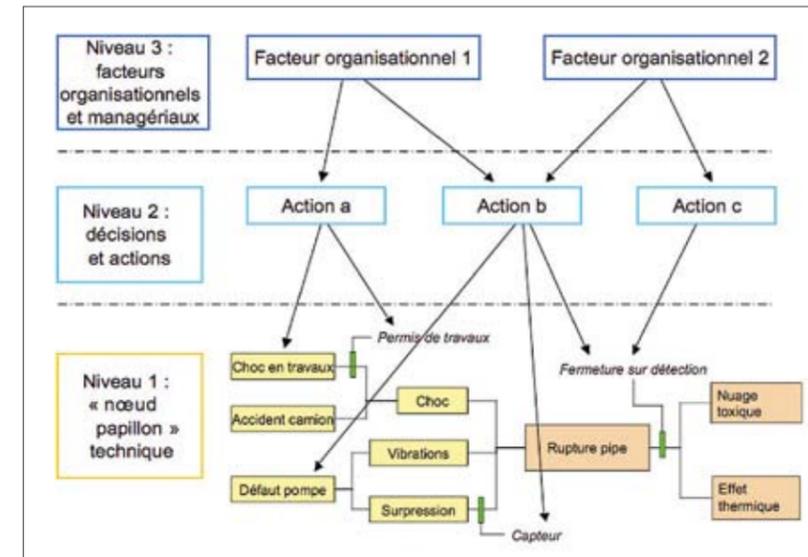


Schéma conceptuel en trois niveaux – source [3]

1

SUMMARY

HUMAN FACTORS IN BAYESIAN TOOLS

Risk analysis of industrial systems has to include not only technical but also human and organisational factors. EDF (Electricité de France) and INERIS are presently developing a tool for "transverse" risk analysis that considers these three dimensions. We have chosen a Bayesian network as the basic tool for this development. A conceptual framework is proposed, based on the System-Action-Management principles developed by Paté-Cornell and Murphy. Consisting of three layers, it includes the technical level through a "bow-tie" developed within the European ARAMIS project, human interventions – considered as major contributions to safety barriers – and organisational factors, which are studied at a global level. Simultaneously, a classification of the main sources of uncertainty is suggested, which is adapted to our approach. Specific recommendations are made, related to the global modelling approach of the industrial system and to the practical use of Bayesian networks. The final goal is to assess safety barriers in their environment, by providing probabilistic estimations that are able to help decision makers. We aim to apply this approach to a concrete industrial problematic, including interviews with key players in the plant in question.

une mise en relation de données : la probabilité, et en particulier le réseau bayésien, est un moyen privilégié pour représenter et propager les incertitudes de quantification [4]. Il faut noter que, par ailleurs, la plupart des experts s'accordent à distinguer l'incertitude dite aléatoire, due à la variabilité naturelle du système, et l'incertitude dite épistémologique, due à notre manque de connaissance du système. En couplant la réflexion sur les réseaux bayésiens avec celle sur les analyses organisationnelles, des recommandations spécifiques pour la suite du programme ont été émises. Tout d'abord, rappelons qu'une analyse de risques est, en fait, un cas particulier de démarche de modélisation d'un système. Le modèle construit est une représentation simplifiée de la réalité et il constitue un support d'aide à la décision.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

La modélisation par réseaux bayésiens nécessite de limiter le nombre de relations d'influences entre les variables du système (en termes techniques, il faut limiter le nombre de « parents » pour un « nœud » donné), faute de quoi les données de probabilités qui régissent ces relations d'influence seraient trop

compliquées à renseigner. D'où l'importance de structurer au préalable le modèle de risque et donc d'affiner le schéma conceptuel. Nous veillerons à la « légitimation » de la démarche, et pour cela inclurons une étape d'approbation du modèle de risque, par les acteurs et parties prenantes de l'analyse. Cette étape d'approbation est indispensable pour s'assurer de la bonne compréhension du système et de l'adéquation du modèle réalisé avec les objectifs recherchés : identifier les évolutions du système afin de comparer des options et d'aider à la décision. Les travaux restant à réaliser sont, d'une part, de définir des modalités pratiques pour estimer le niveau de confiance d'une barrière de type humain ou organisationnel (ce niveau de confiance reflète la probabilité pour qu'une barrière assure correctement sa fonction) et, d'autre part, d'appliquer cette démarche sur un cas concret industriel : nous mettons au point un protocole de recueil des données de terrain, incluant des entretiens avec les acteurs du site industriel, qui seront réalisés par binômes regroupant un expert en sciences organisationnelles et un expert en analyse des risques techniques. Ensuite viendront les étapes de construction du modèle, sa légitimation, et son utilisation aux fins de quantification probabiliste.

RÉFÉRENCES

- [1] ARAMIS 2004. User Guide, ARAMIS Project. Fifth Framework Program of the European Community, Energy, Environment and Sustainable Development. Document disponible sur le site : <http://aramis.jrc.it>
- [2] Dien Y., Llory M. & Montmayeul R. (2004). "Organisational accidents investigation methodology and lessons learned". *Journal of Hazardous Materials*, 111(1-3): pp. 147-153.
- [3] Farret R., Le Coze J.-C., Merad M., Léger A., Duval C. (2006). "Epistemological perspective of the modelling process of an industrial system integrating technical and organisational dimensions". Abstracts book of the 15th annual conference SRA-Europe, 11-13 September 2006, Slovenia, p. 22.
- [4] Katz D. & Kahn R.L. (1978). "The social psychology of organizations". 2nd Edition, John Wiley & Sons.
- [5] Kervern G.Y., Rubise P. « L'archipel du danger », *Economica*, 1991.
- [6] Le Coze J.C. (2005). "Are organisations too complex to be integrated in technical risk assessment and current safety auditing?". *Safety Science*, 43: pp. 613-638, Elsevier Science.
- [7] Le Moigne J.-L. (1990). « La modélisation des systèmes complexes ». Dunod éditions.
- [8] Léger A., Duval C., Weber P., Levrat E. & Farret R. (2006). "Risk analysis of complex socio technical systems by using Bayesian network modelling". Fourth workshop on Advanced Control and Diagnosis, 16-17 November 2006, Nancy, France.
- [9] Paté-Cornell M.E. & Murphy D.M. (1996). "Human and management factors in probabilistic risk analysis: the SAM approach and observations from recent applications". *Reliability Engineering & System Safety*, 53(2): pp. 115-126.
- [10] Plot E. (2004). « Intégration de l'influence du collectif de travail et des organisations dans l'évaluation des risques ». Rapport final Projet BCRD – protocole ATHOS, INERIS.
- [11] Rowe W. D. (1994). "Understanding uncertainty". *Risk Analysis*, vol. 14, n° 5, pp. 743-750.

Analyse stochastique de l'enchaînement catastrophique conduisant des fragments issus d'un accident industriel à impacter et à perforer des installations voisines

Frédéric Mercier



Élément de chaudière propulsé par effet fusée.

1

CONTEXTE

La problématique des impacts de fragments issus d'une explosion accidentelle s'inscrit dans le prolongement des recherches entreprises par l'INERIS dans le domaine des effets dominos. Elle fait l'objet du programme IMFRA qui intègre une importante collaboration avec NEXTER, le Centre National des Risques Industriels (CNRI), et le Laboratoire de Mécanique (LaM) de l'Université de Marne-la-Vallée [1].

Les projectiles mis en jeu lors d'accidents industriels peuvent être très divers, tant en termes de dimensions que de nature. À titre d'exemple, une enceinte métallique peut éclater et projeter des fragments dans son environnement. Si elle abrite un gaz liquéfié ou de l'eau surchauffée, le projectile peut également subir un effet fusée, c'est-à-dire être propulsé au cours de son vol par le changement de phase du fluide (figure 1). Le projectile peut aussi être constitué d'éléments de structures bâtementaires (briques, moellons, fermes...) mis en mouvement par une explosion interne. La gamme des vitesses à l'impact peut aller de quelques mètres par seconde jusqu'à plus de 100 mètres par seconde dans les cas extrêmes (effet fusée).

Les conséquences de ces projections sur une structure, un réacteur par exemple sont relativement méconnues. Or, dans le cadre de la prévision des suraccidents et de leurs effets potentiels sur l'environnement, il peut être crucial de

connaître les probabilités associées à la transformation d'un simple accident initiateur en une succession catastrophique de cycles conduisant *in fine* à un accident majeur. À titre d'exemple, un événement accidentel initiateur dans un parc d'enceintes sous pression va conduire à la projection d'éléments dans son environnement (figure 2). Certaines des enceintes voisines vont être endommagées et, parmi elles, quelques-unes vont conduire à un nouveau cycle accidentel. Le présent article vise à exposer l'enchaînement probabiliste conduisant un accident initiateur à endommager une cible métallique. Ce type d'approche a été initiée dans le domaine du risque industriel par Hauptmanns [4, 5] et Gubinelli et al. [3]

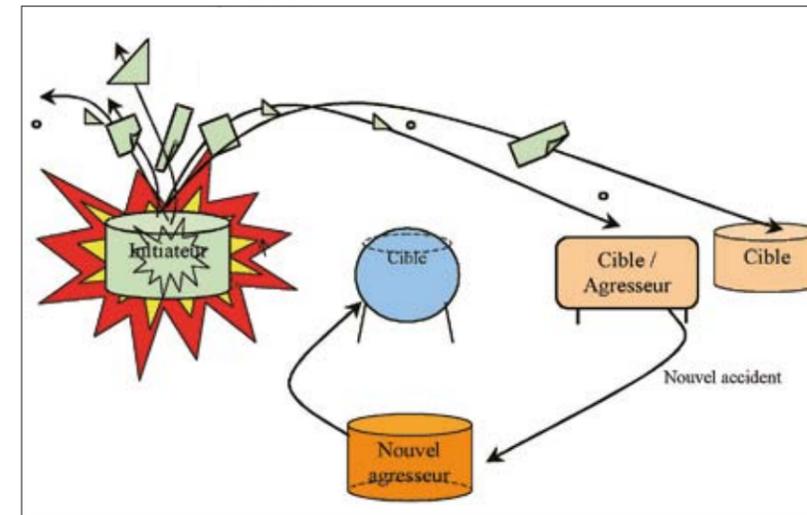
MODÉLISATION MÉCANO-PROBABILISTE DE L'IMPACT DE PROJECTILES SUR DES INSTALLATIONS VOISINES

La probabilité de ruine d'une cible P_i par l'impact d'un agresseur peut s'écrire comme :

$$P_i = P(E \leq 0) = \int_{E=0}^{\infty} f_e(e) de = \iint_{R-S=0} f_r(r) f_s(s) dr ds$$

Avec :

- R : la résistance aléatoire (dont les variables sont r) ;
- S : la demande mécanique aléatoire (dont les variables sont s) ;
- E : fonction d'état limite ($E < 0$ définit le domaine de ruine ; $E = 0$ est la surface



Enchaînement catastrophique donnant lieu à un suraccident.

2

Projectiles
Variables aléatoires :
• vitesse
• masse
• forme
• direction

d'état limite ; $E > 0$ définit le domaine de sécurité).

- $f_r(\cdot)$ et $f_s(\cdot)$ sont des fonctions de densité de probabilité.

En pratique, le risque de suraccident peut être représenté comme une suite de cycles pouvant être traduite sous la forme d'un produit de probabilités comme :

$$P_{\text{cycle}} = P_{\text{gen}} \cdot P_{\text{imp}} \cdot P_{\text{rup}} \cdot P_{\text{propa}}$$

Expression dans laquelle :

- P_{gen} est la probabilité de génération de projectiles lors de l'accident initiateur.

Dans ce qui suit, la génération de projectiles est considérée comme certaine ($P_{\text{gen}} = 1$).

- P_{imp} est la probabilité d'impact d'une cible par un projectile. Comme cela va être montré plus loin, la probabilité d'impact dépend des variables aléatoires qui gouvernent le vol du projectile.

- P_{rup} est la probabilité de rupture de la cible lors de l'impact. Celle-ci nécessite de modéliser l'interaction mécanique entre la cible et le projectile lors du choc.

- P_{propa} est la probabilité de propagation du cycle. Cette dernière probabilité dépend de divers facteurs, et notamment du cycle de vie de la cible : à titre d'exemple, la perforation d'un réservoir vide ne conduira pas à un suraccident, tandis que, à l'inverse, celle d'un réservoir plein d'un gaz liquéfié peut conduire à un BLEVE. Cette probabilité ne sera pas discutée ici.

PROBABILITÉ D'IMPACT

Caractéristiques du projectile

La probabilité d'impact dépend tout d'abord du nombre de projectiles et de leurs caractéristiques. Le retour d'expérience permet de disposer des lois de répartition associées à la forme et à la masse des projectiles. Ainsi, pour des réservoirs cylindriques, Baum [1, 2] a montré l'existence de plusieurs modes de rupture possibles en fonction de l'initiation de la fissure et de sa propagation. Le nombre de projectiles associés va être directement fonction du mode de rupture. Sur la base d'une analyse d'accidents [6], il est possible de postuler une loi exponentielle discrète pour le nombre de projectiles.

La forme du projectile dépend en grande partie du type de rupture et de la propagation des fissures sur un réservoir. Pour des réservoirs cylindriques, les principaux types de projectiles sont des fonds de réservoir, éventuellement solidaires de tout ou partie de la virole (fonds oblongs de réservoir) et des parties de virole aplaties (plaques).

La masse du projectile dépend de sa forme et de sa densité. Dans le cas d'un réservoir cylindrique, l'initiation de la fissure se fait soit à la soudure circonférentielle, soit au milieu de la virole. Cela permet de postuler, en première approche, que la longueur (pour le fond oblong) et la dimension (pour la plaque) suivent une loi uniforme. Une fois la forme, la taille et le matériau constitutif connus, la masse du projectile peut être déterminée.

Caractéristiques du vol

La probabilité d'impact dépend également des angles horizontaux et verticaux de départ du projectile ainsi que de la vitesse initiale.

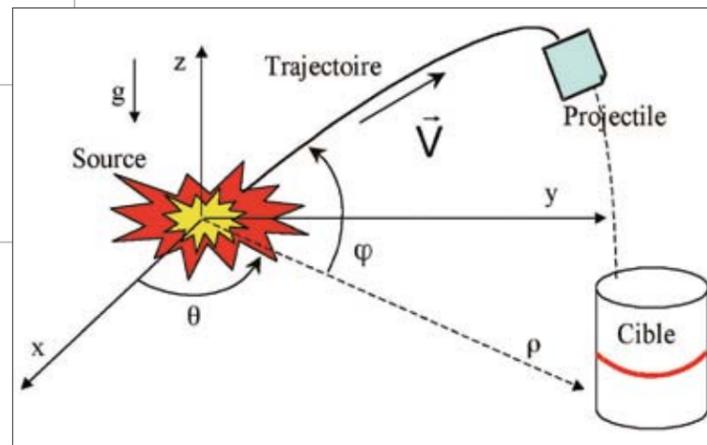
Pour un réservoir cylindrique, aucune information n'existe sur l'angle vertical. La fissure pouvant commencer n'importe où sur la virole, l'angle vertical de départ φ (voir figure 3) peut donc être n'importe quel angle vertical de -90° à 90° avec la même probabilité. L'angle vertical de départ peut donc être représenté par une distribution uniforme de -90° à 90° .

L'angle horizontal (direction de vol) de départ θ résulte fortement de la nature du réservoir. Pour les réservoirs cylindriques, une analyse statistique réalisée par Holden [6] sur 17 BLEVE montre qu'environ 60% des fragments sont projetés dans un secteur angulaire de 60° autour de l'axe du réservoir, et le restant ($\approx 40\%$) est plutôt projeté de manière perpendiculaire.

Holden a également proposé une approximation de la distribution des projectiles envoyés par rapport à l'axe principal du réservoir : 20% des fragments dans l'intervalle $[30^\circ-150^\circ]$; 30% des fragments dans l'intervalle $[150^\circ-210^\circ]$; 20% des fragments dans l'intervalle $[210^\circ-330^\circ]$; et 30% des fragments dans l'intervalle $[330^\circ-30^\circ]$.

La vitesse initiale se détermine de façon classique à l'aide de l'énergie cinétique du projectile. Mais cette énergie cinétique représente une fraction de l'énergie totale disponible au moment de l'accident.

3



Caractéristiques du vol.

Dans le travail présenté, une distribution log-normale pour la vitesse de départ est postulée sur la base des résultats des essais de Baum [1,2]. Le vol est ensuite décrit au moyen des équations classiques appliquées sur le centre de masse du projectile [11] :

$$\begin{cases} -k_D \cdot \cos \alpha - (-1)^n \cdot k_L \cdot \sin \alpha \left(x^2 + y^2 + z^2 \right) - \frac{x}{\sin(\theta)} = 0 \\ -k_D \cdot \cos \alpha - (-1)^n \cdot k_L \cdot \sin \alpha \left(x^2 + y^2 + z^2 \right) - \frac{y}{\cos(\theta)} = 0 \\ -(-1)^n \cdot k_D \cdot \sin \alpha + k_L \cdot \cos \alpha \left(x^2 + y^2 + z^2 \right) - z - g = 0 \end{cases}$$

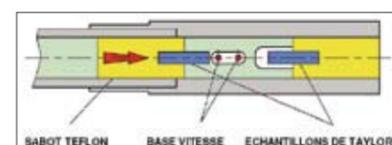
- avec n=1 pour la partie ascendante de la trajectoire et n=2 pour sa partie descendante ;

$$\begin{cases} k_D = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot C_D \cdot A_D \\ k_L = \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \cdot C_L \cdot A_L \end{cases}$$

Dans la présente étude présentée, la rotation du projectile n'est pas prise en compte.

Impact

L'impact du projectile et de la cible est analysé sous la forme de l'intersection de deux ellipsoïdes. L'algorithme employé fait appel à des conditions algébriques dans un espace euclidien en trois dimensions [12].



4

Essai de Taylor symétrique (NEXTER).

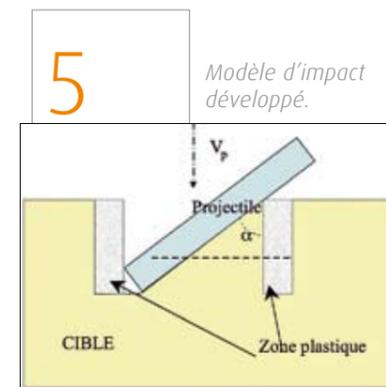
INTERACTION PROJECTILE/CIBLE

L'interaction projectile/cible peut avoir des conséquences diverses suivant la vitesse mise en jeu, le rapport des tailles entre le fragment et son objectif, la nature des matériaux qui les constituent. Les modèles d'impact proposés dans la littérature sont difficilement adaptables aux risques industriels. Le plus souvent issus du domaine militaire, les gammes de vitesse sont beaucoup plus élevées que celles rencontrées lors d'un accident industriel. Par ailleurs, les projectiles employés lors des expérimentations sont souvent des ogives, dont la forme peut être assez éloignée de celle des fragments. Les matériaux mis en jeu sont également très différents de ceux habituellement étudiés dans ces modèles. De ce fait, les modèles existants considèrent souvent des chocs durs, parfois des chocs mous, mais de façon rarement représentative d'un accident industriel.

Dans le cadre de cette recherche, des essais mécaniques sont réalisés par NEXTER en vue d'affiner les modèles existants. Il s'agit de :

- caractériser le comportement dynamique des matériaux : essais de Taylor symétriques sur les métaux industriels retenus, essais de compression quasi statique sur le béton ;
 - qualifier la pénétration de projectiles de tailles diverses à des vitesses dans des cibles d'épaisseur variables : projectiles métalliques divers sur des cibles métalliques de nature et d'épaisseur représentatives d'une enceinte sous pression, projectile métallique de diamètre important sur une cible en béton armé représentative d'une salle de contrôle.
- Dans l'étude présentée, l'endommagement de la cible par le projectile est analysé en termes de pénétration du projectile dans la cible. Des modèles simplifiés ont été spécialement développés par le LaM (figure 5) sur la base d'une analyse de publications d'essais d'impact de cibles par des projectiles métalliques divers, balayant un large domaine d'angles et de vitesses de pénétration.

5



Dans le modèle présenté en figure 5, l'énergie cinétique est supposée être dissipée au travers de la zone plastique qui se forme dans le cratère [7].

EXEMPLE D'APPLICATION

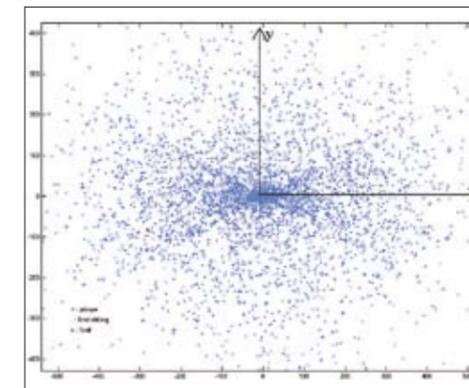
Des simulations numériques ont été réalisées en considérant un réservoir cylindrique A et un réservoir sphérique B, distants de 28 m, ayant des volumes respectifs de 200 m³ et de 1 600 m³. Le réservoir A est à l'origine de l'accident. Les projectiles produits sont expédiés dans une zone circulaire de diamètre approximatif d'un kilomètre, avec une répartition plus importante suivant un secteur angulaire de ±30° autour du grand axe \vec{x} du cylindre (figure 6). [8, 10]

L'impact potentiel des projectiles en fonction de leur distance au réservoir accidenté peut alors être présenté sous la forme de leur énergie et probabilité moyennes (figure 7). La probabilité pour qu'un des projectiles impacte le réservoir B est de Pimp = 0,068 %.

PERSPECTIVES

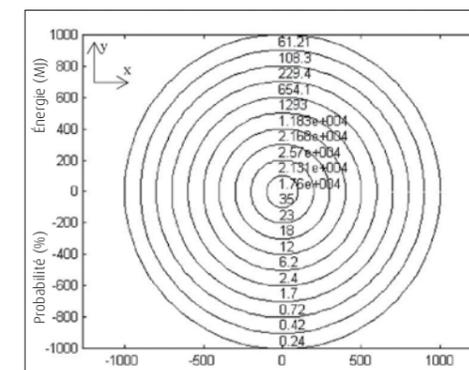
- L'étude va être poursuivie en portant l'effort sur plusieurs axes :
- le développement de lois de probabilité, à partir du retour d'expérience, permettant de disposer du nombre et des caractéristiques de projectiles issus de plusieurs types d'agresseurs (réservoirs, réacteurs, etc.) ;
 - la prise en compte de la rotation du projectile au cours de son vol ;
 - le développement d'autres modèles d'endommagement de cibles par des projectiles de matériaux divers ;
 - l'étude de l'effet d'impacts multiples sur une cible ;
 - une prise en compte du cycle de vie de la cible.

6



Distribution des projectiles.

7



Énergie et probabilité moyennes des projectiles autour du réservoir accidenté.

SUMMARY

STOCHASTIC ANALYSIS OF THE CATASTROPHIC CYCLING THAT DRIVES FRAGMENTS RESULTING FROM A PRIMARY INDUSTRIAL ACCIDENT TO IMPACT AND PIERCE NEIGHBOURING FACILITIES

Explosions and accidents in industrial plants may generate a series of projectiles that can impact other facilities and storage tanks in their neighbourhood. The impacted targets may be seriously damaged, thereby giving rise to new explosions, as is the case for tanks with products under high pressure for instance. These successive explosions are known as a domino effect. The present paper deals with a form of industrial risks analysis within a probabilistic framework. This analysis requires various steps:

- Probabilistic modelling of the source term (industrial threat such as projectiles, metallic rods, etc.).
 - Probabilistic modelling of the flight of the fragments and their intersection with the target.
 - Mechanical behaviour of the impacted target.
- Pressure vessels have been considered in this study as originators and as targets for simulating the phenomenon. On the basis of a literature review, probabilistic laws have been developed on:*
- The number of fragments.
 - The shape of fragments.
 - Their departure angles and velocities.

A flying fragment model is then implemented with these parameters. An algebraic algorithm is applied to determine whether the fragment and the target intersect. If this condition is fulfilled, a mechanical model of the impact is employed to evaluate the effect of the fragment on the target.

The results obtained prove that the impact probability of generated fragments on the facilities is not negligible.

Aspects fondamentaux de la propagation de flamme dans les mélanges air-poussière

Christophe Proust

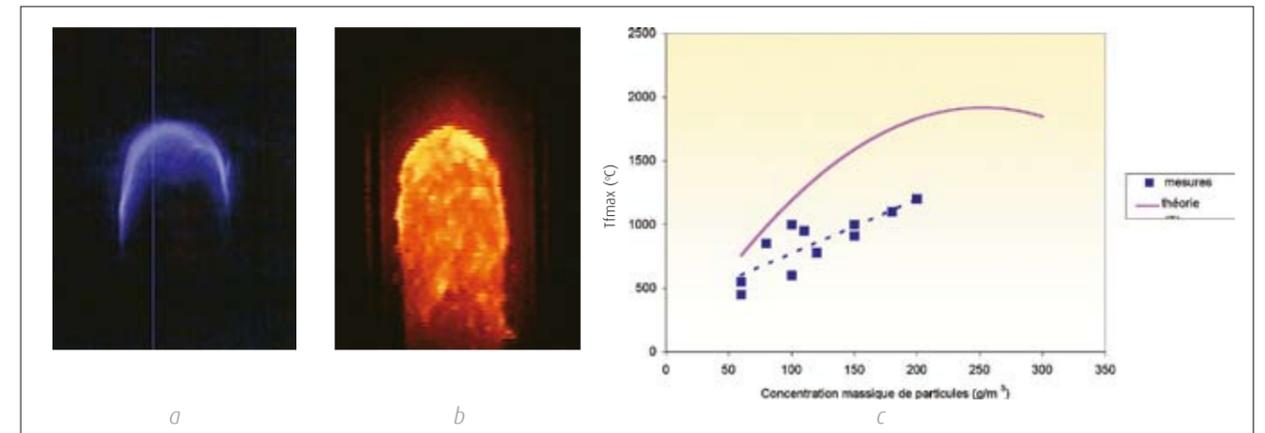
CONTEXTE

L'histoire de l'industrialisation est ponctuée de nombreuses explosions de poussières accidentelles dont la fréquence et la sévérité se sont accrues en proportion du développement de l'industrie manufacturière [9]. Tout d'abord restreint au seul secteur minier, ce type d'accident s'est « propagé » à tous les secteurs de l'industrie : aujourd'hui, on admet assez facilement qu'il se produit une explosion de poussières par jour dans chaque pays industrialisé. Certaines explosions de poussières ont marqué les mémoires comme celle, dévastatrice, de l'installation de stockage céréalier de Blaye en 1997 [7]. Il est probable que l'ampleur des dégâts de ce type d'accident, associée à une plus forte demande sociale de sécurité, ait favorisé l'émergence d'une ingénierie de la sécurité dans laquelle la lutte contre l'explosion de poussières apparaît en bonne place.

Les effets d'une explosion (éclatement, projection de débris, émission d'une onde de pression aérienne...) sont la conséquence de la propagation d'une flamme autonome dans un nuage explosif qui transforme sur son passage des réactifs froids en produits de combustion chauds. L'expansion volumique associée est responsable de l'augmentation de pression. On parle d'explosion de poussières lorsque le mélange réactif est une suspension de particules combustibles dans l'air. En matière de sécurité, la compréhension de la manière dont la flamme se propage est une question centrale [9].

DES CONCEPTS À EXAMINER

La plupart des concepts théoriques ont été obtenus pour des mélanges gazeux réactifs à partir de l'intuition de Mallard et le Châtelier [6] qui ont décrit la flamme comme une interface qui chauffe jusqu'à l'inflammation les réactifs par conduction thermique qui brûlent de telle manière que le taux de production de chaleur soit en équilibre avec le taux de transfert vers les réactifs. Non seulement ce type d'approche a permis de démontrer le caractère intrinsèque de la propagation d'une flamme dans un mélange non perturbé (flamme « laminaire ») mais il a mis en évidence que l'essentiel de la phénoménologie des flammes pouvait y être rattaché [2, 19]. Comparativement, la progression des connaissances relatives à la propagation des flammes de poussières est beaucoup plus récente [9] avec pour conséquence que nous n'en comprenons encore que quelques aspects. Il faut dire que l'expérimentation et la modélisation sont fortement compliquées par le caractère multiphasique des milieux considérés [5, 9]. En particulier, la question de la manière dont les particules brûlent reste ouverte [8, 11, 13, 14] : se transforment-elles en gaz avant la combustion ou la combustion se produit-elle à la surface des particules ? Le second point concerne le régime d'échange de chaleur entre les produits de combustion et les réactifs : on peut *a priori* admettre que la présence de petites particules solides dans les produits de combustion pourrait faire intervenir le rayonnement comme promoteur de la propagation. Dans cette situation, des régimes de propagation tout à fait inédits sont possibles conduisant, par exemple, à de brutales accélérations de la flamme. [1, 3, 4]



Les fronts de flammes non turbulentes dans un tube vertical de 10 cm de diamètre se propageant dans un prémélange air-méthane (a) et dans une suspension de particules d'amidon et d'air se ressemblent (b) – Un large écart entre la température théorique de flamme et les mesures est systématiquement observé (c).

1

QUELQUES AVANCÉES SIGNIFICATIVES

Les résultats d'une étude expérimentale et théorique s'étalant sur presque deux décennies [8, 11, 13, 14, 18] suggèrent que les particules susceptibles de se gazéifier à basse température (moins de 1 000 °C par exemple) conduisent à un régime de propagation de flamme laminaire semblable à celui des flammes de mélanges gazeux (figures 1a et 1b). Il existe cependant des différences significatives comme, par exemple, une combustion quasi systématiquement incomplète (figure 1b). Il semblerait que la grande majorité des poussières industrielles se trouve dans cette catégorie. Pour ces situations, il a également été montré que l'on peut, au moins en première approximation, utiliser la théorie des flammes de gaz y compris pour représenter les interactions avec l'environnement (dont la turbulence). Toutefois, quelques observations, pour l'heure incomplètes, suggèrent fortement que, pour d'autres poussières (celles qui se vaporisent à haute température comme la poudre d'aluminium, par exemple avec des résidus de combustion solides), le rayonnement thermique pourrait intervenir de façon déterminante dans le processus de propagation si bien que le régime de propagation de la flamme pourrait être différent.

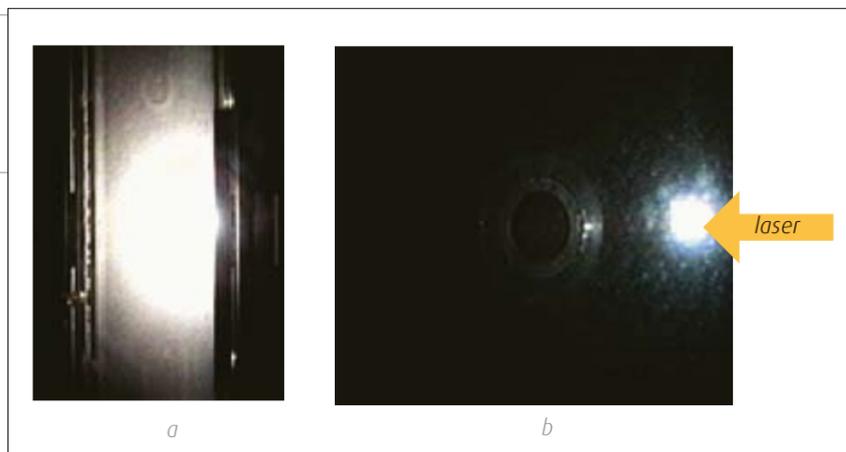
Un exemple de propagation dans un nuage de particules d'aluminium et d'air amorcé à l'intérieur d'un tube vertical est présenté sur la figure 2a. On observe une flamme d'une luminosité extrême, tellement importante qu'il est difficile de distinguer précisément une zone de combustion même en utilisant des techniques de traitement d'image. L'instrumentation de ces flammes est encore difficile (températures très élevées, courts-circuits) mais les estimations théoriques montrent [13] que le flux de chaleur transmis par rayonnement serait dix fois plus grand que dans les flammes de poussières d'amidon (5 MW/m² dans le proche infrarouge). Nous avons simulé l'effet d'un tel flux sur un nuage de particules d'aluminium au moyen d'un faisceau laser infrarouge de 60 W et nous avons constaté (figure 2b) que le faisceau est capable de mettre à feu directement les particules et d'induire la combustion du nuage ce qui signifie que le rayonnement thermique pourrait être un mécanisme d'échange thermique important à travers le front de flamme. D'autres indices vont également dans ce sens, avec un comportement anormal de la flamme comme prévu par Cassel, comme, par exemple, une brutale accélération dès que la courbure du front diminue (c'est plutôt le contraire pour une flamme « traditionnelle »).

RÉFÉRENCES

- [1] Blouquin R. (1996). « Contribution à l'étude théorique des interactions entre combustion et rayonnement », thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, France.
- [2] Borghi R., Destriau M. (1998). « Combustion and flame-chemical and physical principles », Edition TECHNIP.
- [3] Cassel H.M., Das Gupta A.K., Guruswamy S. (1937). « Factors affecting flame propagation through dust clouds », 3rd Symp. (int) on Combustion, pp. 185-189.
- [4] Cassel H.M., Liebman I., Mock W.K. (1956). « Radiative transfer in dust flames », 6th Symp. (int) on Combustion, pp. 602-605.
- [5] Eckhoff R.K. (1991). « Dust explosions in the process industries », Butterworth-Heinemann, Oxford.
- [6] Mallard E., Le Châtelier H. (1883). « Recherches expérimentales et théoriques sur la combustion des mélanges gazeux explosifs », *Ann. Mines*, vol. 8, p. 274.
- [7] Masson F. (1998). « Explosion d'un silo de céréales », Rapport de synthèse, INERIS EMA-FMS-98-21FP30-07/07/98.
- [8] Proust Ch. (1988). « Contribution à l'étude des mécanismes de propagation des flammes dans les mélanges hétérogènes gaz-particules solides », Thèse de doctorat n° 129, Université de Poitiers, France.
- [9] Proust Ch. (1999). « Explosions de poussières : études expérimentales des phénomènes et modélisation », Séminaire européen sur « Les explosions de poussières », Metz, Palais des Congrès, avril 1999.

2

Développement d'une flamme dans un mélange pauvre de particules d'aluminium et d'air (figure a : 100 g/m³; 20 ms entre images diamètre du tube = 10 cm)
- amorçage direct de la réaction par un flux lumineux d'intensité comparable à celle émise par les produits de combustion (figure b).



RÉFÉRENCES

- [10] Proust Ch. (2000). « Prévoir les effets des explosions de poussières sur l'environnement : EFFEX un outil de simulation », www.ineris.fr.
- [11] Proust Ch. (2004). « Formation, inflammation, combustion des atmosphères explosives (ATEX) et effets associés », mémoire d'HdR présenté à l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 12 février 2004.
- [12] Proust Ch. (2005). "The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions: the experience of EFFEX", International ESGM Symposium on Process Safety and Industrial Explosion Protection, Nürnberg, Germany, 2005.
- [13] Proust Ch. (2006a). "Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19.
- [14] Proust Ch. (2006b). "A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds", *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19.
- [15] Proust Ch. (2006c). « Nanodust explosions. », ENERO Scientific workshop « Nanomaterials and nanoparticules. Risk management », 11 mai 2006, Bruxelles.
- [16] Proust C., Leprette E., Daubech J., Sochet I. (2007). "The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions.", Proceedings of the 2007 AICHE spring national meeting, 3rd Global congress on process safety, 41st Loss prevention symposium, 22-27 April 2007, Houston, USA.
- [17] Roux P., Proust Ch. (2003). « Méthode de protection contre les explosions : événements - explosions de poussières », Rapport final établi pour le compte du ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables.
- [18] Schneider H., Proust Ch. (2005). "Laminar and Turbulent Burning Velocities of Dust Clouds", International ESGM Symposium on Process Safety and Industrial Explosion Protection, Nürnberg, Germany, 2005.
- [19] Williams F.A. (1985), "Combustion theory: 2nd edition", Benjamin/Cummings publishing company Inc., Amsterdam, ISBN 0-8053-9801-5.

POURQUOI POURSUIVRE ?

Il est certain qu'approfondir le travail accompli reste nécessaire même dans une perspective très appliquée. Pour ce qui concerne les mécanismes de propagation, par exemple, étudier spécifiquement le comportement des flammes dans les nuages de particules non vaporisables est absolument nécessaire, non seulement parce que cela concerne une fraction des poussières industrielles, mais aussi parce que l'effet devrait être d'autant plus marqué que

les particules sont fines, c'est-à-dire dans le contexte du développement des nanotechnologies [15]. Mais, sans attendre ces résultats complémentaires, les données et les corrélations obtenues ont été intégrées dans un logiciel de simulation des explosions [10, 12, 16], assez largement utilisé dans l'industrie, et servent aussi de base à l'élaboration de nouveaux guides de dimensionnement des systèmes de protection contre l'explosion [17].

SUMMARY

FUNDAMENTAL ASPECTS OF FLAME PROPAGATION IN AIR-DUST MIXTURES

The history of the development of the process industry has been punctuated by a number of hazardous explosions, sometimes very severe. A few of them are still in the memory and have certainly contributed to the birth of safety engineering. It has been known for more than a century that combustible dusts suspended in air have been partially responsible for such explosions but unlike gas explosions, the available knowledge and practices still seem to contain a significant part of empiricism. The work summarised in this article is an attempt to contribute to a better understanding of the explosion mechanisms of dust clouds. The core of the discussion pertains to basic flame propagation mechanisms. It has been discovered over two decades that for a number of combustible particles, the combustion processes in the flame show strong similarities to those of premixed gaseous flames. In particular, the propagation is driven by heat transfer through thermal conduction. However, for a class of particles, such as metal dust, thermal radiation may be strongly at work as well, modifying very significantly the propagation mechanisms in a way that has received little attention until now. This may appear as a burning question in the emerging world of "nanoparticles", since the smaller the particles the larger this influence...

PROCÉDÉS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

La réglementation, la recherche en sécurité et le développement des nouvelles technologies Supercapacités pour l'automobile et piles lithium-ion pour le grand public et l'industrie

Marc Kazmierczak, Patricia Vicot

1



Une pile au lithium prise dans un feu. On distingue des projections fusantes. Le bac fait 0,7 m. de long.

Une approche expérimentale systématique, incluant de nouveaux tests non prévus par la réglementation nous a ainsi conduits à identifier deux nouvelles classes de danger, et à proposer deux développements de barrière pour réduire à la source certains des risques ou dangers présentés par une pile au lithium :

- Barrière par détection: une pince électronique pour tester en sortie de fabrication la fiabilité d'une batterie de piles au lithium, incluant un algorithme capable de détecter une erreur humaine lors du câblage.
- Barrière par conception: un principe de conception du boîtier d'une pile ou d'un accumulateur, permettant de supprimer l'explosion violente en cas de feu.

Pour assurer efficacement la maîtrise des risques, la réglementation doit s'appuyer sur une recherche pro-active et ce, dès la conception des nouveaux produits. À défaut, on peut craindre de voir se multiplier, dans les marchés de masse, les incidents dont les scénarios auront été mal identifiés par manque de connaissance des dangers relatifs à la technologie employée par les concepteurs.

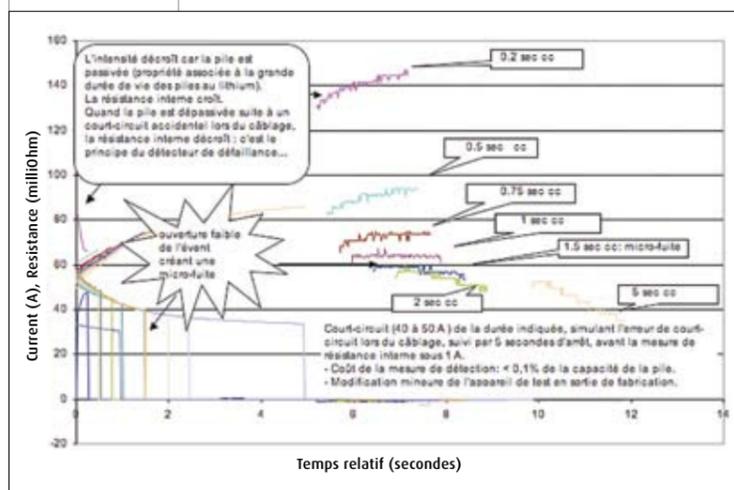
LA RÉDUCTION DU DANGER LIÉ AUX PILES LITHIUM-ION

Les batteries au lithium ont trouvé rapidement leur place dans de nombreux marchés de masse, compte-tenu de leurs performances exceptionnelles: leur durée de vie de dix ans est aussi associée à la légèreté et à une haute capacité de stockage en énergie. Mais la réglementation existante est-elle compatible avec cet essor rapide, caractérisé par la multiplicité des applications ? Que dire également des cas d'échauffements ou d'auto-combustion qui ont contraint plusieurs fabricants d'ordinateurs portables à rappeler des quantités massives de batteries au lithium pour éviter tout nouvel incident ? L'analyse d'accident ne doit pas se résumer à une analyse *a posteriori* de la conformité aux réglementations relatives au transport ou à celles pouvant exister pour le stockage ou l'utilisation, notamment quand il s'agit de nouvelles technologies qui n'ont pas encore généré suffisamment de retour d'expérience.

L'étude d'un accident inexplicable, sur un stockage dormant d'une dizaine de milliers de piles, pourtant qualifiées suivant un programme d'assurance qualité défini selon des normes militaires plus sévères, nous a confortés dans ce constat. Nous avons dû sortir du cadre initial de cette étude pour rechercher d'autres modes de défaillances que ceux envisagés par les essais réglementaires ou de qualité industrielle, et ainsi proposer une cause probable de l'incident observé.

Réduire le risque à la source

- Certaines piles au lithium comportant un événement de sécurité peuvent perdre leur étanchéité suite à un très bref court-circuit (1 à 2 secondes) provoqué lors des soudures d'assemblage. Le défaut n'est pas détectable visuellement et son occurrence ne fait perdre que 0,5% de la capacité de la pile, ce que le test de sortie de fabrication ne peut détecter. De la figure 2 a été déduit le principe d'une pince test permettant facilement de détecter ce bref court-circuit, grâce aux propriétés liées à la passivation naturelle des piles au lithium. Une barrière de détection, conçue à l'INERIS, consistant en un test simple en sortie d'assemblage de batterie de piles permet maintenant de détecter cette classe de défaillance inconnue jusqu'alors, et que nous avons reproduite expérimentalement. La mise en place de cette barrière permet d'éviter un défaut latent qui peut entraîner l'explosion de la pile, même après un an de stockage dormant.



Corrélation entre dépassivation et l'apparition d'une microfuite sur l'événement de sécurité d'une pile au lithium industrielle: application à la détection en sortie de fabrication d'un bref court-circuit lors du câblage manuel de cinq piles unitaires.

2

- Certaines piles au lithium, une fois complètement court-circuitées selon la procédure d'essai ONU (Manuel d'épreuves et de critères pour le transport des matières dangereuses), ne donnaient pas d'effets dangereux selon les critères du test réglementaire en vigueur en 1999 (Révision 3), qui recommande une observation limitée à une heure. Cependant, une semaine après ce test, on a observé l'explosion violente de cette pile déchargée, quelques minutes après que sa manipulation a révélé un léger échauffement. Le test réglementaire était donc insuffisant à l'époque, car il laissait penser aux utilisateurs que le danger d'explosion ou d'échauffement disparaissait quand ce type de pile était déchargé. Ce type de résultat, inédit à l'époque des essais, a donné lieu *via* le comité d'expert ONU à une première modification (Révision 4) en 2003 portant à 6 heures la durée d'observation après le test de court-circuit externe. Puis un amendement de cette Révision 4 est paru en 2005, et précise maintenant une durée d'observation de 7 jours.

- L'INERIS a également testé certains types de batteries au lithium pour téléphone portable, pour lesquelles l'explosion en cas d'incendie perd son caractère violent lorsque la batterie est chargée en dessous d'un seuil de charge de quelques dizaines de pourcents. Si le fabricant accepte de changer son seuil de charge en sortie de fabrication (souvent de 30 %), les effets attendus lors du transport ou du stockage peuvent être ainsi considérablement diminués.

- Certaines piles au lithium explosent lorsqu'elles sont soumises à un incendie. Des piles « boutons » (30-50 mAh) projettent ainsi violemment un des deux couvercles métalliques constituant le boîtier. L'INERIS a validé expérimentalement une barrière passive permettant d'écarter le scénario d'explosion, grâce à une analyse fine du phénomène, et généralisable à de plus gros éléments.

Nanotechnologies pour les batteries au lithium

En 2007, l'INERIS et le Laboratoire de Réactivité et Chimie des Solides (CNRS Amiens) ont soumis le projet de recherche « BatteryNanoSafe » à la Région Picardie, pour prendre en compte la dimension environnementale et de sécurité dans le développement technologique de la nouvelle génération de batteries à ions Li à performances inégalées reposant sur l'utilisation des nanomatériaux. Ce projet permet de rapprocher ALISTORE, le réseau qui fédère de nombreux laboratoires européens autour de l'intégration

des nanotechnologies dans les batteries au lithium et l'INERIS dans le cadre du futur CERTES (Centre Européen de Recherche sur les Technologies de l'Environnement et de la Sécurité).

LA RÉDUCTION DU DANGER LIÉ AUX SUPERCAPACITÉS

Comme le montre le véhicule de démonstration « Blue-Car » de BatScap, l'automobile « tout électrique » avance doucement vers l'industrialisation à destination du grand public. Ce nouveau marché, basé sur l'évolution des technologies des batteries contribuera à rendre concrète dans quelques années la charte de l'environnement, maintenant inscrite dans notre Constitution française depuis 2005.

Plus près de nos besoins, un véhicule essence réalise 15 % d'économie en énergie, en exploitant accélération et freinage récupératif. Cette avancée significative utilise une autre technologie novatrice en matière de stockage et transfert d'énergie : les « supercapacités ».

Sans offrir les capacités importantes des batteries, ces nouveaux composants permettent d'atteindre des rendements de stockage d'énergie supérieurs à 95 % et des durées de vie excédant celles des systèmes qu'elles intègrent.

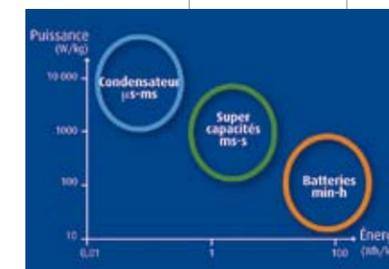
Bus électriques et hybrides, tramways sans caténaire, trolley-bus, applications spatiales et militaires sont les futurs candidats à l'utilisation de cette technologie.

Mais y a-t-il là aussi de nouveaux dangers comme on l'a vu pour les batteries au lithium ?

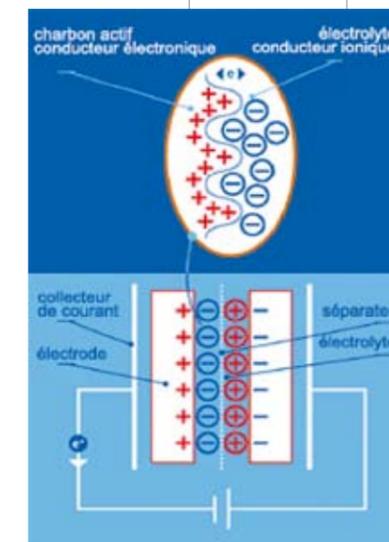
De nouveaux dangers ?

L'INERIS a accompagné le développement des nouvelles technologies de BatScap en évaluant certains des effets dangereux, à prendre en compte en situation dégradée ou accidentelle, lorsque des supercapacités sont percées, écrasées, prises dans un incendie, ou mises en court-circuit. Là également, ces nouveaux composants qui intègrent des événements nécessitent une aide à la conception par des essais spécifiques. À titre d'exemple, l'INERIS vient de valider un protocole expérimental consistant à court-circuiter un condensateur de 2 600 farads chargé à seulement 2,5 volts : le banc de décharge correspondant est spécialement conçu pour atteindre des courants initiaux de l'ordre de 4 000 A, afin d'observer l'absence d'effets dangereux dans cette situation. Ces technologies d'essais « à façon » demandent une adaptation constante des moyens métrologiques réalisables dans nos laboratoires.

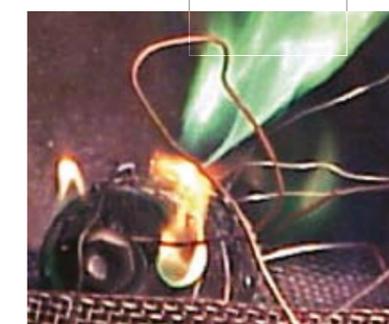
3



4



5



SUMMARY

NEW TECHNOLOGIES AND SAFETY RELATED REGULATION ISSUES: THE ROLE OF RESEARCH

This article explains how dedicated research is both helpful and desirable as early as the design stage to accompany the sustainable development of new technologies and consolidate a relevant regulatory context. This is illustrated through the brief description of 2 collaborative experimental works performed by INERIS and which concerned industrial parties in the field of energy storage: Li-ion batteries and supercapacitors for transport applications. In both cases and even in the absence of long term experience feedback (supercapacitors), deviation from normal operation of such new technologies have to be identified and analysed in terms of consequences through customised testing procedures.

Typologie du risque d'incendie et d'explosion associée au cycle de vie des biocarburants

Guy Marlair



1

Essai à niveau constant de combustion d'huile de maïs au calorimètre de Tewarson.

Le développement des biocarburants, dénommés également agrocarburants, (filères bioéthanol et ETBE, filière biodiesel...) [1] connaît un vif regain d'intérêt depuis quelques années notamment en France, mais aussi en Europe [2], ou aux États-Unis comme presque partout dans le monde [3]. Répondant à sa mission générale d'accompagnement au développement durable explicitement entérinée dans son nouveau Contrat d'objectifs 2006-2010, l'INERIS a lancé, dès 2006, un programme de recherche dénommé BIOSAFUEL® [4, 5]. L'objectif premier de ce programme est d'actualiser et de compléter les connaissances validées scientifiquement sur les aspects de sécurité potentiellement associés à la chaîne de valorisation des biocarburants et de mettre au point un outil d'évaluation de l'importance de ces questions de sécurité pour un projet donné. Le fil conducteur du projet est de consolider les connaissances sur les questions de sécurité à partir de l'identification et de la caractérisation des dangers présentés par l'ensemble des produits intervenant dans le cycle de vie des biocarburants : agro-ressources, réactifs, catalyseurs, produits utilisés dans les opérations de prétraitement des agroressources ou dans le raffinage des produits finis, produits finis, additifs divers de formulation, coproduits et autres matières impliquées dans la valorisation de ces co-produits. Les actions menées par l'INERIS, en 2006, ont essentiellement porté sur la réflexion analytique (bibliographie, échanges avec les acteurs des filières, examen du retour d'expérience) et des premiers résultats expérimentaux (essais de combustion d'huiles végétales notamment). Ces travaux permettent

de consolider un premier aperçu de la typologie des risques présentés par les biocarburants liés aux propriétés de combustibilité ou d'inflammabilité des principaux produits impliqués dans l'industrie des biocarburants.

DÉVELOPPEMENT DES CARBURANTS ADDITIVÉS D'ÉTHANOL ET QUESTIONS DE SÉCURITÉ ASSOCIÉES

Produit de manière conventionnelle par fermentation de sucres (betterave, canne à sucre...) extraits directement ou après prétraitement (par hydrolyse) de l'amidon contenu dans certaines plantes amylicées (maïs, blé, pomme de terre, orge), l'utilisation de bioéthanol à usage de carburant en addition à l'essence bénéficie déjà d'une solide expérience, notamment outre-Atlantique sur des filières spécifiques et même en France (filière betterave). Démarrée de manière spécifique au Brésil avec l'instauration du programme Proalcool dès 1973, l'incorporation d'une phase éthanol en substitution ou en mélange à l'essence a fait l'objet de nombreux travaux et de réalisations pratiques depuis plus de 20, voire 30 ans (Brésil). Différentes voies ont été explorées, on retiendra notamment :
 - l'utilisation de l'éthanol hydraté sur véhicules dédiés, au Brésil, dont la commercialisation a pratiquement disparu en 2006 ;
 - l'utilisation, dans de nombreux pays, de mélanges en proportions diverses avec l'essence où cette dernière reste le composé majoritaire (E5 en Europe, E10 en Amérique du Nord, « essence C » au Brésil incorporant selon les années de 20 à 25 % d'éthanol à l'essence sans plomb...) ;

- l'incorporation - banalisée pour le consommateur - d'ETBE, en France notamment ;
 - et surtout, depuis le début des années 2000, le développement du « superéthanol ou E85 », contenant en théorie 85 % d'éthanol pour 15 % d'essence, mais dont l'usage n'est rendu possible que par l'utilisation d'une nouvelle génération de véhicules dits « flexibles » ou « flexfuel », introduite sur le marché en 2003 (au Brésil et aux États-Unis) et plus récemment en France (2006). Cette question est tout particulièrement d'actualité en France. En effet, le superéthanol n'y connaît d'existence administrative en tant que carburant que depuis le 1^{er} janvier 2007, alors que l'ambition gouvernementale est de développer un réseau de distribution très rapidement (objectif de 500 à 600 points de vente dès la fin de l'année 2007). Le tableau 1 récapitule la situation du développement de l'éthanol carburant dans les principaux pays concernés. Si très tôt, un certain nombre de problèmes techniques liés à la sécurité des carburants additivés d'éthanol ont pu être identifiés lors des développements initiaux et en grande partie traités, comme les problèmes de compatibilité de l'éthanol avec les matériaux polymères (circuits d'alimentation en carburant ou de corrosivité de l'éthanol avec certains métaux (notamment l'aluminium), notre revue attentive de la littérature et nos échanges avec nos collègues étrangers, suédois notamment (SP, National Swedish Rescue Service), montrent que des études sont encore nécessaires pour faire converger les points de vue des experts, notamment dans le cas de l'E85, avant de maîtriser parfaitement le danger d'incendie et d'explosion associé

à l'incorporation d'éthanol dans le pool carburant essence en Europe et en France. En effet, l'évaluation du danger réel d'incendie et d'explosion associé au cycle de vie de l'éthanol carburant (sous ses diverses déclinaisons) est bien plus complexe que le simple constat de limites d'inflammabilité de l'éthanol élargies (comparativement à l'essence) et décalées vers des températures plus élevées (tableau 2). Parmi les autres paramètres à prendre en compte pour évaluer et maîtriser les scénarios accidentels résultant du danger (direct ou indirect) d'explosion et d'incendie de l'éthanol carburant, il convient notamment d'intégrer :
 - les caractéristiques différentes pour chaque mélange essence/éthanol considéré ;
 - la propriété de l'éthanol de former divers azéotropes négatifs avec les composés légers des essences, à l'origine d'une « survolatilité » des mélanges éthanol/essence, variable selon les proportions du mélange, lorsque l'essence reste le composé majoritaire ;
 - *a contrario*, une volatilité plus faible de l'éthanol et de l'E85 (comparativement à l'essence) générant des adaptations au niveau des véhicules ;
 - le risque de séparation des phases essence et éthanol selon la teneur en eau

et en éthanol ;
 - le risque de fuite lié au problème de corrosivité de l'éthanol avec certains métaux et à l'incompatibilité avec de nombreuses matières plastiques ;
 - la conductivité électrique très sensiblement plus élevée de l'éthanol et de l'E85 comparativement à l'essence ;
 - la vitesse de flamme plus élevée ;
 - le caractère polaire de l'éthanol en tant que solvant.
 Des questions de sécurité se posent notamment au niveau logistique : mise en place de dépôts de ravitaillement en supercarburant, stockage et distribution de carburants de type essences additivées et de superéthanol dans les stations-services, positionnement des équipements au regard du risque d'atmosphères explosibles et aspects environnementaux associés, pour lequel nous manquons de recul. L'expérience acquise et la mondialisation des marchés des biocarburants ne doivent, par ailleurs, pas occulter le fait que les solutions techniques à mettre en place pour développer les technologies de mise en œuvre des biocarburants dans les transports ne sont pas systématiquement généralisables, sans adaptation au contexte local. Ainsi, une solution est développée au Brésil pour résoudre les démarrages à froid rendus difficiles

1 - ÉTAT DU DÉVELOPPEMENT DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DU SUPERÉTHANOL

Pays	Nombre de points de distribution de superéthanol	Commentaires
Brésil	> 30 000 (E100 déshydraté)	
États-Unis	> 1000 (E85)	Données décembre 2007
Suède	> 600 (E85)	Estimation décembre 2006
Allemagne	~ 70 (E85)	Estimation janvier 2007
Suisse	4 (E85)	Prévision 50 à fin 2007
France	17 (E85)	Février 2007

2 - PARAMÈTRES D'ENTRÉE DE CARACTÉRISATION DU RISQUE D'INCENDIE ET D'EXPLOSION DES CARBURANTS ÉTHANOLÉS [6, 7]

		Éthanol	E85	Essence SP
Point d'ébullition	°C	78	35 - 80 (a)	33 - 213
Tension de vapeur	kPa	17	35 - 95	45 - 100
Point d'éclair	°C	12	< -30	< -40
Limites d'inflammabilité	% dans l'air	3.3 - 19	1.4 - < 19 (a)	1 - 8
Limites d'inflammabilité	°C	(+13) - (+42)	(a)	(-40) à (-18)(a)
Température d'auto-inflammation	°C	363	(a)	250 - 280
Rapport stœchiométrique air/combustible	Kg/kg	9.0	10.0	14.6

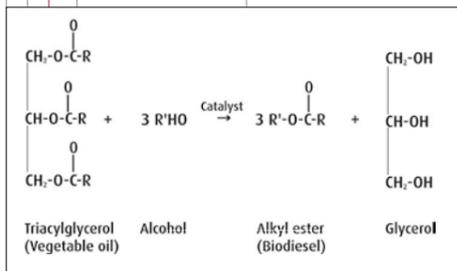
(a) données non disponibles ou à consolider, variable en fonction de la saison

Emplacement du réservoir auxiliaire d'essence sous le capot moteur d'un véhicule Flex-fuel brésilien. [7] Réservoir d'essence



2

Culasse Bloc moteur



3

Réaction de transestérification.



4

Comparaison du comportement en feu de nappe.

dans les motorisations à allumage commandé du fait de la faible volatilité de l'éthanol. On ajoute un réservoir auxiliaire à essence placé sous le capot moteur (figure 2) dont le remplissage périodique est géré par les pompistes locaux. Cette solution n'est bien évidemment pas envisageable en Europe car ne répondant pas à des principes élémentaires de sécurité compte-tenu du contexte européen de distribution de carburants automobiles. Enfin, en prévision de la gestion du risque d'incendie dans les circuits de distribution et utilisation, il est utile de rappeler que les feux d'éthanol (et donc des essences additivées de manière significative en éthanol), se comportent de manière très différente des feux d'hydrocarbures et d'essence en particulier (figure 5). Aux avantages (communs avec la combustion en moteurs) d'un moindre potentiel de pollution comparé aux essences, le comportement de solvant polaire de l'éthanol nécessite la mise en œuvre de moyens d'extinction spécifiques. À ce titre, le risque de transport banalisé de carburants additivés d'éthanol a été pris en compte lors de la réunion ONU, en décembre 2006, à Genève, des experts en matière de transport des matières dangereuses, par la création d'un numéro ONU spécifique, initiative que l'INERIS a soutenue. Ce numéro apparaîtra bientôt dans les règlements modaux, tel le règlement européen ADR.

DANGERS PROPRES À LA FILIÈRE « BIOGAZOLE » ENCORE APPELÉ BIODIESEL

Le caractère « non inflammable » souvent évoqué dans les documents grand public du biogazole (du fait d'un point d'éclair élevé de ce biocarburant – de l'ordre de 180°C) ne doit pas occulter la réalité des dangers d'explosion et d'incendie qui apparaît rapidement à l'analyse du cycle de vie des biocarburants depuis la production des agrossources (nombreuses) valorisables jusqu'à l'utilisation dans les véhicules à moteurs diesel. Pour l'illustrer, il suffit de rappeler que le biogazole reste un carburant, donc un combustible en soi, et surtout de considérer les dangers intrinsèques aux produits intervenant en quantités significatives dans la réaction dite de transestérification (figure 3), au cœur de la technologie actuelle

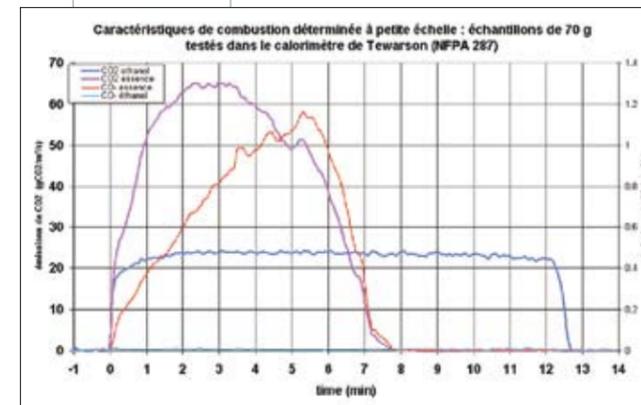
de production du biogazole (appelé Diester® en France). Cette réaction qui consiste à transformer les acides gras (95% au moins des constituants des sources lipidiques valorisables, présents sous forme de triglycérides) en esters méthyliques ou éthyliques directement compatibles avec les gazoles d'origine fossile: a) se fait en utilisant un solvant (du méthanol généralement, produit toxique et inflammable, lorsque le biogazole obtenu est un ester méthylique d'huile végétale); b) est une réaction catalytique. Les catalyseurs, homogènes ou hétérogènes, de nature alcaline ou acide, engendrent un risque d'incendie et/ou d'explosion variable, notamment avec les alcoolates de sodium ou de potassium, parmi les plus utilisés. D'autres produits inflammables ou présentant des dangers d'incendie ou d'explosion interviennent au cours du cycle de vie des biogazoles, par exemple dans les unités de trituration des graines (extraction finale), ou dans les stockages de co-produits d'origine végétale (risques d'autoéchauffement, également présents dans les filières éthanol). Autre point commun avec les filières bioéthanol, le développement programmé des carburants compatibles avec le pool diesel dits de seconde génération (gazoles de synthèse obtenus par hydrogénation ou par synthèse Fischer-Tropsch...) génère d'autres enjeux de sécurité. Ils sont liés à des plages de température et de pression significativement plus élevées, à l'apparition de flux d'oxygène ou d'hydrogène dans les procédés de fabrication, ou à des effets d'échelle notamment.

ESSAIS DE COMBUSTION D'HUILES VÉGÉTALES

L'opportunité de démarrer une phase de caractérisation de la combustion en nappe des huiles végétales à l'aide du calorimètre de Tewarson [8, 9] a été saisie, pour les raisons suivantes: a) Il s'agit des matières premières principales impliquées dans la production des biogazoles, dont d'importantes quantités sont susceptibles d'être stockées en divers endroits (sites de trituration des graines oléagineuses, usines de production de biodiesel, terminaux de stockage).

5

Comparaison « feu de nappe d'éthanol et d'essence ».



RÉFÉRENCES

[1] Bellerini D. (2006). « Les biocarburants – États des lieux, perspectives et enjeux du développement », IFP Publications, édition TECHNIP, 2006.

[2] Prieur A. & His S. (2006). « Panorama 2007. Le point sur les biocarburants en Europe », document public IFP, 20 décembre 2006.

[3] Zarrilli S. (2006). "The Emerging Biofuels Market: Regulatory, Trade and Development Implications." UNCAD report, United-Nations, N-Y and Geneva.

[4] Marlair G. & Rotureau P. (2006). "Automotive biofuels: The INERIS project 'BIOSAFUEL' & 'HORIZON': Two Research Initiatives for Better Sustainability of Biofuels Development", Biotechnology Symposium, Brock University, St-Catharines (Ontario), Canada, 9 July 2006.

[5] Marlair G. & Bourg D. (2006). "BIOSAFUEL' & 'HORIZON': Two Research Initiatives for Better Sustainability of Biofuels Development", Biotechnology Symposium, Brock University, St-Catharines (Ontario), Canada, 9 July 2006.

[6] Landhal G. & Sunnerstedt E. (2006). "Safety aspects with E85 as a fuel for vehicles", deliverable du programme européen BEST, October 2006.

[7] Marlair G., Rotureau P., Breulet H. & Brohez S. (2007). "Biofuels for Transport in the 21st Century: Why fire safety is a real issue," Proceedings of the 10th International Conference on Fire and Materials, San-Francisco, USA, 29th to 31st January 2007, Interscience Comm. Ltd.

[8] Brohez S., Marlair G. & Delvosalle C. (2006). "Fire calorimetry relying on the use of the fire propagation apparatus. Part I: Early learning from use in Europe," *Fire and Materials*, 2006

[9] Brohez S., Marlair G. & Delvosalle C. (2006). "Fire calorimetry relying on the use of the fire propagation apparatus. Part II: Burning Characteristics of selected chemical substances under fuel rich conditions," *Fire and materials*, 2006.

[10] Base G., « Incendie d'une huilerie à Lichterfelde », *Fireforum magazine*, avril 2006 – n°1, pp. 45-49.

[11] Koseki et al, (2001). "Evaluation of the burning characteristics of vegetable oils in comparison with fuels and lubricating oils", *Journal of Fire Sciences*, vol. 19, n° 1, pp. 31-44.

COLLABORATIONS (2006)

UPJV, UTC, École des Mines de Douai, Faculté Polytechnique de Mons, ISSeP, FPRF (États-Unis), Énergie et Ressources Canada/CERL.

b) Le retour d'expérience a largement démontré que dans certaines situations (milieu confiné...), la combustion incontrôlée de matières grasses, produites à haute densité énergétique, peut conduire à des scénarios d'incendies difficiles à maîtriser et particulièrement dévastateurs (ex. incendie d'une huilerie à Lichterfelde en Belgique [10]). Des essais de combustion de diverses huiles et de glycérine (autre corps gras représentant le principal co-produit des biogazoles) ont été réalisés au cours d'une première campagne d'orientation où les principaux paramètres de l'étude ont été: - la nature de l'huile (arachide, tournesol, soja, colza, maïs); - le flux thermique incident imposé lors de l'essai et simulant un niveau donné d'agression thermique. Les résultats obtenus permettent d'éclairer le débat d'experts qui s'est récemment

instauré à la suite des travaux de Koseki [11] faisant état de vitesses de combustion des huiles étonnamment faibles. Nos essais confortent le point de vue exprimé dans la même revue scientifique par Jones (qui s'étonne des très faibles valeurs obtenues par l'auteur et non commentées) tout en soulignant que les vitesses de combustion réelles demeurent extrêmement dépendantes des conditions réelles de déroulement d'un scénario accidentel. Nos essais montrent, tout comme le retour d'expérience, qu'une fois en régime établi, de tels incendies libèrent des quantités significatives d'énergie et sont très fumigènes.

PERSPECTIVES

Afin de caractériser expérimentalement les dangers spécifiques présentés par les catalyseurs de type alkoxydes (alcoolates de P et de Na), de plus en plus couramment employés pour la catalyse de la réaction de transestérification (fabrication de biodiesel), une collaboration est en cours de mise en place avec le laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (Énergie et Ressources Canada) et Degussa, l'un des principaux fournisseurs de tels produits chimiques. Les autres axes de travail visent à consolider les connaissances acquises et, en particulier, à organiser les données d'entrées nécessaires à la hiérarchisation des questions de sécurité dans un projet de développement de biocarburants donné.

SUMMARY

TYPOLGY OF THE FIRE AND EXPLOSION RISKS ASSOCIATED WITH THE LIFE CYCLE OF BIOFUELS

As proven by current events, biofuel development is becoming of worldwide interest as a result of emerging international markets, driven by a number of key factors such as the need for diversification of energy resources or combating climate change. Technically, the development of biofuels is faced with many challenges, focusing on the rapid consolidation of the production of first generation biofuels (ethanol, biodiesel) for the automotive market, whereas R&D increasingly emphasizes the industrialisation of 2G-biofuels (from "natural" biomass). This article presents the R&D initiative known as BIOSAFUEL, launched by INERIS in January 2006 to accompany the sustainable development of biofuels, while focusing on safety issues that could act as "non-technical barriers", if not properly identified and dealt with in due time. The work undertaken so far comprises analytical paperwork, which has enabled a preliminary analysis of the typology of the fire risk for conventional biofuels, whereas some experiments have dealt with studying fire scenarios involving vegetable oils, used as bioresources for the production of biodiesel. Plans for the coming years are briefly described as well.

PROCÉDÉS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

Approche méthodologique de l'évaluation des risques

Articulation entre recherche européenne et appui aux pouvoirs publics

Bruno Debray

L'accident de l'usine AZF, à Toulouse, en septembre 2001, a été le déclencheur d'une réflexion nationale sur l'évaluation des risques industriels majeurs et leur support réglementaire: les études de dangers. L'accident avait mis en évidence les insuffisances en matière d'analyse des risques dans les installations classées, expliquées en partie par l'absence de méthodologie adaptée. Pour pallier ce manque, l'INERIS a engagé des programmes d'appui aux pouvoirs publics destinés à développer les méthodes d'analyse pour la réalisation des études de dangers. Une réflexion similaire au niveau européen avait conduit à proposer le projet de recherche ARAMIS. Ces travaux ont abouti à un cadre méthodologique cohérent pour la mise en œuvre des exigences de la loi du 30 juillet 2003¹: nouvelles études de dangers et Plans de Prévention des Risques Technologiques.

LE PROJET EUROPÉEN ARAMIS

ARAMIS² est un projet européen de recherche coordonné par l'INERIS dans le cadre du 5^e PCRD. L'objectif du projet était de développer une nouvelle méthodologie d'évaluation des risques répondant aux exigences de la directive Seveso II et constituant une solution alternative aux approches purement déterministes ou purement probabilistes de l'évaluation des risques alors en vigueur en Europe.

Ce projet est né du constat que les méthodes d'évaluation des risques disponibles dans divers pays européens n'étaient plus adaptées aux exigences de la directive et aux attentes qui émergeaient tant chez les décideurs publics qu'au sein des populations. Par ailleurs, une application comparative de ces méthodes avait conduit à identifier des disparités importantes de résultats provenant de différences fondamentales d'approche dans l'évaluation des risques industriels.^[2]

Les pays ayant une approche purement déterministe se trouvaient, parfois, confrontés à la difficulté de prendre des décisions publiques sur la base d'évaluations faisant ressortir systématiquement des scénarios prédéterminés. Les résultats d'une évaluation déterministe étaient facilement communicables au public mais donnaient une vision partielle du risque. Les méthodes d'évaluation associées n'étaient pas un bon support pour la démonstration de la maîtrise du risque par l'industriel ^[3].

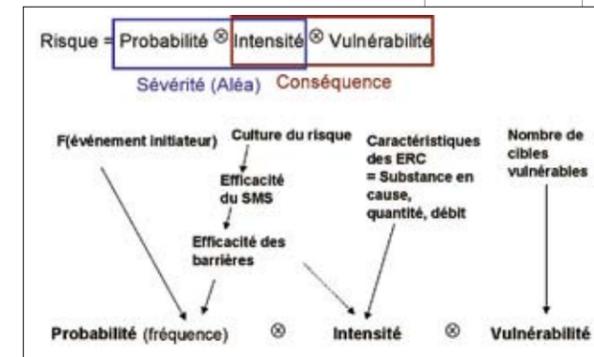
Pour les pays pratiquant une approche probabiliste, le problème se posait autrement. Le résultat de l'évaluation, libellé en termes de risque sociétal était peu communicable car peu compréhensible par la population. Par ailleurs, il s'appuyait généralement sur des données statistiques obtenues à une échelle plus large. Il ne reflétait donc pas non plus les efforts de maîtrise du risque entrepris par l'exploitant.

Le projet ARAMIS avait donc pour objectif d'aboutir à une méthode permettant de mieux estimer le risque tout en répondant aux objectifs de la directive Seveso II. Celle-ci devait fournir des résultats exploitables par les décideurs publics et les industriels, communicables à un public de non-spécialistes. L'estimation du risque produite devait aussi tenir compte des mesures de réduction du risque mises en place par l'industriel et de l'influence du facteur humain et de l'organisation sur l'efficacité de ces mesures de réduction du risque.

COLLABORATIONS

Le projet ARAMIS a été cofinancé par le programme Énergie, Environnement et Développement durable du 5^e Programme-Cadre de Recherche et Développement Technologique de la Commission européenne et, pour la partie française, par le ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables et par l'ADEME. Le consortium ARAMIS était coordonné par l'INERIS (F) et comprenait les institutions suivantes: EC-JRC-IPSC-MAHB (I), Faculté Polytechnique de Mons (B), Universitat Politècnica de Catalunya (E), ARMINES (F), Risø National Laboratory (D), Università di Roma (I), Central Mining Institute (PL), Delft University of Technology (NL), European Process Safety Centre (UK), École des Mines de Paris (F), École des Mines de Saint-Étienne (F), École des Mines d'Alès (F), Technical University of Ostrava (CZ) and Jozef Stefan Institute (Si).

Les composantes du risque et les éléments à analyser dans ARAMIS.



ERC: événement redouté central

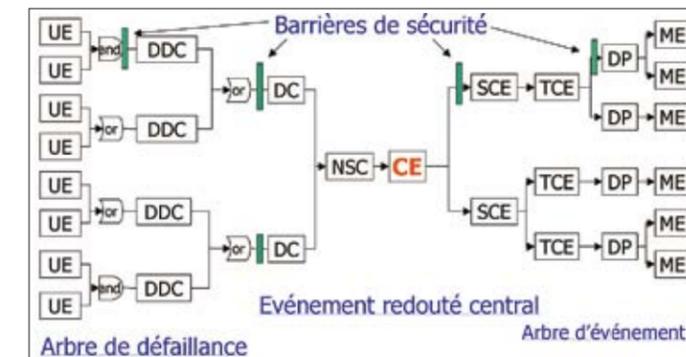
SMS: système de management de la sécurité.

LES PRINCIPAUX RÉSULTATS DU PROJET ARAMIS [3, 4]

Concepts de base

Pour atteindre ces objectifs, la première étape a consisté à s'entendre sur les composantes du risque et sur les éléments à identifier et à mesurer pour les estimer. Il faut rappeler qu'il n'existait pas, à l'époque, de définition du risque partagée par les pays de l'Union européenne. La figure 1 illustre la définition retenue. Le risque y est défini comme une combinaison de la probabilité de survenance d'un phénomène dangereux, de son intensité et de la vulnérabilité du territoire exposé. L'estimation de la probabilité implique d'identifier les événements initiateurs, causes des phénomènes dangereux, et d'en estimer la fréquence. Elle implique aussi d'identifier et de qualifier les barrières de sécurité qui s'opposent au déroulement du scénario accidentel depuis un événement initiateur jusqu'à un phénomène dangereux. La performance de ces barrières dépend non seulement de leurs caractéristiques intrinsèques mais aussi de la qualité de l'organisation mise en place pour en assurer la conception, l'installation, l'utilisation, la maintenance et l'amélioration. La qualité de cette organisation est elle-même directement influencée par la culture de sécurité de l'entreprise. L'évaluation de l'intensité des phénomènes dangereux dépend certes des modèles employés mais aussi beaucoup, voire principalement, des hypothèses retenues pour caractériser le terme source de ces phénomènes. Ainsi, est-il essentiel de préciser le mode de sélection des scénarios (c'est-à-dire l'ensemble des hypothèses de calcul) à modéliser pour estimer l'intensité de l'accident majeur redouté. Un nombre important de scénarios peut être sélectionné par ce processus. Il faut donc aussi se doter d'un moyen de représenter le risque résultant de l'agrégation de ces scénarios d'accident. Un indice de sévérité, associant intensité et fréquence, a été proposé à cet effet.

Enfin, la vulnérabilité du territoire est un sujet complexe qui peut être abordé selon de nombreuses dimensions. En première approche, la vulnérabilité d'une portion de territoire peut être considérée comme le facteur permettant d'estimer l'impact global, sur ce territoire, d'un accident majeur. Elle est donc directement liée au nombre d'éléments vulnérables présents autour du site et de leur sensibilité relative aux phénomènes considérés.

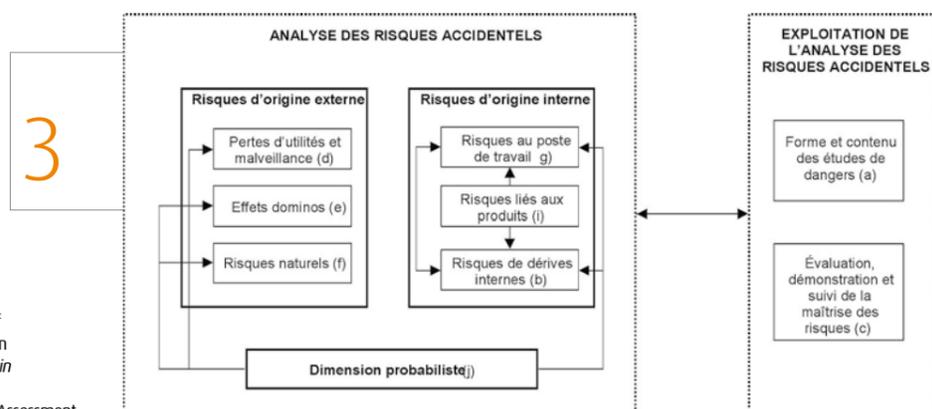


La représentation des scénarios d'accident sous forme de nœud papillon est au cœur de la méthodologie ARAMIS.

NOTES

1 - Loi du 30 juillet 2003 : loi relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

2 - ARAMIS : A Risk Assessment Methodology for Industries.



Structure du programme portant sur l'analyse des risques et la prévention des accidents majeurs.

RÉFÉRENCES

[1] Kirchsteiger C. (1999). "On the use of probabilistic and deterministic methods in risk analysis". *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, pp. 399-419.

[2] Hourtolou, D. (2002). "ASSURANCE - Assessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments." E.C. Project ENV4-CT97-0627. Rapport final INERIS-DHo- 2002-26824.

[3] User guide ARAMIS, EVG1-CT-2001-00036, Deliverable D.5.A., mars 2005, (sous la direction de B. Debray), disponible sur <http://aramis.jrc.it>

[4] Salvi O. et Debray B. (2006). "A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 187-199.

[5] Delvosalle C. et al. (2006). "ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 200-219.

[6] De Dianous V. and Fiévez C. (2006). "ARAMIS project: A more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 220-233.

[7] Guldenmund F. et al. (2006). "The development of an audit technique to assess the quality of safety barrier management". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 234-241.

[8] Planas E. et al. (2006). "A Risk Severity Index for industrial plants and sites". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 242-250.

[9] Tixier J. et al. (2006). "Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 130, issue 3, pp. 251-264.

[10] Debray B., Rodrigues N., and Salvi O. (2006). "Evolution of the risk assessment and land use planning rules around industrial SEVESO II sites in France: a parallel with the ARAMIS methodology". ESREL 2006 Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, Portugal, 18-22 September.

[11] Fontaine F., Debray B., Salvi O. (2006). "Protection of hazardous installations: Complementary Safety & Security Approaches". ESREL 2006 Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, Portugal, 18-22 September.

• Les rapports relatifs aux programmes d'appui de l'INERIS aux pouvoirs publics dans le domaine des risques accidentels majeurs sont consultables sur le site Internet www.ineris.fr

• L'ensemble des documents produits dans le cadre du projet ARAMIS est disponible sur le site Internet <http://aramis.jrc.it>

Des outils et méthodes pour l'évaluation des risques

À partir de ces définitions, le consortium d'ARAMIS a développé des méthodes et des outils pour :

- l'identification et la sélection des équipements dangereux en fonction des quantités de substances dangereuses qu'ils contiennent ;
- l'identification des événements redoutés centraux et la construction des scénarios accidentels. ARAMIS utilise pour cela la méthode de représentation dite des « nœuds papillons » (figure 2), association d'un arbre des défaillances et d'un arbre des événements. Pour faciliter cette analyse, des nœuds papillons génériques ont aussi été construits, constituant un support de départ pour l'analyse d'une installation spécifique ;
- l'identification des fonctions et barrières de sécurité ;
- l'évaluation des performances des barrières de sécurité. Les outils proposés à cet effet par ARAMIS sont volontairement inspirés des normes CEI 61508 et CEI 61511 portant sur la sécurité fonctionnelle des systèmes électriques, électroniques et électroniques programmables relatifs à la sécurité ;
- l'estimation de la probabilité du scénario à partir de la prise en compte des fréquences des événements initiateurs et des niveaux de confiance des barrières, qualifiée d'approche barrière [6] ;
- la qualification du système de management de la sécurité et son influence sur le niveau de confiance des barrières [7] ;
- la qualification de la culture de sécurité ;
- la sélection des scénarios de référence : ceux qui doivent être modélisés pour établir l'indice de sévérité [8] ;
- le calcul et la cartographie de l'indice de sévérité [8] ;
- le calcul et la cartographie de la vulnérabilité [9].

ARTICULATION AVEC LES PROGRAMMES D'APPUI AUX POUVOIRS PUBLICS

Les travaux réalisés dans le cadre d'ARAMIS et des programmes d'appui de l'INERIS aux pouvoirs publics sur l'analyse des risques et la prévention des accidents majeurs (dans le cadre des études de dangers) ou l'évaluation des dispositifs de prévention et de protection utilisés pour réduire les risques d'accidents majeurs, se sont nourris mutuellement. Ceci a permis à l'INERIS de proposer un cadre méthodologique global pour l'analyse de risques dans le cadre des études de dangers. Ce cadre met en avant une évaluation semi-quantitative des risques

qui s'appuie sur une représentation des scénarios d'accident sous forme de nœuds papillons. La probabilité des scénarios d'accident majeur est évaluée à partir d'une estimation des fréquences des événements initiateurs et du niveau de confiance des barrières de sécurité. La formalisation des critères d'évaluation des performances des barrières techniques et humaines, et leur prise en compte pour l'évaluation des probabilités des scénarios d'accident majeur constituent des résultats remarquables de ces programmes qui ont, par ailleurs, exploré de multiples dimensions de l'analyse des risques accidentels (figure 3), comme la prise en compte d'événements initiateurs spécifiques tels que les risques naturels ou les effets dominos.

UNE APPROPRIATION PAR DIVERS ACTEURS DE LA SÉCURITÉ INDUSTRIELLE

Les concepts, outils et méthodes, issus du programme ARAMIS, ont été évalués dans le cadre d'études de cas qui ont permis de mettre en évidence leur pertinence et d'identifier les éléments d'une amélioration possible. Depuis la fin du programme, chacun des partenaires a eu l'occasion de continuer à tester et améliorer ses résultats, contribuant ainsi à les diffuser dans son propre pays. ARAMIS a été identifié par de nombreuses autorités compétentes des pays de l'Union européenne et a commencé à inspirer des évolutions réglementaires, prémices d'une convergence européenne en matière d'évaluation des risques. En France, les résultats d'ARAMIS et des programmes décrits plus haut ont servi de référence à l'INERIS dans sa mission d'appui aux pouvoirs publics en vue de la mise en œuvre des PPRT et de l'évolution des exigences en matière d'étude de dangers. L'évaluation séparée de l'aléa et de la vulnérabilité, la référence à l'approche barrière, la représentation des scénarios d'accident à l'aide du schéma nœud papillon sont autant d'éléments mis en avant par ARAMIS et les méthodes développées par l'INERIS dans ses propres programmes. Ils sont totalement cohérents avec le nouveau cadre réglementaire français de l'évaluation des risques technologiques majeurs et de la maîtrise de l'urbanisation autour des Installations Classées [10]. Les résultats d'ARAMIS constituent maintenant un cadre de référence pour de nombreux aspects de l'évaluation des risques. Par exemple, une étude est en cours, à l'INERIS, pour adapter la méthode ARAMIS à l'évaluation des risques liés à la malveillance et la prise en compte des aspects sûreté dans les installations industrielles [11].

SUMMARY

METHODOLOGICAL APPROACH FOR THE ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL RISKS: THE TIE IN BETWEEN EUROPEAN RESEARCH AND PUBLIC AUTHORITY SUPPORT

On July 30th 2003, a law on the management of technological risks was passed in France. This law introduced a radical change in the principles of technological risk assessment and management and land use planning around industrial sites. Initially mainly deterministic, the decision has now been taken to base it on the assessment of probability, kinetics and level of damage caused by a potential accident. INERIS, in its technical support role to the French Ministry of the Environment, has been involved in designing the methodology used to implement these new requirements. At the same time, INERIS has coordinated ARAMIS, a European project dedicated to the development of a risk assessment methodology to meet the requirements of the SEVESO II Directive. This new methodology is based on a mixed probabilistic-deterministic approach. Some of the results obtained during this project

have inspired INERIS and have been introduced into French methodology, whereas ARAMIS has benefited from many ideas elaborated in the French context.

To this end, both approaches propose a series of concepts and tools to assess major technological risks in industrial plants. Both rely on a definition of risk as a combination of the probability and the severity of hazardous scenarios and the vulnerability of the surroundings. Probability and severity are directly related to the types of equipment and the amount of hazardous substances in the plant and to the reliability and efficiency of the safety barriers in place to prevent accidents from occurring. Both methodologies use the bow tie method, a combination of a fault tree and an event tree, to describe accident scenarios and represent the influence of safety barriers. Both result in representing the severity and the vulnerability on maps that may be used to take land use planning decisions. ARAMIS and the new French regulatory system are now being observed closely by other European countries as reference solutions for risk assessment and land use planning.

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



Le sous-sol constitue pour l'homme à la fois une richesse et une menace. Très tôt, pour son propre bien-être, il en a exploité les substances minérales : métaux, combustibles fossiles, eau... Cette exploitation a conduit, en particulier, à la création de vides souterrains et a laissé des séquelles souvent définitives. En France, l'exploitation minière est aujourd'hui quasiment achevée. Les populations sont à la recherche d'une sécurité de plus en plus grande et il convient d'identifier les menaces en provenance du sous-sol, qu'il s'agisse d'affaissements ou d'effondrements de terrain, d'émanations de gaz dangereux ou encore d'émergences d'eaux contaminées. De manière similaire, des portions de territoire sont sujettes à des risques naturels de type « mouvement de terrain », liés notamment à la présence de cavités souterraines ou à des fronts rocheux instables.

Lorsque des personnes ou des biens sont directement exposés, il s'agit d'éliminer les risques ou d'en réduire les conséquences possibles. Il faut harmonieusement gérer le territoire en évitant, dans le futur, d'exposer d'autres personnes ou biens à ces menaces : c'est tout l'enjeu des plans de prévention des risques mis en œuvre par les pouvoirs publics.

Mais les vides souterrains d'origine anthropique ou naturelle et le sous-sol, plus généralement, représentent aussi un potentiel, notamment en matière de capacité de stockage. Il s'agit du stockage, à des fins stratégiques, de produits tels que les hydrocarbures liquides ou gazeux ou encore du stockage, à des fins de gestion et de maîtrise, de déchets et substances tels que les déchets toxiques ou nucléaires ou encore le dioxyde de carbone (CO₂), principal gaz à effet de serre issu de l'activité humaine. Afin de déboucher sur des actions concrètes de gestion de ces différents risques, les problématiques complexes qu'ils soulèvent nécessitent préalablement le développement de nouvelles connaissances au travers de programmes de recherche spécifiques. Ainsi, fort de sa compétence historique, l'INERIS s'attache à améliorer la compréhension du comportement dans le temps des ouvrages souterrains et, plus généralement, des massifs rocheux, ainsi que des fluides – eau et gaz – circulant en leur sein. L'Institut conduit des recherches sur le comportement différé des roches – par exemple, la craie, le gypse – soumises à l'altération résultant de l'effet du temps et des conditions environnementales. Il développe des modèles couplés traduisant le comportement hydromécanique des milieux poreux et fracturés et permettant, par exemple, de prendre en compte et d'évaluer le rôle de l'eau dans les instabilités. L'INERIS développe également des techniques géophysiques appliquées à la localisation de cavités souterraines ou encore à la détection de signaux précurseurs de mouvements de terrain. Enfin, certains de ses travaux de recherche portent sur les interactions sol-structure et sur le comportement du bâti, en particulier, sous l'effet de fortes sécheresses géotechniques, conséquences du changement climatique.

Le stockage géologique des déchets nucléaires ou du CO₂ nécessite le développement de modèles complexes aptes à l'étude des conditions effectives d'un confinement efficace des sites. C'est aussi l'objectif poursuivi par l'INERIS au travers de certaines de ses recherches.

Toutes les recherches de l'INERIS dans le domaine du sous-sol sont conduites par des équipes multidisciplinaires. Il est, en effet, nécessaire de combiner des approches aussi diverses que la mesure en laboratoire, l'expérimentation *in situ*, le développement de lois de comportement et la mise en œuvre de modèles numériques fondés sur les mécanismes à l'origine des phénomènes physiques rencontrés.

Effondrement de cavités souterraines et interactions sol-structure : développement d'un modèle expérimental

Matthieu Caudron



Fontis survenu à Neuville-sur-Authou (2001).



Modèle réduit physique de laboratoire.

Les fontis sont un type d'effondrement local causé par la rupture de cavités souterraines d'origine anthropique ou naturelle. La nature brutale de ce phénomène peut être très préjudiciable pour les structures et infrastructures en surface ainsi que pour la population (figure 1)^[7]. De nombreuses communes et collectivités territoriales sont ainsi concernées par les conséquences de ces aléas sur les ouvrages (bâti, infrastructures...).

L'INERIS travaille depuis de nombreuses années à l'analyse, la prévention et la maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines : l'un des objectifs des travaux de recherche est l'évaluation et le perfectionnement des outils permettant de prévenir les risques liés aux cavités souterraines [5, 1].

Ces travaux ont notamment donné lieu à la publication d'un guide technique intitulé « Recommandations pour l'évaluation et le traitement des conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti » [6].

UN MODÈLE RÉDUIT BIDIMENSIONNEL

Pour aborder cette problématique, un modèle réduit bidimensionnel de laboratoire a été développé en 2005 (figure 2)^[3] puis utilisé pour reproduire la cinétique de l'effondrement d'une cavité et les conséquences des mouvements de terrain affectant en surface un bâtiment de type maison individuelle [4].

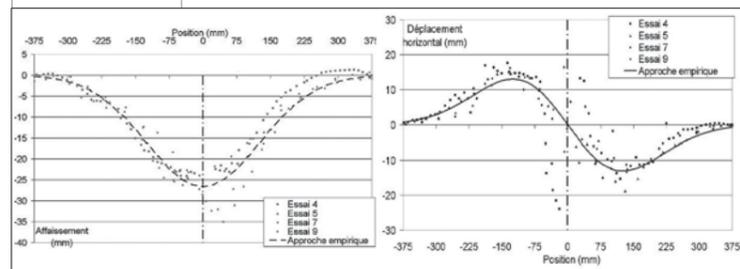
Ce modèle physique emploie un matériau analogique représentant le comportement d'un sol frottant cohérent (il s'agit d'un ensemble de rouleaux métalliques

colinéaires trempés dans une solution de colle aqueuse) et une couche de sol granulaire. Les règles de similitude à toute utilisation d'un modèle réduit sont respectées, autant que possible, en tenant compte du fait que les essais ont lieu en gravité réelle (1 g) et non en centrifugeuse. L'approche couramment utilisée lors de l'étude d'une structure soumise à des mouvements de terrain est d'étudier, dans une première étape, les mouvements de terrain sans prendre en compte la structure (en terrain vierge donc). Une fois ceux-ci déterminés, ils sont appliqués directement à la structure afin de déterminer le niveau de risque résultant. Le phénomène d'interaction sol-structure (ISS) est alors totalement négligé, ce qui peut avoir des conséquences importantes sur les résultats obtenus.

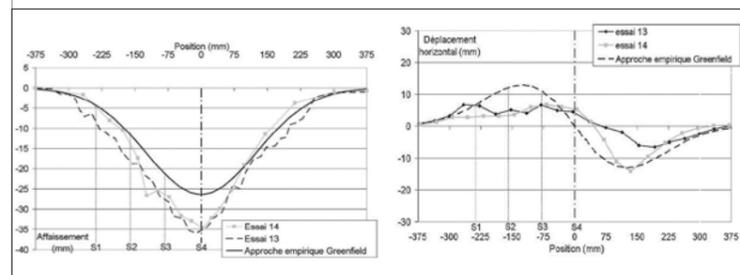
DEUX CAMPAGNES D'ESSAIS

Deux campagnes d'essais ont été menées. La première considère une cavité à l'aplomb d'un terrain de surface vierge de toute structure. L'effondrement de la cavité est provoqué. Un ensemble d'instrumentation (caméra numérique rapide, champ de déplacement par imagerie numérique) permet de suivre la cinétique de la rupture et les déplacements au sein du massif de sol et en surface.

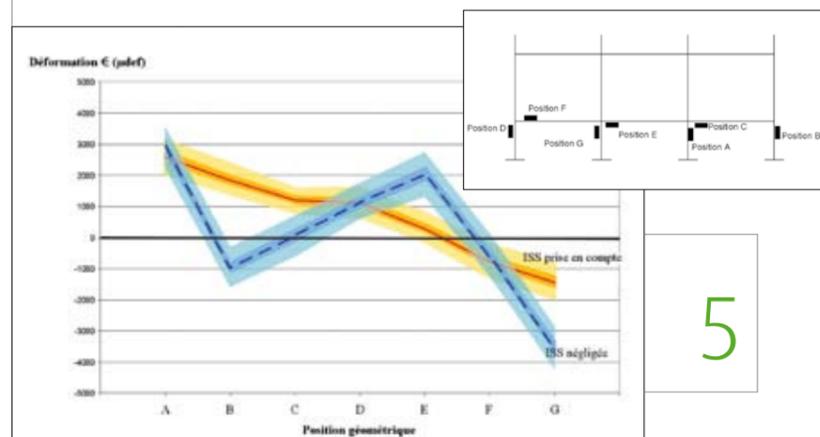
Les résultats sont comparés à ceux d'une approche empirique modifiée, issue initialement du calcul de tassement lors du creusement de tunnel circulaire. La figure 3 illustre les déplacements verticaux et horizontaux obtenus en surface. Un modèle numérique de structure est ensuite considéré. En utilisant comme sollicitations les mouvements



Déplacements en surface pour les essais en terrain vierge.



Déplacements en surface pour les essais en présence de la maquette de structure.



Déformations au sein de la structure pour les deux approches utilisées: ISS négligée et ISS prise en compte.

de terrain mesurés précédemment, il est possible de déterminer les déformations correspondantes au sein de la structure selon l'approche négligeant l'ISS. Ces déformations sont représentées par un intervalle de confiance résultant de la prise en compte des incertitudes des déplacements mesurés. Celui-ci est défini par une valeur moyenne complétée par la connaissance de l'écart type et des valeurs extrêmes rencontrées. La seconde campagne d'essais emploie des conditions identiques à la première, si ce n'est la présence d'une maquette de bâtiment en surface. L'objectif de cette campagne expérimentale est, en effet, de caractériser, pour une position donnée,

3

l'influence de l'interaction sol-structure sur les mouvements de terrain puis sur les déformations au sein de la structure. La structure comporte un rez-de-chaussée et un étage, répartis sur trois travées pour une longueur totale équivalente de 10 m. Elle est positionnée de telle manière que sa semelle extrême droite se situe à l'aplomb du centre de la cavité, zone d'affaissement maximal. Ses caractéristiques mécaniques (matériau, dimensions, sections et rigidité) ont été déterminées afin qu'elles correspondent, au facteur d'échelle près, à celles qui seraient observées sur une structure équivalente réelle. Une simplification est néanmoins réalisée: son comportement est purement élastique, aucune plastification ou rupture n'est autorisée.

4

L'instrumentation utilisée précédemment est complétée par l'emploi de capteurs de déplacement vertical au niveau de chaque semelle de la structure. Ces capteurs permettent un suivi précis et continu du déplacement vertical de chaque semelle. Le déplacement horizontal et la rotation de celles-ci sont mesurés par le biais de l'imagerie numérique.

La figure 4 présente les déplacements en surface mesurés au cours de deux essais en présence de la structure et les compare aux résultats de l'approche empirique utilisée en condition de terrain vierge. Il apparaît clairement que la présence de la structure modifie de manière importante la forme et la répartition des mouvements de terrain en surface. Ceci est particulièrement marqué pour les déplacements horizontaux. Les déformations au sein de la structure sont obtenues de la même manière que pour l'approche négligeant l'interaction sol-structure. Le même modèle numérique de structure est utilisé mais, par contre, les sollicitations imposées correspondent aux déplacements des semelles mesurés lors de l'effondrement de la cavité en présence de la structure en surface. Ainsi, les déformations obtenues au sein de celle-ci correspondent mieux au comportement réel d'un bâtiment sujet à l'effondrement d'une cavité située à son aplomb. La figure 5 présente les déformations obtenues au sein de la structure par

5

les deux approches. La convention de représentation utilisée est la suivante: sept lieux géométriques ont été définis comme étant propices à l'apparition de fortes déformations. Les déformations y apparaissant, pour l'approche considérant l'interaction sol-structure, sont classées de la plus importante à la plus faible et tracées dans cet ordre. On obtient ainsi une évolution monotone. Les résultats issus de l'approche faisant abstraction de l'interaction sol-structure sont ensuite reportés sur ce graphique en utilisant le même ordre que précédemment. L'évolution est alors assez différente. Ainsi, il apparaît très clairement que l'interaction sol-structure ne doit pas être négligée lors de l'étude de conséquences de mouvements de terrain sur le bâti en surface, ce qui rejoint en ce point les observations faites par Al Heib & Noirel [2]. Cela peut mener indifféremment à sous-estimer les déformations induites dans la structure, ce qui menace l'intégrité de celle-ci et la sécurité des occupants, ou à surestimer ces déformations et induit alors un surcoût en termes de protection des installations.

LA RÉALISATION D'UNE ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

La suite naturelle de ces travaux porte sur la réalisation d'une étude paramétrique (position de la structure, géométrie du recouvrement de la cavité...). Cela permettra d'apporter des résultats plus quantitatifs sur l'influence des différents paramètres retenus. Parallèlement, un axe de développement porte sur un bâti expérimental innovant. Il s'agit d'un dispositif permettant de réaliser des essais tridimensionnels rassemblant une partie sol et une partie structure. Les dimensions importantes de ce bâti expérimental: 3 m de large par 2 m de long, associées à une épaisseur maximale de matériau sol de 1 m permettent d'envisager des essais utilisant une échelle géométrique supérieure. À terme, le dispositif en phase d'exploitation permettra de simuler l'effondrement d'une ou de plusieurs cavités de formes diverses. Un ensemble d'instrumentations modulables (imagerie numérique, capteurs de déplacement et de vitesse, extensomètre, clinomètre...) permettra

alors de mesurer les conséquences au sein du recouvrement et en surface. Ce nouveau bâti expérimental constitue un outil important illustrant la volonté de l'INERIS d'améliorer la compréhension des mécanismes d'effondrement de cavités et des conséquences en surface. Il permettra à moyen terme d'étudier et d'améliorer la connaissance et l'utilisation des techniques de prévention et de protection du bâti vis-à-vis de l'aléa mouvements de terrain.

RÉFÉRENCES

[1] Abbass-Fayad A. (2004). « Modélisation numérique et analytique de la montée de cloche des carrières à faible profondeur. Étude de l'interaction sol-structure due aux mouvements de terrain induits par des fontis ». Thèse INPL.

[2] Al Heib M. & Noirel J.F. (2005). « Analyse des mesures d'affaissement et de mouvement horizontal induit par une mine de charbon sous un château d'eau ». International symposium on urban geotechnics GeoCityNet 2005, Lille, France.

[3] Caudron M., Emeriault F., Kastner R. & Al Heib M. (2006). "Sinkhole and soil-structure interactions: Development of an experimental model". International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, Hong-Kong, 4-6 August 2006, pp. 1261-1267.

[4] Caudron M., Emeriault F. & Al Heib M. (2007) [à paraître]. « Modélisation numérique de l'interaction sol-structure lors du phénomène de fontis ». *Revue Française de Géotechnique*.

[5] Deck O., Al Heib M., Homand F. & Wotjkowiak F. (2006). « Synthèse des méthodes de prévision des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Application au cas du bassin ferrifère lorrain ». *Les techniques de l'industrie minière*, n° 29, pp. 83-104.

[6] Kazmierczak J.-B. et Al Heib M. (2005). « Recommandations pour l'évaluation et le traitement des conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti ». Rapport INERIS DRS-05-56408/R03, 66 p.

[7] Pacyna D., Thimus J. & Welter P. (2005). « Les carrières souterraines abandonnées en Belgique: impacts sur les infrastructures publiques et privées ». Actes des journées scientifiques du LCPC: Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées, mai 2005, pp. 182-194.

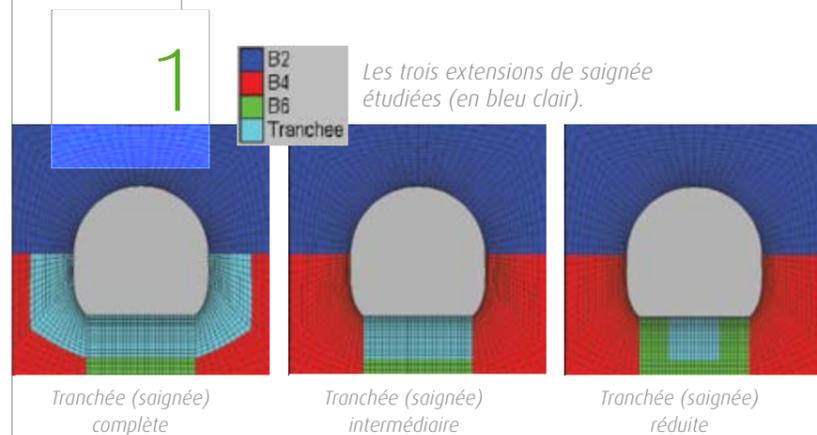
SUMMARY

COLLAPSE OF UNDERGROUND CAVITIES AND SOIL-STRUCTURE INTERACTIONS: DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL MODEL

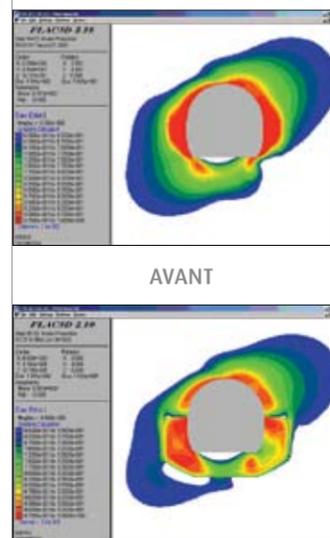
Subsidence of great amplitude result from the collapse of underground cavities resulting from human industrial activity (mines) or formed naturally by water in soluble solid rock masses (limestone, gypsum). Their impact on existing buildings on the surface is generally of great importance, as attested by recent examples: Auboué (1996), Moutiers (1997) and Roncourt (1999) causing damage to more than five hundred buildings. Another example is the sinkhole on the METEOR site (Paris) in 2003. It is thus necessary to consider ground movements at the surface (settlements and horizontal deformations) resulting from these phenomena and especially to determine the influence of the presence of superficial structures on the form and the amplitude of these movements. The research programme is based on the evaluation of urban risks due to ground movements caused by underground cavities and soil-structure interactions. It is focused on the design of a small-scale two-dimensional physical model that enables a sinkhole-like cavity collapse to be represented. This work is an innovative contribution to the design of 1g small-scale physical model through the development of cohesive analogical material, derived from Schneebeli material. Tests are then carried out in order to determine the influence of soil-structure interactions associated with a sinkhole. The following steps are finally presented by means of parametric studies on the position of the building, the geometry of the cavity, etc., and a new 3D physical model enabling such phenomena to be investigated in much more depth is introduced.

Caractérisation numérique et expérimentale de l'endommagement durant l'excavation d'une saignée et son reconfinement

Cyrille Balland, Jean-Bernard Kazmierczak, Jamil Damaj



1
Ratio de plasticité¹, avant et après creusement de la saignée complète.



2
Pas de pression sur les flancs

NOTES

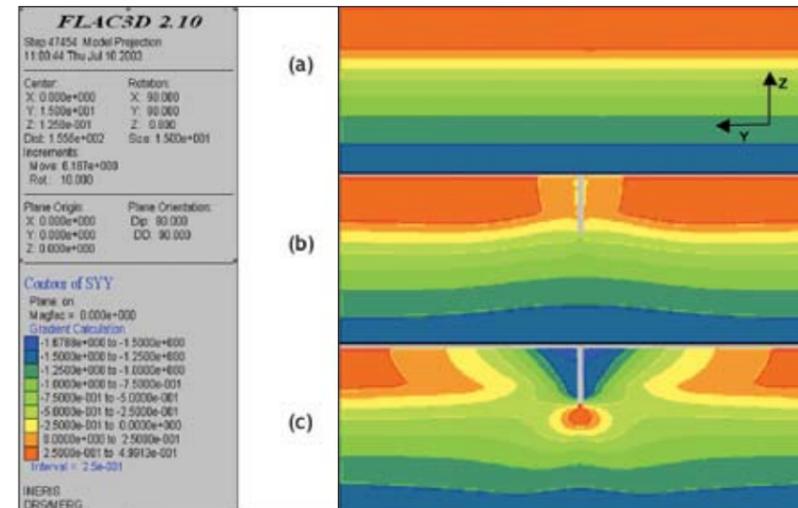
1 - Ratio de plasticité : distance entre l'état de contrainte et le critère de plastification.

L'existence d'une zone fracturée et/ou endommagée autour des ouvrages souterrains d'un stockage profond peut affecter l'aptitude de la formation géologique hôte à confiner des radionucléides. Dans ce cas, elle est dénommée EDZ (de l'anglais Excavation Damaged Zone). Afin de renforcer l'efficacité du scellement des ouvrages d'un stockage vis-à-vis d'un court-circuit hydraulique empruntant la zone fracturée et/ou endommagée, la solution étudiée par l'Andra dans ses concepts de stockage est d'interrompre, autant que possible, l'EDZ au droit des scellements. Cette solution consiste à pratiquer des saignées radiales de faible épaisseur (typiquement inférieure à 50 cm) recoupant la part de zone fracturée plus transmissive et à les remplir de briquettes d'argile gonflante. Pour comprendre et maîtriser le fonctionnement de ces saignées, une expérimentation a été réalisée au laboratoire souterrain de Mont-Terri (Suisse). L'INERIS a réalisé deux études spécifiques

en collaboration avec l'Andra :
- la modélisation numérique bi et tridimensionnelle des champs de contrainte et d'endommagement ;
- la surveillance et l'imagerie ultrasoniques de la zone encaissante de la saignée.

MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES BI ET TRIDIMENSIONNELLES

L'objectif de cette recherche était de contribuer à la conception et au dimensionnement de l'expérimentation, à l'aide de modélisations numériques (logiciel FLAC^{3D}), des différents essais prévus, c'est-à-dire le creusement de différentes extensions de saignées (figure 1), et la mise en pression progressive par paliers de pression de confinement. Cette étude a également permis de définir le positionnement optimal des instrumentations géotechniques nécessaires à la réalisation « physique » des essais *in situ*. Compte tenu de la complexité du site, liée à l'anisotropie du comportement du massif, il a été nécessaire de faire appel à des modèles de comportement élastique isotrope transverse puis élastoplastique. Les résultats des modélisations mettent en évidence clairement l'effet de l'anisotropie de comportement (figure 2) et l'effet du creusement des différentes saignées sur la modification des états de contraintes dans le massif, ainsi que sur les amplitudes de déplacements attendus, ce qui a permis de proposer un positionnement adapté pour les instrumentations.



3
Effet du creusement de la saignée (b) et de sa mise en pression (c), sur la contrainte SYX.

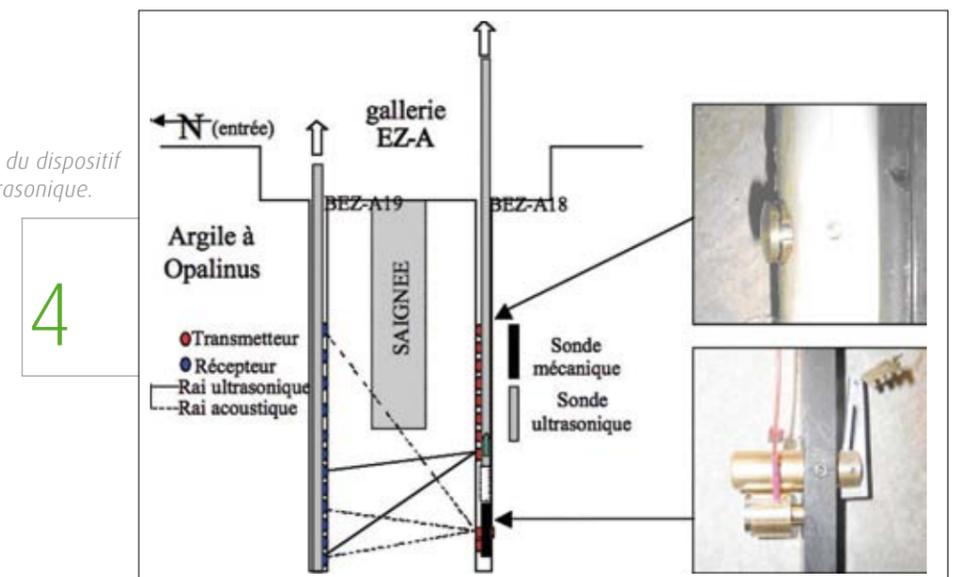
Ces travaux permettent également d'évaluer l'effet de la mise en pression des parois de la tranchée sur le reconfinement et l'amélioration des caractéristiques mécaniques du massif rocheux. À titre d'illustration, la figure 3 présente la composante horizontale SYX de contrainte avant creusement de la tranchée, juste après le creusement et finalement après application d'une pression de confinement. On observe ainsi que les contraintes de traction (valeur positive en orange) se réduisent fortement au moment du creusement de la saignée (b) et disparaissent totalement sur une étendue pouvant atteindre plusieurs décimètres (c - zones bleues) autour de la saignée. On voit cependant apparaître, en partie basse de la saignée, un phénomène de traction

en forme de bulbe, totalement déconnecté des autres zones restées en traction.

LA SURVEILLANCE ET L'IMAGERIE ULTRASONIQUES DE LA ZONE ENCAISSANTE

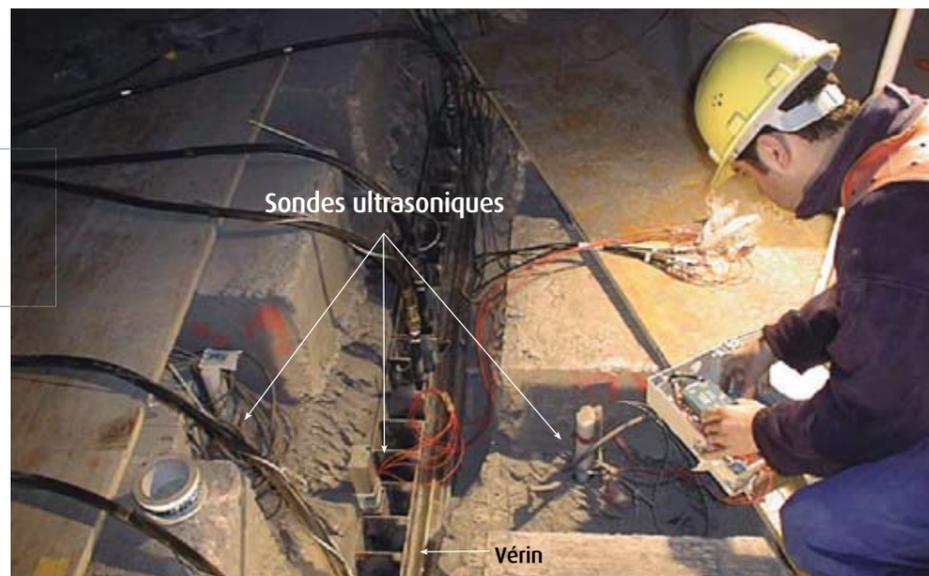
Le second volet de cette recherche était de vérifier expérimentalement le comportement mécanique suggéré par la modélisation. Les argilites à Opalinus du Mont-Terri présentent une fracturation naturelle importante qui s'ajoute à la fracturation induite par l'excavation des galeries. Une expérimentation a donc été mise en œuvre pour ausculter l'excavation de la saignée puis son reconfinement [2, 3]. Un dispositif ultrasonique a été développé pour ausculter la roche perturbée par la saignée. Cette méthode non destructive est sensible aux très légères variations de sollicitations mécaniques de la roche. Vingt-quatre capteurs répartis sur trois sondes ultrasoniques ont été disposés autour de la saignée avant son creusement puis son reconfinement (figures 4 et 5). L'image tomographique avant le creusement de la saignée a montré une zone fracturée correspondant aux perturbations induites par le creusement de la galerie principale. Les mesures ont aussi révélé la présence de fractures perturbant fortement la propagation des ondes et donc les caractéristiques mécaniques de la roche jusqu'à une profondeur du même ordre que celle de la saignée.

4
Schéma de principe du dispositif de tomographie ultrasonique.



5

Disposition des sondes ultrasoniques en forage et vérin hydraulique en place.



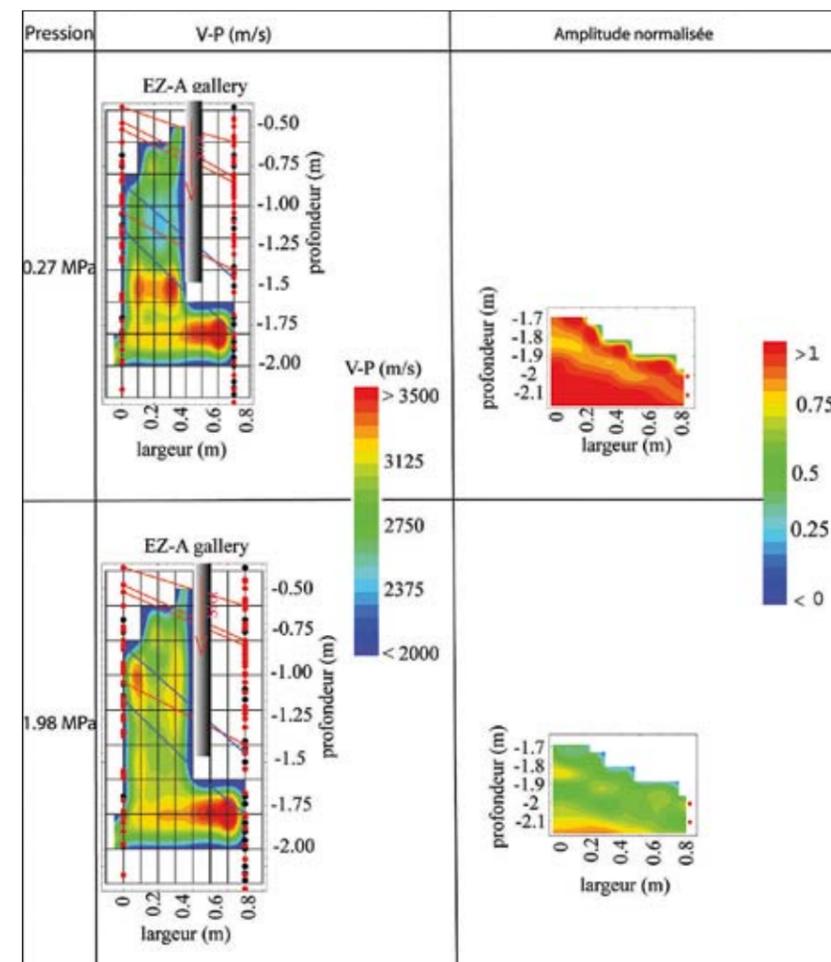
La surveillance des ondes pendant le creusement de la saignée a mis en évidence un endommagement et un déconfinement importants en bordure de saignée et un léger déconfinement sous la saignée jusqu'à 20 cm de profondeur. Le reconfinement de la saignée par le vérin hydraulique a permis d'améliorer partiellement les caractéristiques mécaniques du parement de la saignée proportionnellement à la pression appliquée (figure 6). Cependant, la configuration de l'essai a conduit à la propagation de petites fractures par traction au fond de la saignée puisque, à la différence du gonflement de briquettes de bentonite, aucune contrainte n'était appliquée au fond. Ce phénomène a été bien mis en évidence par la modélisation numérique.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'association d'une approche numérique 3D et de mesures expérimentales, dont l'implantation s'est appuyée sur les prédictions numériques, a permis d'évaluer le fonctionnement de saignées en tant que barrières hydrauliques.

Les phénomènes mécaniques ainsi que l'ordre de grandeur de la déformation obtenue par la modélisation numérique ont été confirmés par les résultats

expérimentaux. Ainsi, les modèles numériques s'avèrent adaptés pour reproduire ou prévoir le comportement de l'ouvrage et du massif encaissant. Par ailleurs, il est possible de suivre dans le temps et dans l'espace les perturbations que subit la roche à l'aide des méthodes instrumentales fines de type ultrasonique. Enfin, les résultats de ces études ont contribué à évaluer le concept de saignée que développe l'Andra. L'association de la modélisation avec l'observation a donc montré tout son intérêt. Ces recherches se poursuivent dans le laboratoire souterrain de l'Andra [1,4] autour de saignées et de galeries et pourront avantageusement être développées à l'avenir tant dans la compréhension des phénomènes que leur caractérisation *in situ*. Les technologies et méthodologies de caractérisation *in situ* décrites précédemment ont été, en grande partie, développées dans le cadre de contributions de l'INERIS aux programmes de recherche européens OMNIBUS et NF-PRO, en partenariat avec l'Andra.



6

Variations de vitesse et d'atténuation des ondes pendant le reconfinement de la saignée.

SUMMARY

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF DAMAGE INDUCED BY EXCAVATION AND RE-CONFINEMENT OF SLOTS

The existence of an excavation damaged zone (EDZ) around a storage gallery may reduce the efficiency of the storage to confine radionuclides. Andra (French National Radioactive Waste Management Agency) is developing a new concept for storage sealing, based on the excavation of radial slots in the EDZ. Those slots have a low thickness and are filled with bentonite swelling bricks. Numerical and experimental approaches have highlighted the effect of the slot as a hydraulic barrier. The experimental results confirm the mechanical phenomenon and deformation level described by the numerical modelling. Therefore, the numerical modelling is suitable for reproducing and predicting the mechanical behaviour of the excavation and the rock mass. Moreover, ultrasonic velocity surveys of the vicinity are able to monitor precisely rock mass perturbations. These results have contributed to validating the slot barrier concept developed by Andra.

RÉFÉRENCES

- [1] Balland C., Renaud V., Morel J., Damaj J. (2005). "Velocity field simulation and velocity survey design around the Meuse/Haute-Marne shaft excavation". Andra. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: abstracts of the 2nd international meeting, 14-18 March 2005, Tours, France, pp. 755-756.
- [2] Damaj J. (2006). « Auscultation et surveillance des perturbations hydromécaniques d'ouvrages souterrains par méthodes ultrasonores », thèse de doctorat de l'INPL, 160 p. + annexes.
- [3] Damaj J., Balland C., Armand G., Verdel T. (2005). "Velocity survey around a cross-cut slot". Andra. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: abstracts of the 2nd international meeting, 14-18 March 2005, Tours, France, pp. 753-754.
- [4] Kazmierczak J.B., Renaud V., Ghoreychi M., Ozanam O., Barnichon J.D. (2005). "Mechanical behaviour of a cut-off in argillites". Andra. Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: abstracts of the 2nd international meeting, 14-18 March 2005, Tours, France, pp. 739-741.

Caractérisation hydromécanique des milieux rocheux fracturés en laboratoire et *in situ*

Alain Thoraval

La gestion des risques associés aux ouvrages souterrains d'origine anthropique, qu'ils soient liés aux problématiques de l'exploitation du sous-sol (mines et carrières en activité ou abandonnées, talus rocheux), de l'enfouissement des déchets ou du stockage de CO₂, ou encore de l'amélioration des ressources géothermiques, pétrolières ou en eau souterraine, nécessite de mieux comprendre et de pouvoir prédire le comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés.

Les enjeux scientifiques se rapportent à la fois à l'évaluation de la stabilité mécanique des massifs rocheux fracturés et à la quantification des écoulements en leur sein, sachant que ces deux aspects dépendent étroitement l'un de l'autre. La stabilité d'un massif rocheux fracturé est, en effet, directement influencée par la pression hydraulique des fluides dans les fractures et les pores, alors que la perméabilité d'un ouvrage de stockage est affectée par l'état de contrainte mécanique autour de celui-ci [1].

Les recherches entreprises à l'INERIS, en partenariat avec divers laboratoires

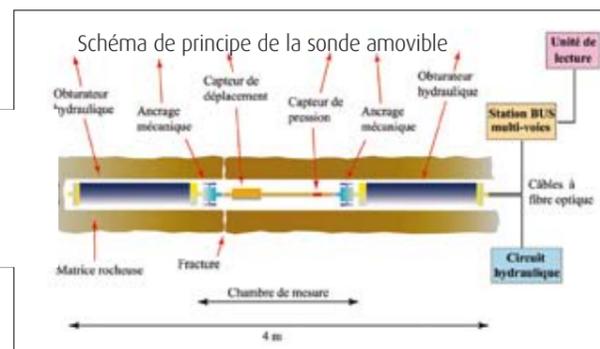
universitaires (laboratoire Géosciences-Azur de l'Université de Nice, le laboratoire des Sols, Solides, Structures - L3S - de l'Institut Polytechnique de Grenoble, laboratoire Environnement, Géomécanique & Ouvrages associant l'Institut National Polytechnique de Lorraine et l'INERIS), ont porté sur l'amélioration de la caractérisation hydromécanique des milieux rocheux poreux et fracturés à partir d'expérimentations *in situ* et d'essais de laboratoire [2]. Cette amélioration a été rendue possible grâce au développement de nouveaux outils de caractérisation et de méthodes d'interprétation et de prédiction basées sur la modélisation numérique. Les acquis scientifiques concernent l'évaluation des lois d'écoulement et de couplage hydromécanique des fractures de l'échelle décimétrique (essai de laboratoire) ainsi qu'à l'échelle décimétrique (expérimentation *in situ*).

EXPÉRIMENTATIONS *IN SITU*

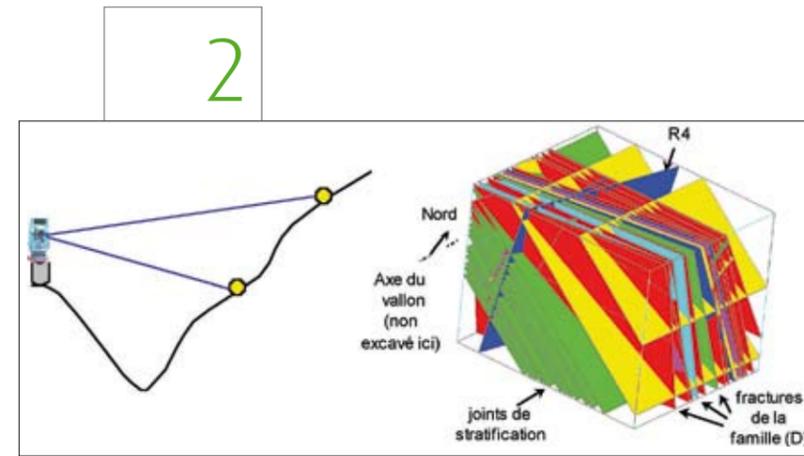
Un dispositif amovible d'auscultation *in situ* du comportement hydromécanique des fractures permettant la réalisation de mesures simultanées de pression et de déplacement a été mis au point en partenariat avec Géosciences-Azur. Les mesures par capteurs à fibre optique se révèlent être d'un ordre de grandeur plus précises que les mesures par capteurs à cordes vibrantes (soit 10⁻⁷ m pour les déplacements et 1 kPa pour les mesures de pression). De plus, la fréquence des mesures peut être bien supérieure (120 Hz), ce qui permet d'enregistrer avec beaucoup plus de finesse les variations

Sonde amovible utilisée pour mesurer *in situ* les variations de pression hydraulique et de déplacement dans une fracture (développement et utilisation en partenariat avec Géosciences-Azur).

Site pilote de Coaraze (Alpes-Maritimes)



1

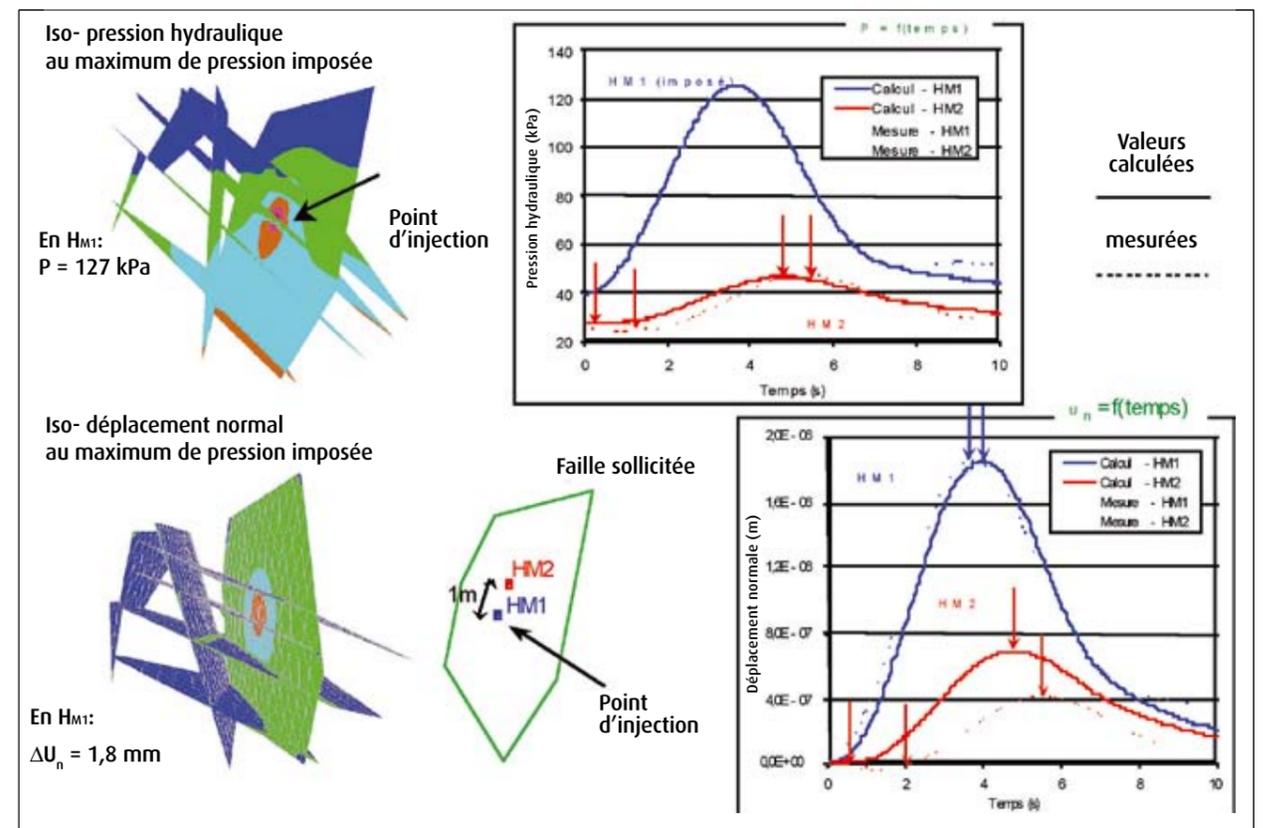


Construction du modèle géométrique du site de Coaraze à partir de mesures de fracturation par tachéométrie.

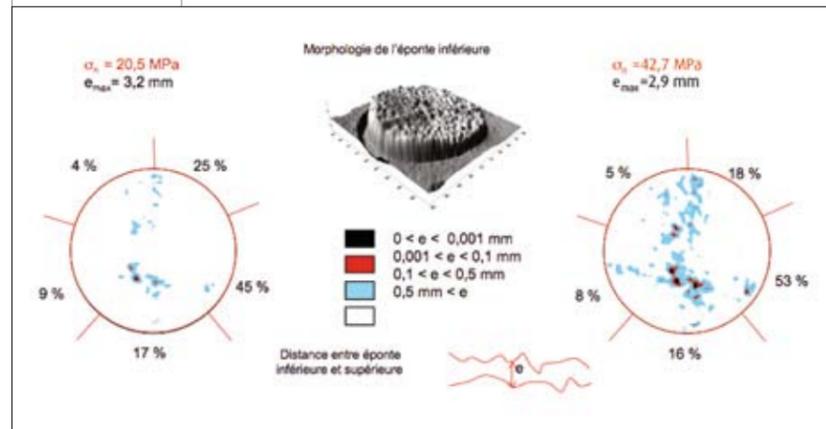
temporelles des paramètres mesurés. Le dispositif a été utilisé *in situ* dans un affleurement calcaire fracturé, spécifiquement aménagé, localisé près du village de Coaraze au nord de Nice. Les expérimentations ont consisté à réaliser des injections de courte durée (pulse-tests) et des essais de pompage et d'injection de plus longue durée. À cette fin, deux forages horizontaux HM1 et HM2 ont été réalisés dans un secteur correspondant à une zone de joints de stratification peu perméables recoupés par

des failles sub-verticales très perméables. L'expérimentation a consisté à injecter ou pomper un certain volume d'eau (en contrôlant la pression ou le débit) au droit de l'intersection d'une faille, soit avec le forage HM1, soit avec le forage HM2 (figure 1). Le dispositif instrumental mis au point et le traitement du signal appliqué aux mesures se sont révélés pertinents pour caractériser *in situ* le comportement hydromécanique des fractures. Parallèlement, l'INERIS a développé ou utilisé la modélisation numérique pour reproduire et analyser, plus en profondeur, les résultats des expérimentations et des essais de laboratoire. Le logiciel RESOBLOK a ainsi été utilisé pour représenter la géométrie du massif rocheux fracturé, de même que les logiciels UDEC et 3DEC pour simuler la réponse du milieu à une sollicitation hydromécanique. Un modèle géométrique déterministe du site de Coaraze a été construit à partir des relevés de fracturation basée sur l'utilisation d'un tachéomètre haute précision.

Interprétation des mesures *in situ* par modélisation numérique (code 3DEC).



3



4

Mise en évidence de l'impact de la morphologie des épontes sur le comportement hydromécanique des fractures en suivant la distribution de l'espace des vides et des débits sectorisés au cours d'un essai (interprétation réalisée en partenariat avec le LAEGO de l'INPL).



5

Mesure en laboratoire des échanges hydrauliques entre fracture et matrice sous sollicitation hydromécanique (essais réalisés en partenariat avec le L35 de Grenoble).

Un traitement de ces mesures a permis de déterminer l'orientation et la position des différentes fractures. Les données de fracturation ont permis de construire un modèle à grande échelle du site de Coaraze (figure 2). L'interprétation des pulses-tests de courte durée a fait l'objet d'une modélisation hydromécanique 3D en régime transitoire avec le logiciel 3DEC. Dans cette simulation, on impose la chronologie de pression mesurée au point d'injection. La comparaison des valeurs mesurées et calculées (figure 3) montre que le modèle reproduit qualitativement les évolutions relatives des pressions hydrauliques (en HM2, à environ 1 mètre du point d'injection dans la fracture instrumentée) et des déplacements (en HM1 et HM2). Un ajustement des valeurs calculées sur les mesures permet de déterminer les caractéristiques hydromécaniques de la fracture. On détermine ainsi une ouverture hydraulique de 0,1 mm et une raideur normale de 15 GPa/m au point d'injection. Un tel ajustement, réalisé pour la même fracture à 1 mètre de ce point, donne des résultats qui varient du simple au double. Cela atteste de l'hétérogénéité des caractéristiques hydromécaniques de la fracture et de l'insuffisance d'une mesure ponctuelle de ces caractéristiques [3, 4].

ESSAIS DE LABORATOIRE

Le dispositif expérimental utilisé pour les essais de laboratoire permet de mesurer les variations de déplacements et de débits induits par une sollicitation hydromécanique. On mesure également la variation de la morphologie de la fracture au cours de l'essai. La répartition

des vides entre les deux épontes de la fracture a été estimée, pour différents niveaux de sollicitation (figure 4), à partir d'une mesure de la rugosité initiale de chacune des épontes et de la mesure des variations du déplacement normal avec la contrainte normale. L'analyse directe (relation entre espace des vides et débits mesurés) et l'analyse indirecte (interprétation par modélisation numérique) ont mis en évidence la non-équivalence entre la variation de l'ouverture mécanique de la fracture (liée à sa rigidité) et la variation de son ouverture hydraulique (liée à sa perméabilité), en particulier sous forte contrainte normale effective. Faire cette hypothèse conduit, en effet, à prédire des débits bien plus faibles que ceux mesurés. Cette inégalité des variations est notamment liée à la rugosité des plans de fracture et à une chenalisation progressive des écoulements lorsque la contrainte normale augmente [5]. Le comportement de l'échantillon en double porosité (fracture + matrice poreuse) a également été étudié. Il a été préalablement nécessaire de faire évoluer ce dispositif expérimental de manière à pouvoir imposer, dans la fracture, une pression constante (ou contrôlée) pendant un temps suffisamment long pour permettre au fluide de diffuser dans la matrice poreuse. Les modifications ont consisté principalement à imperméabiliser l'orifice d'injection traversant verticalement la partie inférieure de l'échantillon fracturé et à mettre en place un système d'imperméabilisation amovible aux limites du joint (figure 5). Avec le collier amovible, on ne mobilise que la perméabilité

hydraulique matricielle (car la sortie de la fracture est obturée), tandis que, sans le collier amovible, on mobilise à la fois la perméabilité hydraulique matricielle et la conductivité hydraulique de la fracture. Dans un souci de qualifier le dispositif expérimental, les premiers essais ont été réalisés sur des échantillons de grès des Vosges provenant de la carrière de Bleuville. Cette roche a été choisie pour ses fortes valeurs de perméabilité et de porosité. Plusieurs essais ont été réalisés pour caractériser successivement

la conductivité hydraulique de la fracture, celle de la matrice poreuse ainsi que les échanges hydrauliques entre fracture et matrice. Les effets hydromécaniques couplés ont également été étudiés en faisant évoluer la sollicitation mécanique de l'échantillon (palier de contrainte normale). Les résultats des essais ont été analysés par modélisation numérique en régime transitoire. Les codes VIPLEF/HYDREF (de l'École des Mines de Paris) utilisés tiennent compte de la double porosité de l'échantillon (fracture + matrice)

et permettent de reproduire avec précision le chargement hydromécanique imposé. Les analyses montrent que le choix de la relation entre l'ouverture hydraulique de la fracture et la fermeture mécanique affecte fortement le débit simulé dans la fracture. Les écoulements dans la matrice peuvent également être légèrement affectés par l'ouverture hydraulique de la fracture. La réalisation de mesures simultanées des débits dans la fracture et la matrice devrait, à terme, permettre une évaluation globale de l'approche conceptuelle utilisée.

SUMMARY

LABORATORY AND IN SITU HYDRO-MECHANICAL CHARACTERIZATION OF POROUS AND FRACTURED MEDIA

Risk management related to underground mining (active or abandoned mines and quarries, rock slopes), waste repositories, greenhouse gas storage tanks, water, oil and natural gas resources, needs to be better understood in order to be able to predict the hydro-mechanical behaviour of fractured rock masses.

The scientific goals are both the evaluation of the mechanical stability of fractured rock masses and the prediction of fluid flows, given that these two aspects are closely linked. Indeed, the stability of a fractured rock mass depends on the fluid water pressure in the fractures and pores, whereas the permeability of a storage area is affected by the mechanical state of stress surrounding it.

The research undertaken by INERIS, in partnership with French university laboratories ("Géosciences-Azur" Laboratory, Nice; "Sols, Solides, Structures" Laboratory, Grenoble; "Environnement, Géomécanique & Ouvrages" Laboratory, Nancy), related to the improvement of the hydro-mechanical characterization of porous and fractured rock masses starting from in situ experiments and laboratory tests.

This improvement was made possible thanks to the development of new characterization tools and new interpretation and prediction methods based on numerical modelling. The scientific assets relate to the evaluation of fracture flows and hydro-mechanical couplings from laboratory tests to in situ experiments.

A removable device, enabling hydraulic pressure and displacement measurements to be carried out, was developed in partnership with the Géosciences-Azur Laboratory. The device was used in a fractured limestone outcrop located close to the Coaraze village to the North of Nice in France (fig. 1). The experiments consisted in carrying out various pulse tests. In parallel, we developed and used numerical modelling (with 3DEC code) to reproduce and analyze the measurements, which led to questioning the Terzaghi hydro-mechanical relation and the cubic law for fracture fluid flows.

Laboratory tests were carried out on limestone samples from the Coaraze site and on sandstone samples from the Bleuville quarry in the Vosges region in France. The "3S" Laboratory has developed a device to study the hydro-mechanical behaviour of individual fractures on the laboratory scale (Fig. 1). This device was modified to measure the flow through porous rock mass samples as well. The results of the tests were analyzed by numerical modelling with the 3DEC and VIPLEF/HYDREF codes. The analyses show that the relation between the hydraulic aperture of the fracture and mechanical closure strongly impacts the fracture flow rate predictions. This was related to the fracture roughness evolution. The rock matrix flow rate can also be slightly affected by the fracture hydraulic aperture. The realization of simultaneous flow measurements in both fractures and the rock matrix should enable us to globally evaluate the conceptual approach used.

RÉFÉRENCES

- [1] Thoraval A., Gatelier N., You T. (2005). « De certains effets hydromécaniques lors du creusement et de l'exploitation de galeries de stockage en milieu fracturé », *Revue Française de Géotechnique*, n° 113, pp. 41-51.
- [2] Thoraval A. (2005). « Analyse du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés à partir d'essais *in situ* et de modélisation ». Rapport final BCRD-DRS-02/01 INERIS-DRS-05-66388/RN01, 15 décembre 2005.
- [3] Cappa F., Guglielmi Y., Rutqvist J., Tsang C.F., Thoraval A. (2006). "Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze laboratory site - France". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 43, n° 7, pp. 1062-1082.
- [4] Guglielmi Y., Cappa F., Rutqvist J., C-F Tsang, and Thoraval A. (2006). "Field and numerical investigations of free-water surface oscillation effects on rock slope hydromechanical behaviour - consequences for rock slope stability analyses". Proceedings of the GEOPROC2006 International symposium, HoHai University, Nanjing, China, 22-25 May, pp. 174-182.
- [5] Lopez P., Rahmani I., Buzzi O., Boulon M., Thoraval A., Escudero-Rodríguez M. (2006). "Void space against fracture hydro mechanical behavior at sample scale", Van Cotthem A., Charlier R., Thimus J.F., Tshibangu J.P. (Eds.). Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics. Proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May, pp. 141-147.

Les Plans de Prévention des Risques Miniers

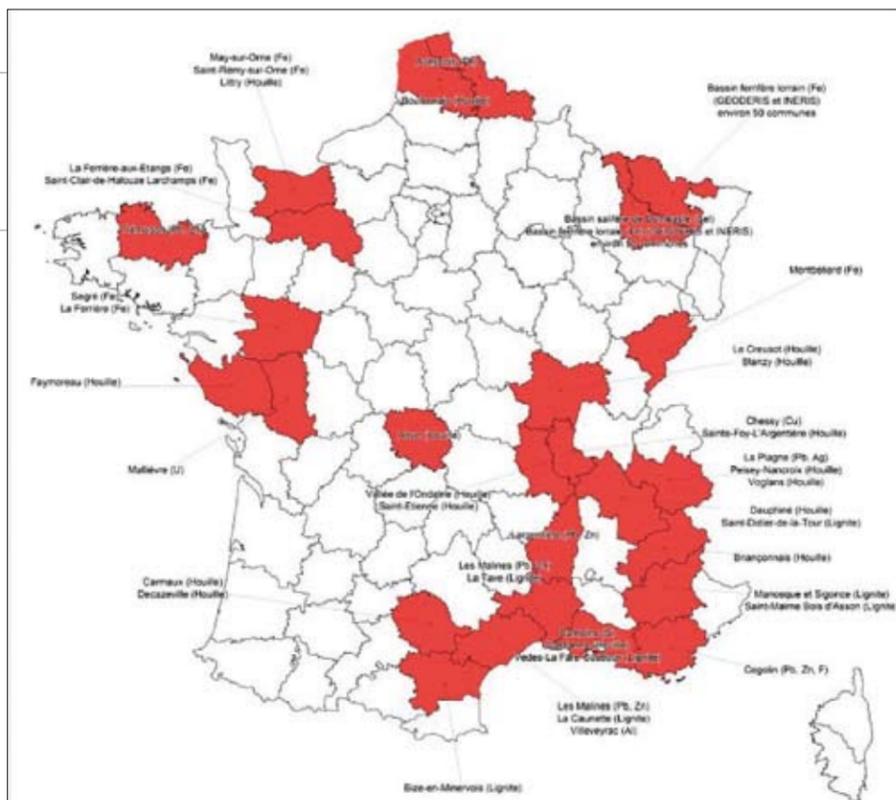
Xavier Daupley, Christophe Didier

L'INERIS est impliqué de longue date dans un appui aux pouvoirs publics pour la mise en œuvre de la politique de prévention des risques liés à l'après-mine. La contribution de l'INERIS se traduit par le développement de connaissances et de méthodologies d'analyse et de hiérarchisation des aléas et des risques. Elle prend également la forme d'expertises pointues réalisées pour le compte des pouvoirs publics ou des exploitants. L'un des outils majeurs de cette politique de prévention est le Plan de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Établis directement sur le modèle des Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles, les PPRM ont pour vocation d'identifier les secteurs les plus sensibles au développement de risques ou nuisances dans le long terme et d'établir des règles de gestion et d'aménagement du territoire, adaptées aux différentes contraintes liées à l'après-mine [1].

L'INERIS a coordonné l'élaboration du guide méthodologique d'élaboration des PPRM pour ce qui concerne les aléas mouvements de terrain, inondations et émissions de gaz de mine. Finalisé en 2006, cet ouvrage collectif, coordonné par l'INERIS, a été établi sous l'égide du ministère en charge des mines. Différents organismes impliqués dans l'évaluation des risques liés à l'après-mine ont contribué à l'élaboration de son contenu technique : INERIS, GEODERIS 1, École des Mines de Paris, BRGM, CSTB [2].

1

Cartes d'aléas miniers réalisées par l'INERIS en relation avec GEODERIS.



Carte d'aléa effondrement localisé associé au gisement de fer de May-sur-Orne (Calvados) et investigations complémentaires des travaux miniers à l'aplomb de zones à enjeux.

2



Prédisposition Intensité	Très peu sensible	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Très limitée				
Limitée				
Modérée				
Élevée				

3

Principe d'identification des classes d'aléas en fonction des classes d'intensité et de prédisposition (guide PPRM).

Le guide a pour vocation d'accompagner et de faciliter la mise en œuvre des PPRM. Il est destiné à l'ensemble des acteurs qui interviennent lors de l'élaboration d'un PPRM (services de l'État, collectivités, bureaux d'études...)?

Par ailleurs, à l'échelle internationale, l'INERIS assure la présidence, au sein de la Société Internationale de Mécanique de Roches, d'une commission d'experts spécialisée sur l'analyse et la gestion des risques liés à l'après-exploitation. Cette commission travaille à l'élaboration d'un ouvrage synthétique décrivant l'état de l'art, sur le plan international, des connaissances sur le domaine afin de valoriser l'expertise collective à destination, notamment, des pays émergents qui seront, un jour, confrontés à la problématique.

L'INERIS participe activement, depuis l'instauration des PPRM en 1999, à l'élaboration des cartes d'aléas. L'Institut a ainsi établi, en relation avec GEODERIS, l'analyse et la cartographie des aléas miniers de plus d'une quarantaine de sites en phase post exploitation (figure 1). À ces sites, il convient d'ajouter l'ensemble du bassin ferrifère lorrain qui a fait l'objet d'un traitement spécifique dès avant l'instauration des PPRM et dont les dernières cartes d'aléas seront produites en 2007, portant ainsi la superficie étudiée à une centaine de communes.

Les cartes d'aléas ont concerné l'essentiel des types de substances minières rencontrées en France ; les exploitations de gîtes polymétalliques (plomb-zinc du Gard, de l'Ardèche, de Bretagne, cuivre dans le Rhône, uranium dans l'ouest de la France...), la bauxite dans l'Hérault, les bassins ferrifères de Normandie (figure 2), du Maine-et-Loire, de Franche-Comté et de Lorraine, les bassins charbonniers ou lignitifères du Limousin, de Provence, du Lubéron, du Dauphiné, du Briançonnais...

La totalité des sites étudiés jusqu'ici ont mis en évidence des aléas mouvements de terrain (effondrements localisés, affaissements, glissements...), associés à d'anciens travaux souterrains, à ciel ouvert ou d'anciens sites de dépôts (verses, terrils...). Dans d'assez nombreux cas, les aléas émission de gaz de mine ont également été évalués et cartographiés ainsi que, ponctuellement, les aléas environnement, lorsque ceux-ci étaient jugés cruciaux au regard de la substance exploitée en particulier (cas des gîtes polymétalliques notamment).

Une analyse de l'aléa minier consiste à localiser et hiérarchiser les zones exposées à des phénomènes potentiels, en fonction de l'intensité des phénomènes prévisibles et de la prédisposition de la zone à voir ces phénomènes se développer. L'objectif est de transcrire, de manière objective, le potentiel de risque ou de nuisances que l'ancienne exploitation minière est susceptible d'engendrer, à terme, dans le secteur d'étude. Dans la terminologie française, l'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène

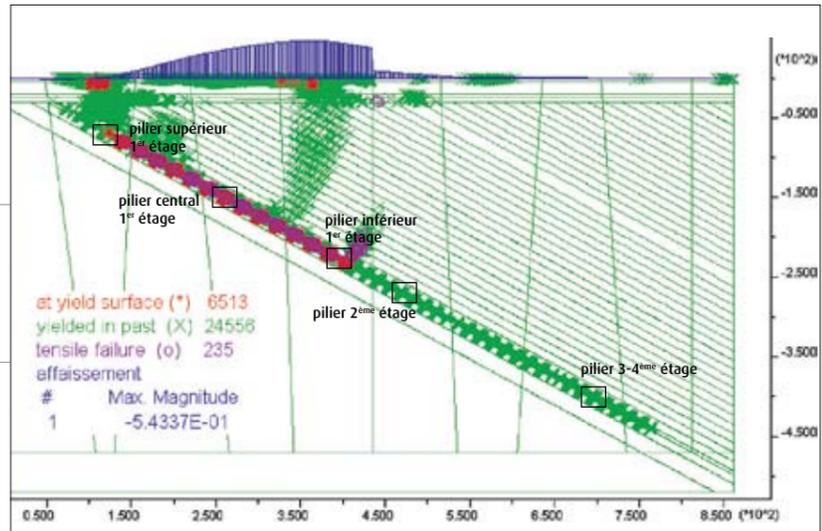
NOTES

1 - GEODERIS est un groupement d'intérêt public, constitué de personnels mis à disposition par l'INERIS et le BRGM, qui est l'expert des pouvoirs publics en matière de risques liés à l'après-mine.

2 - L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport d'étude INERIS-DRS-06-51198/R01 du 4 mai 2006, 139 p. (document en ligne sur le site de l'INERIS, www.ineris.fr/). Ce guide a fait l'objet, en mai 2006, d'une journée de présentation et de valorisation, organisée par le MINEFI et l'INERIS à l'attention des DRIRE.

Gisements pentés ferrifères de Normandie. Estimation des potentialités d'effondrement brutal ou d'affaissement. Distribution de la plasticité (espacement des joints de 10 m + variation de l'affaissement en surface).^[4]

4



donné se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène (figure 3) avec sa prédisposition à se développer.

Si le travail d'évaluation et de cartographie des aléas est généralement basé sur un avis d'expert s'appuyant sur l'ensemble des données disponibles (archives, reconnaissances *in situ*, plans d'exploitation...), certaines configurations exigent des analyses très fines mettant en œuvre, par exemple, des modèles numériques restituant le comportement des terrains. De telles analyses ont ainsi été menées pour évaluer les possibilités d'affaissement ou d'effondrement brutal de la surface du sol dans les contextes d'exploitation partielle des gisements ferrifères de Lorraine ^[3] et de Normandie ^[4].

SUMMARY

MINING RISK PREVENTION PLANS

INERIS has been involved for many years in supporting the French public authorities in defining national policy for preventing and managing post-mining risks. In order to properly identify and manage such risks, the French authorities have developed a powerful operational regulatory tool: MRPPs (Mining Risk Prevention Plans). MRPPs aim to identify the most sensitive areas subject to "post-mining hazards" and to define the technical and regulatory rules capable of managing the principles of future urban development on the surface (Didier and Leloup, 2005). INERIS has drawn up, on behalf of MinEFI (French Ministry in charge of Industry) the methodological guide for completing MRPPs. INERIS is also in charge of coordinating, within the International Society of Rock Mechanics, an experts' commission involved in analysis and risk management related to post-mining. Since 1999 when the first MRPPs were initiated, INERIS, in association with GEODERIS, has carried out the analysis and mapping of mining hazards on more than 40 mining sites (coal and iron basins, polymetallic sites, etc.) distributed throughout France. To these must be added the whole Lorraine iron basin (more than one hundred communities concerned). Different kinds of surface instability hazards have been mapped (sinkholes, subsidence, landslides, etc.) for all of the investigated sites. In most cases, surface gas emissions have also been studied. Soil and water pollution have been analysed only on specific sites with high pollution potential such as, for example, polymetallic deposits.

RÉFÉRENCES

- [1] Didier C. et Leloup J. (2005). "The MRPP: a powerful operational regulatory tool to prevent and manage post-mining risks". Post-mining 2005, 16-18 November, Nancy, France.
- [2] Didier C. et Leloup J. (2006). "The French experience of post mining management". Proceedings 1st International seminar on mine closure, 13-15 September, 2006, Perth, Australia.
- [3] Fougereon J., Homand F., Souley M., Bennani M., Josien J.P. (2006). "Collapse/subsidence: evolution of the overburden massivity according to the geomorphology in the Lorraine iron mines case". Proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 301-307.
- [4] Renaud V., Tritsch J.J., Franck C. (2005). "Modeling and assessment for subsidence hazard in declined iron mining". Proceedings of the symposium Post-mining 2005, 16-18 November 2005, Nancy, France.

Annexes



PUBLICATIONS

Liste des articles parus dans des revues à comité de lecture ou proceedings à diffusion large, entre le 31 mai 2005 et le 30 juin 2007.

- 94 ■ Substances et produits chimiques
- 95 ■ Risques technologiques et pollutions
- 101 ■ Risques liés à l'après-mine, aux stockages souterrains et risques naturels

SITES INTERNET

- 104 ■ Vi@ Internet

PUBLICATIONS

Substances et produits chimiques

NOTA : tous les auteurs des publications sont mentionnés mais seuls les noms des auteurs INERIS figurent en gras

2005

DESMOTS S., BRULEZ C., LEMAZURIER E.

Perturbateurs de la fonction endocrinienne et santé : un point non exhaustif sur les connaissances.

Environnement Risques & Santé, 2005, vol. 4, n° 3, pp. 195-204.

DOORNAERT B., PICHARD A.

Analyse et proposition de méthodes d'évaluation de la relation dose-réponse des effets cancérigènes induits par un mélange d'hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Environnement Risques & Santé, 2005, vol. 4, n° 3, pp. 205-220.

MABY E., JEANNES R.L., FAUCON G., LIEGOIS-CHAUVEL C., DE SEZE R.

Effects of GSM signals on auditory evoked responses.

Bioelectromagnetics, 2005, vol. 26, n° 5, pp. 341-350.

BRILLAUD E., MORILLON D., DE SEZE R.

Modest environmental enrichment: effect on a radial maze validation and well being of rats.

Brain research, 2005, vol. 1054, n° 2, pp. 174-182.

BELGHAZI K., GHYSELEN L., ELABBASSI E.B., AGOURRAM B., LIBERT J.P.

Influence of neonate's body position with and without a plastic blanket on body heat loss assessed from a thermal mannequin.

HOLMER I., KUKLANE K., GAO C. (Eds.). Environmental ergonomics XI: proceedings of the 11th international conference, 22-26 may 2005, Ystad, Sweden. Lund, Sweden: Lund University, 2005, pp. 662-664. [CD-ROM]

BROCHOT C., TOTH J., BOIS F.Y.

Lumping in pharmacokinetics.

Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics, 2005, vol. 32, n° 5-6, pp. 719-736.

BROCHOT C., BOIS F.Y.

Use of a chemical probe to increase safety for human volunteers in toxicokinetic studies.

Risk Analysis, 2005, vol. 25, n° 6, pp. 1559-1571.

COQUERY M., BABUT M., BONNOMET V.

Établissement des seuils de qualité environnementale pour les substances chimiques prioritaires de la directive-cadre européenne sur l'eau. État d'avancement.

Techniques, Sciences et Méthodes, 2005, n° 12, pp. 66-78.

LACROIX G.

Allergies respiratoires, pollens et polluants.

Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 2005, vol. 66, pp. 584-591.

2006

DE SEZE R.

Effets biologiques et sanitaires des fréquences intermédiaires.

Environnement Risques & Santé, 2006, vol. 5, n° 1, pp. 31-35.

VACHE C., CAMARES O., DE GRAEVE F., DASTUGUE B., MEINIEN A., VAURY C., PELLIER S., LEOZ-GARZIANDIA E., BAMDAD M.

Drosophila melanogaster P-glycoprotein: A membrane detoxification system toward polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants.

Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, vol. 25, n° 2, pp. 572-580.

SANCHEZ W., PALLUEL O., LAGADIC L., AIT-AISSA S., PORCHER J.M.

Biochemical effects of nonylphenol polyethoxylate adjuvant, Diquat herbicide and their mixture on the three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus* L.)

Marine Environmental Research, 2006, vol. 62, suppl. 1, pp. S29-S33.

MOTTA A.C., MARLIERE M., PELTRE G., STERENBERG P.A., LACROIX G.

Traffic-related air pollutants induce the release of allergen-containing cytoplasmic granules from grass pollen.

International Archives of Allergy and Immunology, 2006, vol. 139, pp. 294-298.

DE VAUFLEURY A., CŒURDASSIER M., PANDARD P., SCHEIFLER R., LOVY C., CRINI N., BADOT P.M.

How terrestrial snails can be used in risk assessment of soils.

Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, vol. 25, n° 3, pp. 797-806.

BRILLAUD E., DE SEZE R.

Téléphones mobiles et neurotoxicité pour le système nerveux central.

Environnement Risques & Santé, 2006, vol. 5, n° 2, pp. 107-119.

HINFRAY N., PALLUEL O., TURIES C., COUSIN C., PORCHER J.M., BRION F.

Brain and gonadal aromatase as potential targets of endocrine disrupting chemicals in a model species, the zebrafish (*Danio rerio*).

Environmental Toxicology, 2006, vol. 21, n° 4, pp. 332-337.

MARCHAND-GENESTE N., CAZAUNAU M., CARPY A.J.M., LAGUERRE M., PORCHER J.M., DEVILLERS J.

Homology model of the rainbow trout estrogen receptor (rtER alpha) and docking of endocrine disrupting chemicals (EDCs).

Sar and Qsar in Environmental Research, 2006, vol. 17, n° 1, pp. 93-105.

BROCHOT C., BESSOUD B., BALVAY D., CUENOD C.A., SIAUVE N., BOIS F.

Evaluation of antiangiogenic treatment effects on tumors' microcirculation by Bayesian physiological pharmacokinetic modeling and magnetic resonance imaging.

Magnetic Resonance Imaging, 2006, vol. 24, pp. 1059-1067.

DOORNAERT B., PICHARD A.

Valeurs toxicologiques de référence : comment choisir ?

Environnement Risques & Santé, 2006, vol. 5, n° 3, pp. 191-197.

WOOD M., PICHARD A., GUNDERT-REMY U., DE ROOIJ C., TISSOT S.

The AETL methodology as a potential solution to current challenges associated with the development and use of acute exposure levels in Seveso II applications.

Journal of Hazardous materials, 2006, vol. 133, n° 1-3, pp. 8-15.

CHARISSOU A.M., JOURDAIN M.J., PANDARD P., POULSEN V., DEVILLERS J., FERARD J.F., BISPO A.

Démarche optimale de sélection de batterie de bioessais pour l'évaluation écotoxicologique des milieux complexes. Synthèse bibliographique.

Techniques, Sciences et Méthodes, 2006, n° 5, pp. 101-110.

LAVILLE N., AIT-AISSA S., CASELLAS C., PORCHER J.M.

Application de modèles *in vitro* à l'étude des effets des médicaments chez les poissons.

Environnement Risques & Santé, 2006, vol. 5, n° 4, pp. 284-289.

DEVILLERS J., MARCHAND-GENESTE N., CARPY A., PORCHER J.M.

SAR and QSAR modeling of endocrine disruptors.

Sar and Qsar in Environmental Research, 2006, vol. 17, n° 4, pp. 393-412.

PANDARD P., DEVILLERS J., CHARISSOU A.M., POULSEN V., JOURDAIN M.J., FERAD J.F., GRAND C., BISPO A.

Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes.

Science of the Total Environment, 2006, vol. 363, n° 1-3, pp. 114-125.

HINFRAY N., PORCHER J.M., BRION F.

Inhibition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) P450 aromatase activities in brain and ovarian microsomes by various environmental substances.

Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology and Pharmacology, 2006, vol. 144, n° 3, pp. 252-262.

LAVILLE N., BALAGUER P., BRION F., HINFRAY N., CASELLAS C., PORCHER J.M., AIT-AISSA S.

Modulation of aromatase activity and mRNA by various selected pesticides in the human choriocarcinoma JEG-3 cell line.

Toxicology, 2006, vol. 228, pp. 98-108

TISSOT S., LAFON D.

Seuils de toxicité aiguë utilisés lors d'émissions atmosphériques accidentelles de produits chimiques.

Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 2006, vol. 67, pp. 870-876.

2007

JONSSON F., BOIS F.Y., MARSHALL S., JONSSON N.

The application of a Bayesian approach to the analysis of a complex, mechanistically based model.

Journal of Biopharmaceutical Statistics, 2007, vol. 17, n° 1, pp. 65-92.

CHIU W.A., MICALLEF S., MONSTER A.C., BOIS F.Y.

Toxicokinetics of inhaled trichloroethylene and tetrachloroethylene in humans at 1 ppm: empirical results and comparisons with previous studies.

Toxicological Sciences, 2007, vol. 95, n° 1, pp. 23-36.

PELLEGRINI E., MOURIEC K., ANGLADE I., MENUET A., LE PAGE Y., GUEGUEN M.M., MARMIGNON M.H., BRION F., PAKDEL F., KAH O.

Identification of aromatase-positive radial glial cells as progenitor cells in the ventricular layer of the forebrain in zebrafish.

Journal of Comparative Neurology, 2007, vol. 501, n° 1, pp. 150-167.

ABOU CHAKRA O.R., JOYEUX M., NERRIERE E., STRUB M.P., ZMIROU-NAVIER D.

Genotoxicity of organic extracts of urban airborne particulate matter: an assessment within a personal exposure study.

Chemosphere, 2007, vol. 66, n° 7, pp. 1375-1381.

SANCHEZ W., AIT-AISSA S., PALLUEL O., DITCHE J.M., PORCHER J.M.

Preliminary investigation of multi-biomarker responses in three-spined stickleback (*Gasterosteus aculeatus*) sampled in contaminated streams.

Ecotoxicology, 2007, vol. 16, n° 2, pp. 279-287.

BAULIG A., BLANCHET S., RUMELHARD M., LACROIX G., MARANO F., BAEZA-SQUIBAN A.

Fine urban atmospheric particulate matter modulates inflammatory gene and protein expression in human bronchial epithelial cells.

Frontiers in Bioscience, 2007, vol. 12, pp. 771-782.

BROCHOT C., SMITH T.J., BOIS F.Y.

Development of a physiologically based toxicokinetic model for butadiene and four major metabolites in humans: global sensitivity analysis for experimental design issues.

Chemico-Biological Interactions, 2007, vol. 167, pp. 168-183.

BAULIG A., PENELON T., PICHARD A., BOIS F.

Incertitude et seuils de toxicité aiguë en situation accidentelle.

Environnement Risques et Santé, 2007, vol. 6, n° 2, pp. 119-126.

ROUSSEL H., TEN-HAGE L., JOACHIM S., LE COHU R., GAUTHIER L., BONZOM J.M.

A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: primary producer community responses.

Aquatic Toxicology, 2007, vol. 81, pp. 168-182.

BARILLET S., ADAM C., PALLUEL O., DEVAUX A.

Bioaccumulation, oxidative stress, and neurotoxicity in *Danio rerio* exposed to different isotopic compositions of uranium.

Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, vol. 26, n° 3, pp. 497-505.

CHESHENKO K., BRION F., LE PAGE Y., HINFRAY N., PAKDEL F., KAH O., SEGNER H., EGGEN R.I.L.

Expression of zebrafish aromatase cyp19a and cyp19b genes in response to the ligands of estrogen receptor and aryl hydrocarbon receptor.

Toxicological Sciences, 2007, vol. 96, n° 2, pp. 255-267.

MICALLEF S., AMZAL B., BACH V., CHARDON K., TOURNEUX P., BOIS F.Y.

Sequential updating of a new dynamic pharmacokinetic model for caffeine in premature neonates.

Clinical Pharmacokinetics, 2007, vol. 46, n°1, pp. 59-74.

ROUSSEL H., TEN-HAGE L., JOACHIM S., LE COHU R., GAUTHIER L., BONZOM J.M.

A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: Individual and population responses of three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*).

Aquatic Toxicology, 2007, vol. 82, n° 4, pp. 272-280.

BARTON H.A., CHIU W.A., SETZER W., ANDERSEN M.E., BAILER A.J., BOIS F.Y., DE WOSKIN R.S., HAYS S., JOHANSON G., JONES N., LOIZOU G., MACPHAIL R.C., PORTIER C.J., SPENDIFF M., TAN Y.M.

Characterizing uncertainty and variability in physiologically-based pharmacokinetic (PBPK) models: state of the science and needs for research and implementation.

Toxicological Sciences, 2007, vol. 99, n° 2, pp. 395-402.

ROGERIEUX F., GODFRIN D., SENECHAL H., MOTTA A.C., MARLIERE M., PELTRE G., LA CROIX G.

Modifications of Phleum pratense grass pollen allergens following artificial exposure to gaseous air pollutants (O3, NO3, SO3).

International Archives of Allergy and Immunology, 2007, vol. 143, n° 2, pp. 127-134.

Risques technologiques et pollutions

2005

MANDIN C., KIRCHNER S.

Qualité de l'air dans les écoles, ventilation et santé.

Pollution Atmosphérique, 2005, n° 185, pp. 59-68.

DEBRAY B., SALVI O.

ARAMIS project: an integrated risk assessment methodology that answers the needs of various stakeholders.

BREBBIA C.A., BUCCIARELLI T., GARZIA F., GUARASCIO M. (Eds.). Safety and security engineering (SAFE 2005). Southampton: WIT press, 2005, pp. 265-275.

PLANAS E., ARNALDOS J., SILVETTI B., VALLEE A., CASAL J.
The assessment of risk in industrial installations: the risk severity index.
BREBBIA C.A., BUCCIARELLI T., GARZIA F., GUARASCIO M. (Eds.). Safety and security engineering (SAFE 2005). Southampton: WIT press, 2005, pp. 299-308.

TIXIER J., DANDRIEUX A., DUSSERRE G., BUBBICO R., LUCONE L.G., MAZZAROTTA B., HUBERT E., RODRIGUES N., SALVI O., GASTON D.
Vulnerability of the environment in the proximity of an industrial site.
BREBBIA C.A., BUCCIARELLI T., GARZIA F., GUARASCIO M. (Eds.). Safety and security engineering (SAFE 2005). Southampton: WIT press, 2005, pp. 309-318.

VAUTARD R., HONORE C., BEEKMANN M., ROUIL L.
Simulation of ozone during the august 2003 heat wave and emission control scenarios.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 16, pp. 2957-2967.

BOLVIN C., SALVI O.
Sharing experience on risk management to design future industrial systems: SHAPE-RISK, an European coordination action.
KOLOWROCKI K. (Ed.). Advances in safety and reliability: proceedings of the European safety and reliability conference, Tri City, poland, 27-30 June 2005. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005, pp. 237-241.

HALE A.R., GULDENMUND F.W., GOOSSENS L.H.J., KARCEWSKI J., DUIJM N.J., HOUTOLOU D., LE COZE J.C., PLOT E., PRATS F., KONTIC B., KONTIC D., GERBEC M.
Management influences on major hazard prevention: the ARAMIS audit.
KOLOWROCKI K. (Ed.). Advances in safety and reliability: proceedings of the European safety and reliability conference, Tri City, poland, 27-30 June 2005. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005, pp. 767-773.

BESSAGNET B., HODZIC A., BLANCHARD O., LATTUATI M., LE BIHAN O., MARFAING H., ROUIL L.
Origin of particulate matter pollution episodes in wintertime over the Paris basin.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 33, pp. 6159-6174.

BOUET R., DUPLANTIER S., SALVI O.
Ammonia large scale atmospheric dispersion experiments in industrial configurations.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, vol. 18, n° 4-6, pp. 512-519.

HODZIC A., VAUTARD R., BESSAGNET B., LATTUATI M., MORETO F.
Long-term urban aerosol simulation versus routine particulate matter observations.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 32, pp. 5851-5864.

LIOUSSE C., MICHEL C., BESSAGNET B., CACHIER H., ROSSET R.
O-D-modelling of carbonaceous aerosols over greater Paris focusing on the organic particle formation.
Journal of Atmospheric Chemistry, 2005, vol. 51, pp. 207-221.

DAUDONNET B., MOSNIER M., MERCIER F., WOZNICA K.
Numerical modeling of dynamic rupture in metallic systems.
SOIZE C., SCHUELLER G.I. (Eds.). Eurodyn 2005: proceedings of the 6th international conference on structural dynamics, 4-7 September 2005, Paris. Rotterdam: Millpress, 2005, pp. 1943-1948. [CD-ROM]

BIGOT J.P., TOUIL A., BONNET P., LACOME J.M.
Rain-out investigation: initial droplet size measurement.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, vol. 18, n° 4-6, pp. 433-442.

BOUVIER G., SETA N., VIGOUROUX-VILLARD A., BLANCHARD O., MOMAS I.
Insecticide urinary metabolites in nonoccupationally exposed populations.
Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 2005, vol. 8, n° 6, pp. 485-512.

LE COZE J.C.
Are organisations too complex to be integrated in technical risk assessment and current safety auditing?
Safety Science, 2005, vol. 43, n° 8, pp. 613-638.

BOUR O., BERGER S., COUTURIER C., RIQUIER L.
Determination of guidance values for closed landfill gas emissions.
Proceedings of the 10th international waste management and landfill symposium, 3-7 October 2005, Sardinia, Italy. [CD-ROM]

BOUR O., FAVEREUX K., SYLVAIN M.
Case study of sulphur compounds emissions characterization.
Proceedings of the 10th international waste management and landfill symposium, 3-7 October 2005, Sardinia, Italy. [CD-ROM]

MANDIN C., MAUPETIT F.
Émissions dans l'environnement intérieur par les produits de consommation et les matériaux.
Pollution Atmosphérique, 2005, n° 186, pp. 171-180.

QUIOT F., ROLLIN C., BOUR O., JORDANA S., RUIZ E., GUIMERA J., SCHWARTZ J., POIROT N., DAN A., GOBLET P.
Modeling of chlorinated solvents transport and natural attenuation in groundwater.
UHLMANN O., ANNOKKEE G.J., ARENDT F. (Eds.). Consoil 2005: proceedings of the 9th international FZK/TNO conference on soil-water systems, 3-7 October 2005, Bordeaux, France. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2005, pp. 403-410. [CD-ROM]

SALVI O., MERAD M., RODRIGUES N.
Toward an integrative approach of the industrial risk management process in France.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, vol. 18, n° 4-6, pp. 414-422.

HAZEBROUCK B., LEDRANS M.
Stakeholder participation in site assessment and management: a real case of Vincennes, France.
UHLMANN O., ANNOKKEE G.J., ARENDT F. (Eds.). Consoil 2005: proceedings of the 9th international FZK/TNO conference on soil-water systems, 3-7 October 2005, Bordeaux, France. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2005, pp. 48-55. [CD-ROM]

PROUST C.
The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions. The experience of EFFEX.
EUROPEAN SAFETY MANAGEMENT GROUP. Process safety and industrial explosion protection: proceedings of the international ESMG symposium 2005, 11-13 October 2005, Nürnberg, Germany. Hamm: ESMG, 2005.

SCHNEIDER H., PROUST C.
Laminar and turbulent burning velocities of dust clouds.
EUROPEAN SAFETY MANAGEMENT GROUP. Process safety and industrial explosion protection: proceedings of the international ESMG symposium 2005, 11-13 October 2005, Nürnberg, Germany. Hamm: ESMG, 2005.

HAWKSWORTH S., ROGERS R., BEYER M., PROUST C., LAKIC D., GUMMER J., RAVEAU D.
MECHEX - criteria for assessing the likelihood of ignition by mechanical sources.
EUROPEAN SAFETY MANAGEMENT GROUP. Process safety and industrial explosion protection: proceedings of the international ESMG symposium 2005, 11-13 October 2005, Nürnberg, Germany. Hamm: ESMG, 2005.

GOWLAND R., SALVI O., PIEDRA R., PODGORSKI D., SELMER-OLSEN S., COLOMBO S., GUEDES SOARES C., KATALAGARIANAKIS G., BOENKE A., JOVANOVIC A., KOIVISTO R., SHIBLI A., BAGNOLI F., OBERHAGUEMANN D., NOMEN R., GAINZA E.
European technology platform on industrial safety, an opportunity for a sustainable industry growth.
EUROPEAN SAFETY MANAGEMENT GROUP. Process safety and industrial explosion protection: proceedings of the international ESMG symposium 2005, 11-13 October 2005, Nürnberg, Germany. Hamm: ESMG, 2005.

DAUDONNET B., WOZNICA K., MERCIER F., KLOSOWSKI P.
Modeling of damage in a circular plate subjected to dynamic excitation.
Proceedings of the 8th Conference "Shell structures, theory and applications", 12-14 October 2005, Gdansk, Poland, pp. 457-461.

ACCORSI A.
Traitement des boues de STEP: maîtrise des risques explosion et incendie.
L'Eau, l'Industrie, les Nuisances, 2005, n° 287, pp. 43-46.

BOUVIER G., SETA N., BLANCHARD O., MOMAS I.
Contribution to the assessment of the exposure to indoor pesticides in France.
Pollution Atmosphérique, 2005, n° spécial décembre, pp. 81-85.

MANDIN C., KIRCHNER S., MAUPETIT F., ABADIE M., BEX V., DOR F., COLLIGNAN B., GINESTET A., BLONDEAU P.
Environnement intérieur, qualité de l'air et santé: quels sont les besoins et perspectives de recherche?
Pollution Atmosphérique, 2005, n° 188, pp. 453-466.

BADREDDINE R., DROUADAIN I., FRANCOIS D.
Évaluation de l'impact des PCDD/PCDF contenus dans les MIOM utilisés dans les structures routières
Les Techniques de l'Industrie Minière, 2005, n° 28, pp. 48-52.

2006

BOUVIER G., BLANCHARD O., MOMAS I., SETA N.
Pesticide exposure of non-occupationally exposed subjects compared to some occupational exposure: a French pilot study.
The Science of the Total Environment, 2006, vol. 366, n° 1, pp. 74-91.

BROHEZ S., MARLAIR G., DELVOSALLE C.
Fire calorimetry relying on the use of the fire propagation apparatus. Part I: early learning from the use in Europe.
Fire and Materials, 2006, vol. 30, pp. 131-149.

BROHEZ S., MARLAIR G., DELVOSALLE C.
Fire calorimetry relying on the use of the fire propagation apparatus. Part II: burning characteristics of selected chemical substances under fuel rich conditions.
Fire and Materials, 2006, vol. 30, pp. 35-50.

PROUST C.
Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, vol. 19, n° 1, pp. 89-100.

PROUST C.
A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, vol. 19, n° 2-3, pp. 104-120.

BONNARD R.
Common errors in the use of the CALTOX model to assess the human health risks linked to industrial emissions of pollutants.
Human and Ecological Risk Assessment, 2006, vol. 12, n° 5, pp. 1000-1010.

MOUKHTAR S., COURET C., ROUIL L., SIMON V.
Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) emissions from Abies alba in a French forest.
The Science of the Total Environment, 2006, vol. 354, pp. 232-245.

NGUYEN T.M.N., ILEF D., JARRAUD S., ROUIL L., CAMPESE C., CHE D., HAEGHEBAERT S., GANIAYRE F., MARCEL F., ETIENNE J., DESENCLOS J.C.
A community-wide outbreak of legionnaires disease linked to industrial cooling towers. How far can contaminated aerosols spread?
The Journal of Infectious Diseases, 2006, vol. 193, pp. 102-111.

CHAURAND P., ROSE J., DOMAS J., BOTTERO J.Y.
Speciation of Cr and V within BOF steel slag reused in road constructions.
Journal of Geochemical Exploration, 2006, vol. 88, pp. 10-14.

KLASMEIER J., MATTHIES M., MACLEOD M., FENNER K., SCHERINGER M., STROEBE M., LE GALL A.C., MCKONE T., VAN DE MEENT D., WANIA F.
Application of multimedia models for screening assessment of long-range transport potential and overall persistence.
Environmental Science & Technology, 2006, vol. 40, n° 1, pp. 53-60.

BAUDELET M., GUYON L., YU J., WOLF J.P., AMODEO T., FREJAFON E., LALOI P.
Spectral signature of native CN bonds for bacterium detection and identification using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy.
Applied Physics Letters, 2006, vol. 88, n° 6, art. n° 063901.

SALVI O., DEBRAY B.
A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive.
Journal of Hazardous Materials, 2006, vol. 130, n° 3, pp. 187-199.

DELVOSALLE C., FIEVEZ C., PIPART A., DEBRAY B.
ARAMIS project: a comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries.
Journal of Hazardous Materials, 2006, vol. 130, n° 3, pp. 200-219.

DE DIANOUS V., FIEVEZ C.
ARAMIS project: a more explicit demonstration of risk control through the use of bow-tie diagrams and the evaluation of safety barrier performance.
Journal of Hazardous Materials, 2006, vol. 130, n° 3, pp. 220-233.

PLANAS E., ARLALDOS J., SILVETTI B., VALLEE A., CASAL J.
A risk severity index for industrial plants and sites.
Journal of Hazardous Materials, 2006, vol. 130, n° 3, pp. 242-250.

TIXIER J., DANDRIEUX A., DUSSERRE G., BUBBICO R., MAZZAROTTA B., SILVETTI B., HUBERT E., RODRIGUES N., SALVI O.
Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an industrial site in the frame of ARAMIS European project.
Journal of Hazardous Materials, 2006, vol. 130, n° 3, pp. 251-264.

CHIVAS C., BERTRAND J.P., MALVAUX C., MARLAIR G., TACK K.
Smoke toxicity from combustion products based on polymers containing flame retardant additives.
Proceedings of the flame retardants 2006 conference, 14-15 February 2006, London, UK, pp. 59-69.

HODZIC A., BESSAGNET B., VAUTARD R.
A model evaluation of coarse-mode nitrate heterogeneous formation on dust particles.
Atmospheric Environment, 2006, vol. 40, n° 22, pp. 4158-4171.

BONNET P., LACOME J.M.
Experimental study of accidental industrial LPG releases.
Proceedings of the 40th Annual loss prevention symposium, 24-27 April 2006, Orlando, USA, pp. 453-462.

HAM J.M., MEULENBRUGGE J.J., VERSLOOT N.H.A., **DECHY N., LE COZE J.C., SALVI O.**

A comparison between the implementations of risk regulations in the Netherlands and France under the framework of the EC SEVESO II directive.

Proceedings of the 21st Annual CCPS international conference, 23-26 April 2006, Orlando, USA, pp. 147-164.

ALBINET A., LEZ-GARZIANDIA E., BUDZINSKI H., VILLENAVE E.

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, 2006, vol. 1121, n° 1, pp. 106-113.

GRUFFAZ F., SIGNORET J.P., CHARPENTIER D.

SIL rated protection relays meet IEC 61508 safety requirements without lowering process availability.

Automation Technology in Practice International, 2006, vol. 4, n° 1.

SALVI O., DEBRAY B.

ARAMIS: an integrated risk assessment methodology for SEVESO plants.

SENNI BURATTI S. (Ed.). Chemical engineering transactions, vol. 9: proceedings of CISAP-2 2nd international conference on safety and environment in process industry, 21-24 May 2006, Naples, Italy. Milano: AIDIC, 2006, pp. 421-426.

BAUDELET M., GUYON L., YU J., WOLF J.P., AMODEO T., FREJAFON E., LALOI P.

Femtosecond time-resolved laser-induced breakdown spectroscopy for detection and identification of bacteria: a comparison to the nanosecond regime.

Journal of Applied Physics, 2006, vol. 99, n° 8, art. n° 084701.

AMZAL B., BOIS F., PARENT E., ROBERT P.

Bayesian-optimal design via interacting particle systems.

Journal of the American Statistical Association, 2006, vol. 101, n° 474, pp. 773-785.

NOIVILLE C., BOIS F.Y., HUBERT P., LAHIDJI R., GRIMFELD A.

Opinion of the committee for prevention and precaution about the precautionary principle.

Journal of Risk Research, 2006, vol. 9, n° 4, pp. 287-296.

LE COZE J.C., SALVI O., GASTON D.

Complexity and multi (inter or trans)-disciplinary sciences: which job for engineers in risk management?

Journal of Risk Research, 2006, vol. 9, n° 5, pp. 569-582.

HODZIC A., VAUTARD R., CHAZETTE P., MENUT L., BESSAGNET B.

Aerosol chemical and optical properties over the Paris area within ESQUIF project.

Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, vol. 6, n° 11, pp. 3257-3280.

DUPONT L., ACCORSI A.

Explosion characteristics of synthesised biogas at various temperatures.

Journal of hazardous materials, 2006, vol. 136, n° 3, pp. 520-525.

VAUTARD R., SZOPA S., BEEKMANN M., MENUT L., HAUGLUSTAIN D.A., ROUIL L., ROEMER M.

Are decadal anthropogenic emission reductions in Europe consistent with surface ozone observations?

Geophysical Research Letters, 2006, vol. 33, n° 13, art. n° L13810.

ROSE J., BENARD A., EL MRABET S., MASIEN A., MOULIN I., BRIOIS V., OLIVI L., BOTTERO J.Y.

Evolution of iron speciation during hydration of C4 AF.

Waste Management, 2006, vol. 26, pp. 720-724.

ROUSSEAU A., GRUET P.

Application of IEC 62305-2 in France on various plants. Proposals for improvements.

Proceedings of the international conference of lightning protection, 18-22 September 2006, Kanazawa, Japan, pp. 1235-1239.

TREMOLIERES A., MERAD M., RODRIGUES N., PROPECK-ZIMMERMANN E., SAINT-GERAND T.

Stakes and vulnerabilities assessment in industrial risk: French context and perspectives offered by territorial approach.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 3, pp. 2041-2046.

DEBRAY B., RODRIGUES N., SALVI O.

Evolution of the risk assessment and land use planning rules around industrial SEVESO II sites in France: a parallel with the ARAMIS methodology.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 3, pp. 1973-1981.

SALVI O., GOWLAND R.

European technology platform on industrial safety (ETPIS), an opportunity for a sustainable European industry growth.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 2, pp. 1113-1120.

FONTAINE F., DEBRAY B., SALVI O.

Protection of hazardous installations: complementary safety and security approaches.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 3, pp. 2599-2607.

DECHY N., BOUISSOU C.

A risk comparison for global decision maker: an epidemiological study.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 2, pp. 1171-1179.

LANTERNIER B., CHARPENTIER D., LYONNET P.

Failure rate model for spring loaded relief valves.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 2, pp. 905-909.

LIM S., NEDELEC B.

Comparative study of databases on accidents involving dangerous goods in the storage and transport to improve a crossover learning from experience.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 3, pp. 2685-2689.

NEDELEC B., LE COZE J.C.

Harmonising methodologies for technological risk assessment.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 2, pp. 1089-1093.

TIXIER J., DANDRIEUX A., FONTAINE F., BOUET R., PASTOR E., PLANAS E.

Development of a risk knowledge platform dedicated to accident of dangerous goods transportation.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 1, pp. 117-122.

APRIN L., DANDRIEUX A., DUSSERRE G., CABIOC'H F., GOURIOU V., LEGRAND S., LE FLOCH S., LAZURE P., POUS S., MARCHAND M., JAMES A., DANIEL P.

CLARA: an integrated project to analyse and determine the consequences of a chemical spill on west French coast.

GUEDES SOARES C., ZIO E. (Eds.). Safety and reliability in managing risk: proceedings of the ESREL conference, 18-22 September 2006, Estoril, Portugal. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, vol. 3, pp. 2225-2231.

GORIAUX M., JOURDAIN B., TEMIME B., BESOMBES J.L., MARCHAND N., ALBINET A., LEZ-GARZIANDIA E., WORTHAM H.

Field comparison of particulate PAH measurements using a low-flow denuder device and conventional sampling systems.

Environmental Science & Technology, 2006, vol. 40, n° 20, pp. 6398-6404.

BADREDDINE R., DROUADAINE I.

Évaluation du transfert des composés organiques des MIOM utilisés en sous-couche routière dans des ouvrages de construction récente.

Déchets, Sciences & Techniques, 2006, n° 43, pp. 21-26.

MANDIN C., RAMALHO O., LE MOULLEC Y., LE BIHAN O., BONNEAU E., KIRCHNER S., GEHIN E.

Particules ultrafines dans les environnements intérieurs: état des connaissances et premiers travaux français.

Pollution Atmosphérique, 2006, n° 190, pp. 139-150.

BAUDELET M., YU J., BOSSU M., JOVELET J., WOLF J.P., AMODEO T., FREJAFON E., LALOI P.

Discrimination of microbiological samples using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy.

Applied Physics Letters, 2006, vol. 89, n° 16, art. n° 163903.

BOUVIER G., BLANCHARD O., MOMAS I., SETA N.

Environmental and biological monitoring of exposure to organophosphorus pesticides: Application to occupationally and non-occupationally exposed adult populations.

Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2006, vol. 16, n° 5, pp. 417-426.

DENYS S., ROLLIN C., GUILLOT F., BAROUDI H.

In-situ phytoremediation of PAHs contaminated soils following a bioremediation treatment.

Water Air and Soil Pollution: Focus, 2006, vol. 6, n° 3-4, pp. 299-315.

CICOLELLA A.

Glycol ethers: a ubiquitous family of toxic chemicals. A plea for REACH regulation.

Annals of the New York Academy of Sciences, 2006, vol. 1076, n° 1, pp. 784-789.

NGUYEN Q.B., MEBARKI A., MERCIER F., AMI SAASA R., REIMERINGER M.

The domino effect and integrated probabilistic approaches for risk analysis.

TOPPING B.H.V., MONTERO G., MONTENEGRO R. (Eds.). Proceedings of the 8th international conference on computational structures technology, 12-15 September, Las Palmas, Spain. Stirlingshire, Scotland: Civil-Comp Press, 2006.

VAUTARD R., VAN LOON M., SCHAAP M., BERGSTROM R., BESSAGNET B., BRANDT J., BUILTJES P. J. H., CHRISTENSEN J. H., CUVELIER C., GRAFF A., JONSON J. E., KROL M., LANGNER J., ROBERTS P., ROUIL L., STERN R., TARRASON L., THUNIS P., VIGNATI E., WHITE L., WIND P.

Is regional air quality model diversity representative of uncertainty for ozone simulation?

Geophysical Research Letters, 2006, vol. 33, n° 24, art. n° L24818.

LE GALL A.C.

Le devenir des POP dans l'environnement.

Pollution Atmosphérique, 2006, n° 191, pp. 287-290.

BLANCHARD O.

Exposition de la population générale aux pesticides présents dans l'environnement intérieur.

Pollution Atmosphérique, 2006, n° 191, pp. 291-292.

2007

DE WINDT L., BADREDDINE R.

Modelling of long-term dynamic leaching tests applied to solidified/stabilised waste.

Waste Management, 2007, vol. 27, n° 11, pp. 1638-1647.

DE WINDT L., BADREDDINE R., LAGNEAU V.

Long-term reactive transport modelling of stabilized/solidified waste: from dynamic leaching tests to disposal scenarios.

Journal of Hazardous Materials, 2007, vol. 139, n° 3, pp. 529-536.

GONZALEZ-FLESCA N., NERRIERE E., LECLERC E., LE MEUR S., MARFAING H., HAUTEMANIERE A., ZMIROU-NAVIER D.

Personal exposure of children and adults to airborne benzene in four French cities.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, n° 12, pp. 2549-2558.

CHAURAND P., ROSE J., BRIOIS V., OLIVI L., HAZEMANN J.L., PROUX O., DOMAS J., BOTTERO J.Y.

Environmental impacts of steel slag reused in road construction: a crystallographic and molecular (XANES) approach.

Journal of Hazardous Materials, 2007, vol. 139, n° 3, pp. 537-542.

VAUTARD R., BUILTJES P.H.J., THUNIS P., CUVELIER C., BEDOGNI M., BESSAGNET B., HONORE C., MOUSSIOPOULOS N., PIROVANO G., SCHAAP M., STERN R., TARRASON L., WIND P.

Evaluation and intercomparison of ozone and PM10 simulations by several chemistry transport models over four European cities within the CityDelta project.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, pp. 173-188.

THUNIS P., ROUIL L., CUVELIER C., STERN R., KERSCHBAUMER A., BESSAGNET B., SCHAAP M., BUILTJES P., TARRASON L., DOUROS J., MOUSSIOPOULOS N., PIROVANO G., BEDOGNI M.

Analysis of model responses to emission-reduction scenarios within the CityDelta project.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, pp. 208-220.

CUVELIER C., THUNIS P., VAUTARD R., AMANN M., BESSAGNET B., BEDOGNI M., BERKOWICZ R., BRANDT J., BROCHETON F., BUILTJES, CARNAVALE C., COPPALE A., DENBY B., DOUROS J., GRAF A., HELLMUTH O., HONORE C., HODZIC A., JONSON J., KERSCHBAUMER A., DE LEEUW F., MINGUZZI E., MOUSSIOPOULOS N., PERTOT C., PEUCH V.H., PIROVANO G., ROUIL L., SAUTER F., SCHAAP M., STERN R., TARRASON L., VIGNATI E., VOLTA M., WHITE L., WIND P., ZUBER A.

CityDelta: a model intercomparison study to explore the impact of emission reductions in European cities in 2010.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, pp. 189-207.

SALVI O., CHARIKANE E., GASTON D., KATALAGARIANAKIS G.

Les plates-formes technologiques comme instruments de structuration de la recherche: le cas de la sécurité industrielle.

Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2007, n° 45, pp. 39-45.

MERAD M.

La concertation: une nouvelle dimension dans la gestion d'un territoire à risque.

Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2007, n° 45, pp. 51-56.

DECHY N., GASTON D., SALVI O.

AZF: les leçons d'une catastrophe industrielle.

Responsabilité & Environnement - Annales des mines, 2007, n° 45, pp. 10-17.

MARLAIR G., ROTUREAU P., BREULET H., BROHEZ S.

Biofuels for transport in the 21st century: why fire safety is a real issue.

Proceedings of the 11th International conference on fire and material, 29-31 January 2007, San-Francisco, USA.

VAN LOON M., VAUTARD R., SCHAAP M., BERGSTROM R., BESSAGNET B., BRANDT J., BUILTJES P. J. H., CHRISTENSEN J. H., CUVELIER C., GRAFF A., JONSON J. E., KROL M., LANGNER J., ROBERTS P., ROUIL L., STERN R., TARRASON L., THUNIS P., VIGNATI E., WHITE L., WIND P.

Evaluation of long-term ozone simulations from seven regional air quality models and their ensemble.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, pp. 2083-2097.

PROUST C., LEPRETE E., DAUBECH J., SOCHET I.

The usefulness of phenomenological tools to simulate the consequences of dust explosions.

Proceedings of the 2007 AIChE spring national meeting, 3rd Global congress on process safety, 41st Loss prevention symposium, 22-27 April 2007, Houston, USA.

MEBARKI A., NGUYEN Q.B., MERCIER F., AMI SAADA R., MEFTAH F., REIMERINGER M.

A probabilistic model for the vulnerability of metal plates under the impact of cylindrical projectiles.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, vol. 20, n° 2, pp. 128-134.

AFELTRANGER B., BERGER E., PEINEL G., ROSE T., MLESNITA R.A.

IT for risk and emergency management: consolidating methodologies for user-centred design.

SWAYNE D.A., HREBICEK J. (Eds.). Proceedings of the 6th international symposium on environmental software systems, 22-25 May 2007, Prague, Czech Republic. *International Federation for Information Processing*, 2007, 10 p.

DEBRAY B., ABOU-ASSALI A., PRADAUD I., VAUDELIN J., LENNE D.

Knowledge management for industrial safety, generic resource platform combined with an ontology based approach.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

DEBRAY B., AFELTRANGER B., VINCENT G., COUTTO R.

Risk community profile: a tool to assess a variety of hazards on a territory

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

BIGOT J.P., VECHOT L., TESTA D., NOGUERA C., MINKO W., KAZMIERCZAK M., VICOT P.,

Runaway reaction. Development of a new experimental vent sizing tool for non tempered systems at the laboratory scale.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

VIGNES A., TRAORE M., PERRIN L., DUFAUD O., BOUILLARD J., THOMAS D.

Nano vs micro: estimation and modelling of the dust explosion sensitivity and severity.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

DUPLANTIER S., GOBEAU N.

Medium-scale experiments of fire warehouses.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

PATEJ S., DURUSSEL T.

Domino effects: thermal impact of jet fires on industrial pipes.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

DAUTUN C., TIXIER J., CHAPELAIN J., FONTAINE F., DUSSERRE G.

Crisis management: improvement of knowledge and development of a decision aid process.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

SALVI O., GOWLAND R.

European technology platform on industrial safety (ETPIS), a vision to gain safety for a sustainable industry growth.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

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.

LE COZE J.C., DECHY N.

The organisational side of major accidents and safety: perspectives on transforming knowledge into practices.

Proceedings of the 12th international symposium on loss prevention and safety promotion in the process industries, 22-24 May 2007, Edinburgh, Scotland.

GRUET P., ROUSSEAU A.

Évaluation des risques liés à la foudre selon la méthode proposée dans la norme NF EN 62305-2. Retour d'expérience et propositions d'amélioration.

Revue de l'Électricité et de l'Électronique, 2007, n° 6-7, pp. 29-34.

EDWARD L., LOURDEAUX D., LENNE D., BARTHES J.P., BURKHARDT J.M., CAMUS F., PLOT E., GUERRAND M.

V3S: a training and decision making tool for modelling safety interventions on SEVESO sites.

RICHIR S., KLINGER E. (Eds.). Proceedings of the 9th virtual reality international conference, 18-20 April 2007, Laval, France. *Laval: Presence & Innovation Lab.*, 2007, pp. 17-27.

ALBINET A., LEOZ-GARZIANDIA E., BUDZINSKI H., VILLENAVE E.

Sampling precautions for the measurement of nitrated polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air.

Atmospheric Environment, 2007, vol. 41, n° 23, pp. 4988-4994.

SCHNEIDER H., PROUST C.

Determination of turbulent burning velocities of dust air mixtures with the open tube method.

Journal of Loss Prevention in the Process Industries. [Accepté pour publication le 26/04/2007]

GALLEGOA E., MIGOYAA E., MARTIN-VALDEPEÑASA J.M., CRESPOA A., GARCIAA J., VENETSANOSB A., PAPANIKOLAIOUB E., KUMARC S., STUDERD E., DAGBA Y., JORDANF T., JAHNG W., HØISETH S., MAKAROV D., PIECHNAJ J.

An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel.

International Journal of Hydrogen Energy. [Accepté pour publication]

DEUST C., DESCOURRIERE S., DE DIANOUS V.

Probabilistic assessment of major accidents on a LPG depot: influence of the input database.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 2, pp. 1455-1460.

FOREST C., MICHE E., DE DIANOUS V., CHAUMETTE S.

Probabilistic assessment of potential major industrial accidents: estimating reliability of safety barriers.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 1, pp. 27-34.

MERAD M.

Societal expertise of major industrial risks: toward shared decisions?

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 1, pp. 593-601.

LE COZE J.C., LIM S., DECHY N.

Learning from near-misses and major hazard prevention: first results from a field study on Seveso plants.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 2, pp. 1319-1327.

LANTERNIER B., DRANGUET J.M.

Maintenance optimization of sensors for certification in compliance with the IEC 61511 standard.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 1, pp. 649-653.

DUFAUD O., TRAORE M., PERRIN L., CHAZELET S., THOMAS D., VIGNES A., BOUILLARD J.

Aluminium dusts explosions: does size matter?

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 2, pp. 2003-2009.

DUVAL C., LEGER A., WEBER P., LEVRAT E., IUNG B., FARRET R.

Choice of a risk analysis method for complex socio-technical systems.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 1, pp. 17-25.

BOLVIN C., FARRET R., SALVI O.

Convergence towards integrated risk management: results from the European SHAPE-RISK project and other initiatives.

AVEN T., VINNEM J.E. (Eds.). Risk, reliability and societal safety:

proceedings of the ESREL conference, 25-27 June 2007, Stavanger, Norway. *Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis*, 2007, vol. 2, pp. 1683-1687.

ALBINET A., LEOZ-GARZIANDIA E., BUDZINSKI H., VILLENAVE E.

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. [Accepté pour publication le 19/04/2007]

MALHERBE L., MANDIN C.

VOC emissions during outdoor ship painting and health risk assessment.

Atmospheric Environment. [Accepté pour publication le 05/02/2007]

GUILLAUME B., LIOUSSE C., ROSSET R., CACHIER H., VAN VELTHOVEN P., BESSAGNET B., POISSON N.

ORISAM-TM4: a new global sectional multi-component aerosol model including SOA formation - Focus on carbonaceous BC and OC aerosols.

Tellus B - Chemical and Physical Meteorology, 2007, vol. 59, n° 2, pp. 283-302.

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

2005

AMITRANO D., GRASSO J.R., SENFAUTE G.

Seismic precursory patterns before a cliff collapse and critical point phenomena.

Geophysical Research Letters, 2005, vol. 32, art. n° L08314.

ABBASS FAYAD A., AL HEIB M.

Une nouvelle méthode de prédiction de fontis grâce à une modélisation par poutres plastiques.

Revue Européenne de Génie Civil, 2005, vol. 9, n° 9-10, pp. 1067-1093.

CAPPA F., GUGLIELMI Y., GAFFET S., THORAVAL A., RUTQVIST J., TSANG C.F.

In situ characterization of a single fracture hydromechanical behavior from hydraulic pulse tests coupled to simultaneous pressure - normal displacement measurements.

KONECNY P. (Ed.). Eurock 2005, impact of human activity on the geological environment: proceedings of the International symposium of the International Society for Rock Mechanics, Brno, Czech Republic, 18-20 May 2005. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005, pp. 69-75.

LOPEZ P., BUZZI O., BOULON M., THORAVAL A., SOULEY M.

Improvement of hydro mechanical behavior knowledge of rock joint from laboratory tests and *in situ* experiments.

KONECNY P. (Ed.). Eurock 2005, impact of human activity on the geological environment: proceedings of the International symposium of the International Society for Rock Mechanics, Brno, Czech Republic, 18-20 May 2005. Leiden, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers, 2005, pp. 339-344.

DRIAD-LEBEAU L., LAHAIE F., AL HEIB M., JOSIEN J.P., BIGARRE P., NOIREL J.F.

Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district.

International Journal of Coal Geology, 2005, vol. 64, n° 1-2, pp. 66-78.

CHIJIMATSU M., NGUYEN T.S., JING L., DE JONGE J., KOHLMEIER M., MILLARD A., REJEB A., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y.
Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository - BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 1: conceptualization and characterization of the problems and summary of results.
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, vol. 42, n° 5-6, pp. 720-730.

MILLARD A., REJEB A., CHIJIMATSU M., JING L., DE JONGE J., KOHLMEIER M., NGUYEN T.S., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y.
Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository - BMT1 of the DECOVALEX III project. Part 2: effects of THM coupling in continuous and homogeneous rocks.
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, vol. 42, n° 5-6, pp. 731-744.

GUILLOUX A., COJEAN R., DORE M., FABRE D., GHOREYCHI M., KAZMIERCZAK J.B., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., PIGUET J.P., ROPERS F., SERRATRICE J.F., TISOT J.P., YOU T.
Note sur la définition des « sols indurés roches tendres » (SIRT).
Revue Française de Géotechnique, 2005, n° 111, pp. 59-66.

THORAVAL A., GATELIER N., YOU T.
De certains effets hydromécaniques lors des creusements et de l'exploitation de galeries de stockage en milieu fracturé.
Revue Française de Géotechnique, 2005, n° 113, pp. 41-51.

2006

ABDUL-WAHED M.K., AL HEIB M., SENFAUTE G.
Mining-induced seismicity: seismic measurement using multiplet approach and numerical modeling.
International Journal of Coal Geology, 2006, vol. 66, pp. 137-147.

KHOA H.D.V., GEORGOPOULOS I.O., DARVE F., LAOUAFA F.
Diffuse failure in geomaterials: experiments and modelling.
Computers and Geotechnics, 2006, vol. 33, n° 1, pp. 1-14.

LOPEZ P., RAHMANI I., BUZZI O., BOULON M., THORAVAL A., ESCUREDO-RODRIGUEZ M.
Void space against fracture hydro mechanical behavior at sample scale.
VAN COTTHEM A., CHARLIER R., THIMUS J.F., TSHIBANGU J.P. (Eds.). *Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 141-147.

FOUGERON J., HOMAND F., SOULEY M., BENNANI M., JOSIEN J.P.
Collapse/subsidence: evolution of the overburden massivity according to the geomorphology in the Lorraine iron mines case.
VAN COTTHEM A., CHARLIER R., THIMUS J.F., TSHIBANGU J.P. (Eds.). *Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 301-307.

GHOREYCHI M.
Coupled processes involved in post-mining.
VAN COTTHEM A., CHARLIER R., THIMUS J.F., TSHIBANGU J.P. (Eds.). *Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 45-53.

LAOUAFA F., GHOREYCHI M.
Salt pillar creep analysis.
VAN COTTHEM A., CHARLIER R., THIMUS J.F., TSHIBANGU J.P. (Eds.). *Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 381-388.

MERRIEN-SOUKATCHOFF V., SAUSSE J., DUNNER C.
Influence of topographic roughness on the stress state in a sloped rock-mass.
VAN COTTHEM A., CHARLIER R., THIMUS J.F., TSHIBANGU J.P. (Eds.). *Multiphysics coupling and long term behaviour in rock mechanics: proceedings of the international symposium Eurock 2006, 9-12 May 2006, Liege, Belgium*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 473-478.

LAGARDE J., ABRAHAM O., LAGUERRE L., COTE P., PIGUET J.P., BALLAND C., ARMAND G.
Use of surface waves and seismic refraction for the inspection of circular concrete structures.
Cement & Concrete Composites, 2006, vol. 28, n° 4, pp. 337-348.

DE GENNARO V., SORGI C.
Water retention properties of mine chalk.
MILLER G.A., ZAPATA C.E., HOUSTON L., FREDLUND D.G. (Eds.). *Unsaturated soils 2006: proceedings of the 4th international conference on unsaturated soils, 2-5 April 2006, Carefree, USA. Reston, USA: ASCE, 2006, vol. 2*.

CAPPA F., GUGLIELMI Y., RUTQVIST J., TSANG C.F., THORAVAL A.
Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze laboratory site, France.
International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, vol. 43, n° 7, pp. 1062-1082.

CAUDRON M., EMERIAULT F., KASTNER R., AL HEIB M.
Sinkhole and soil-structure interactions: development of an experimental model.
NG C.W.W., ZHANG L.M., WANG Y.H. (Eds.). *Physical modelling in geotechnics: 6th international conference, 4-6 August 2006, Hong Kong, China. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2006, pp. 1261-1267*.

CAUDRON M., EMERIAULT F., AL HEIB M.
Numerical modelling of the soil-structure interaction during sinkholes.
SCHWEIGER H.F. (Ed.). *Numerical methods in geotechnical engineering: proceedings of the 6th European conference, 6-8 September 2006, Graz, Austria*. London: Taylor and Francis, 2006, pp. 267-273.

MERRIEN-SOUKATCHOFF V., GUNZBURGER Y.
Models available to understand failure and pre-failure behaviour of large rock slope movements: the case of La Clapiere, Southern Alps, France.
EVANS S.G., SCARASCIA MUGNOZZA G., STROM A., HERMANN R.L. (Eds.). *Landslides from massive rock slope failure: Proceedings of the NATO advanced research workshop, Celano, Italy, 16-21 June 2002. Netherlands: Springer, 2006, pp. 111-127*.

REMOND F., BALLAND C., ARMANGUE A.
Développement des techniques de surveillance des mouvements de terrain induits par une exploitation souterraine: cas de la carrière de gypse de Grozon.
Tunnels et Ouvrages Souterrains, 2006, n° 197, pp. 305-310.

DIDIER C., LELOUP J.
The French experience of post mining management.
FOURIE A., TIBBETT M. (Eds.). *Proceedings of the 1st International seminar on mine closure, 13-15 September 2006, Perth, Australia. Nedlands, Australia: Australian Centre for Geomechanics, 2006, pp. 199-210*.

CAPPA F.
Role of fluids in the hydromechanical behavior of heterogeneous fractured rocks: *in situ* characterization and numerical modelling.
Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, vol. 65, n° 3, pp. 321-337.

DECK O., AL HEIB M., HOMAND F., WOJTKOWIAK F.
Synthèse des méthodes de prévision des conséquences des affaissements miniers sur le bâti. Application au cas du bassin ferrifère lorrain.
Les Techniques de l'Industrie Minérale, 2006, n° 29, pp. 86-104.

2007

KAZMIERCZAK J.B., LAOUAFA F., GHOREYCHI M., LEBON P., BARNICHON J.D.
Influence of creep on water pressure measured from borehole tests in the Meuse/Haute-Marne Callovo-Oxfordian argillites
Physics and Chemistry of the Earth, 2007, vol. 32, pp. 917-921.

KHOA H.D.V., PRUNIER F., DARVE F., LAOUAFA F.
Finite element analysis of two landslides with the second order work criterion.
PANDE G.N., PIETRUSZCZAK S. (Eds.). *Numerical models in geomechanics: proceedings of the 10th international symposium, 25-27 April 2007, Rhodes, Greece*. London: Taylor & Francis, 2007, pp. 551-557.

SOULEY M., ARMAND G., WILEVEAU Y.
Modelling of the hydromechanical response of a shaft sinking in a deep claystone.
PANDE G.N., PIETRUSZCZAK S. (Eds.). *Numerical models in geomechanics: proceedings of the 10th international symposium, 25-27 April 2007, Rhodes, Greece*. London: Taylor & Francis, 2007, pp. 269-275.

SENFAUTE G., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., CLEMENT C., LAOUAFA F., DUNNER C., PFEIFLE G., GUGLIELMI Y., LANCON H., MUDRY J., DARVE F., DONZE F., DURIEZ J., POUYA A., BEMANI P., GASC M., WASSERMANN J.
Impact of climate change on rock slope instability: monitoring and modelling.
MCINNES R., JAKEWAYS J., FAIRBANK H., MATHIE E. (Eds.). *Landslides and climate change: proceedings of the international conference, 21-24 May 2007, Isle of Wight, UK. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis, 2007, pp. 237-245*.

IDRIS J., VERDEL T., AL HEIB M.
Numerical modelling and mechanical behaviour analysis of ancient tunnel masonry structures.
Tunnelling and Underground Space Technology. [Accepté pour publication le 30/04/2007]

CAUDRON M., EMERIAULT F., AL HEIB M.
Modélisation numérique de l'interaction sol-structure lors du phénomène de fontis.
Revue Française de Géotechnique. [Accepté pour publication le 06/02/2007]

SORGI C., DE GENNARO V.
Analyse microstructurale au MEB environnemental d'une craie soumise à chargement hydrique et mécanique.
Comptes Rendus Geoscience. [Accepté pour publication le 15/06/2007]

SITES INTERNET

Vi@ Internet

Différents sites Internet et bases de données en ligne assurent la diffusion et le transfert des connaissances de l'INERIS. Voici une liste des principaux sites permettant d'accéder aux résultats des travaux scientifiques, rapports d'étude, et informations techniques couvrant la plupart des domaines d'intervention de l'INERIS.

Portail INERIS [www.ineris.fr]

- Outre des informations sur l'Institut et ses activités, on y trouve, entre autres, plus de 150 rapports d'études en consultation, des informations scientifiques et techniques de référence, un descriptif des programmes de recherche nationaux et internationaux en cours, une offre diversifiée de prestations et de formations.

Portail substances chimiques [<http://chimie.ineris.fr>]

- Base de données toxicologiques contenant des informations relatives aux effets sur la santé des substances chimiques et les relations dose-effet (plus de 900 substances).
- Base de données environnementales regroupant les propriétés physico-chimiques et écotoxicologiques des substances chimiques pour l'évaluation des risques environnementaux (plus de 700 substances).
- Seuils de toxicité aiguë en situation accidentelle.
- Fiches de données toxicologiques et environnementales utilisées pour l'évaluation des risques liés aux substances chimiques notamment dans le cadre des études d'impact des Installations classées pour la protection de l'environnement ou de l'étude des sols pollués (plus de 60 substances).

RSDE [<http://rsde.ineris.fr>]

- Outil de suivi de l'Action nationale de recherche et de réduction des rejets de substances dangereuses dans les eaux.
- Fiches de données technico-économiques d'évaluation des enjeux économiques liés à cette action.

Toxicologie expérimentale [<http://toxi.ineris.fr>]

- Présentation des axes de recherche et moyens de l'Unité « toxicologie expérimentale » de l'INERIS.
- Logiciels de calcul du devenir des toxiques dans le corps.

TRANSPOL [<http://transpol.ineris.fr>]

- Transfert des polluants dans les sols et les nappes.

Mesures économiques de lutte contre la pollution

[www.ineris.fr/aielcp/general/index_frame.htm]

- Fiches sur les expériences françaises et étrangères d'application de mesures non techniques au contrôle de la pollution.

PLQ2000 [www.plq2000.com]

- Standard de station d'acquisition de données au service de la gestion de l'eau.

AIDA [<http://aida.ineris.fr>]

- Suivi de la réglementation française et européenne relative aux ICPE.
- BREF: Meilleures Techniques Disponibles.

Viji [www.ineris.fr/viji]

- Veille juridique intégrée sur les risques industriels.

BADORIS [www.ineris.fr/badoris]

- Synthèses sur les dispositifs de sécurité mis en œuvre dans les Installations classées pour prévenir les risques ou limiter l'occurrence des accidents majeurs.

PRIMARISK [www.ineris.fr/primarisk]

- Plate-forme de ressources intégrées pour la maîtrise des risques majeurs.

COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

PREV'AIR [www.prevoir.org]

- Prévisions et cartographies de la qualité de l'air établies à partir de simulations numériques en France et en Europe pour trois types de polluants (ozone, oxydes d'azote et particules).

LCSQA [www.lcsqa.org]

- Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air.

GISOS [<http://gisos.ensg.inpl-nancy.fr>]

- Groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains.

RSEIN [<http://rsein.ineris.fr>]

- Recherche santé environnement intérieur.

BERPC [www.berpc.fr]

- Bureau d'évaluation des risques des produits et agents chimiques.

LAEGO [<http://laego.org>]

- Laboratoire environnement, géomécanique et ouvrages.

PROGRAMMES DE RECHERCHE EUROPÉENS PILOTÉS PAR L'INERIS

NORMAN [<http://norman.ineris.fr>]

- Network of reference laboratories for monitoring of emerging environmental pollutants.

SHAPE-RISK [<http://shaperisk.jrc.it>]

- Sharing experience on risk management to design future industrial systems.

2FUN [<http://www.2-fun.org>]

- Full-chain and uncertainty approaches for assessing health risks in future environmental scenarios.

COMITÉ DE PILOTAGE

Pierre Toulhoat

Directeur scientifique

Christian Tauziède

Directeur scientifique adjoint

Frédéric Bois

Délégué scientifique, Direction des Risques Chroniques

Bruno Debray

Délégué scientifique, Direction des Risques Accidentels

Christophe Didier

Délégué scientifique, Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Guy Marlair

Délégué scientifique, Direction de la Certification

Ginette Vastel

Directrice de la Communication

Estelle Richet

Responsable édition

LA RÉDACTION DE CE RAPPORT A BÉNÉFICIÉ DU CONCOURS DE :

Pascal Bigarré

Directeur délégué de la Direction des Risques du Sol
et du Sous-sol pour Nancy, responsable du CENARIS

Didier Gaston

Coordinateur du Projet CERTES

Emmanuel Lemazurier

Coordinateur du Projet ANIMEX

Olivier Salvi

Chargé de développements à l'international (EU-VRi, L-surF)

REMERCIEMENTS pour leurs témoignages à

Patrick Flammarion, Christian Delvosalle,

Jean-Louis Durville et Matthieu Caudron.

CRÉDITS PHOTOS/ILLUSTRATIONS

INERIS / General Electric / CETE-LRPC Rouen / BatScap.

Imprimé sur Symbol Freelifé sans chlore issu de forêts gérées durablement
et de papier recyclé.

