

DNA

1	H	
2	Li	Be
3	Na	Mg
4	K	Ca
5	Rb	Sr
6	Cs	Ba

CON

Rapport scientifique 2004 > 2005

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable*

**Rapport
scientifique
2004/2005**

4 Orientations scientifiques 6 Liste des membres du Conseil Scientifique

7 Indicateurs de recherche 2004

SOMMAIRE

8 Risques chroniques

10 • Introduction

12 • Qualité de l'air

13•PREV'AIR : prévision et cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe (Laurence ROUÏL, Cécile HONORÉ, Laure MALHERBE, Bertrand BESSAGNET) 16•Caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques (Émeric FRÉJAFON, Olivier LE BIHAN, Éva LEOZ, Sylvain GEFFROY, Alexandre ALBINET)

20 • Sites et sols pollués

21•Dynamique des éléments traces métalliques (Zn, Cd et Pb) sur un petit bassin versant contaminé par des déchets miniers : cas du bassin versant amont du Lez (Ariège, Pyrénées) (Rabia BADREDDINE, Célia BRUNEL)

24 • Effets des pollutions sur le vivant

25•Caractérisation du danger des substances à l'aide d'outils biologiques *in vitro* et *in vivo* et application à la biosurveillance de l'environnement aquatique (Sélim AÏT-AÏSSA, François BRION, Jean-Marc PORCHER) 28•Échauffement et champs radiofréquences des téléphones mobiles (Elmountacer Billah ELABBASSI, René de SEZE) 29•Toxicologie de la reproduction : la montée en puissance (Emmanuel LEMAZURIER) 33•La pollution atmosphérique modifie-t-elle le pouvoir allergisant du pollen de graminées ? (Ghislaine LACROIX, Françoise ROGERIEUX)

35 • Évaluation des risques et décision sanitaire

36•Modélisation des risques et décisions sanitaires (Frédéric Yves BOIS, Céline BROCHOT, Cheikh DIACK, Sandrine MICALLEF) 38•Projet européen ACUTEX (Annick PICHARD)

40 Risques accidentels

42 • Introduction

44 • Maîtrise des risques à la source grâce à la sécurité intrinsèque

44•SecutecH2 : prise en compte de la sécurité dans le développement des technologies de l'hydrogène (Lionel PERRETTE, Samira CHELHAOU)

46 • Maîtrise des risques à la source par une meilleure connaissance des phénomènes

47•Évaluation des conséquences d'un incendie d'entrepôt (Luc FOURNIER, Stéphane DUPLANTIER) 48•MECHEX : mise au point d'une méthode de prédiction du risque d'inflammation d'atmosphères explosibles par un frottement mécanique (Christophe PROUST) 51•Prédiction des effets dominos dans le cadre d'éclatements de capacités métalliques : résultats des essais et enseignements pour la maîtrise des risques (Frédéric MERCIER)

54 • La gouvernance des risques dans le processus de prévention des risques technologiques

55•Analyse du processus de décision en gestion préventive des risques (Myriam MERAD)

57 • Analyses d'accidents prenant en compte la composante organisationnelle

57•Apport de l'approche systémique et organisationnelle au retour d'expérience (Jean-Christophe LECOZE, Samantha LIM) 59•Investigation de l'accident de Billy-Berclau (Jean-Christophe LECOZE, Samantha LIM)

61 • Maîtrise des risques

61•Bases de données de fiabilité des dispositifs de sécurité (Dominique CHARPENTIER, Brice LANTERNIER)

63 • Dangers liés aux produits

63•Évaluation des matières dangereuses à l'aide du calorimètre de Tewarson (Guy MARLAIR) 66•Dangers du nitrate d'ammonium et des artifices de divertissement : des accidents récents qui justifient un examen approfondi du rôle joué par les scénarios d'incendie (Guy MARLAIR, Marie-Astrid KORDEK, Ruddy BRANKA) 68•Les produits chlorés utilisés pour le traitement de l'eau en piscine : une famille de produits aux dangers méconnus (Marie-Astrid KORDEK)

70 Risques du sol et sous-sol

72 • Introduction

74 • Risques naturels « mouvements de terrain »

74•Cas des versants rocheux (Gloria SENFAUTE, Yann GUNZBURGER, Alain THORAVALE) 76•Les cavités souterraines (Christophe DIDIER, Jean-Marc WATELET, Jean-Jacques TRITSCH) 78•Le vieillissement des massifs rocheux (Claudia SORGI, Christophe AUVRAY)

79 • Risques liés à l'après-mine

79•Le recours à des expérimentations *in situ* (Gloria SENFAUTE, Xavier DAUPLY, Cyrille BALLAND) 81•Le développement d'outils de diagnostic (Farid LAOUAFA, Mountaka SOULEY) 82•Le risque d'émission de gaz de mine, de feux souterrains ou de feux de terrils (Zbigniew POKRYSZKA) 83•La cartographie des aléas miniers (Christophe DIDIER, Laurent CAUVIN, Xavier DAUPLY)

84 • Stockage en souterrain

84•La séquestration souterraine de gaz à effet de serre (Katia BESNARD, Zbigniew POKRYSZKA, Jean-Marc BRIGNON) 85•Expérimentations dans les laboratoires souterrains de stockage (Pascal BIGARRÉ, Franz LAHAIE, Cyrille BALLAND)

87 • Surveillance des risques du sol et du sous-sol

87•Surveillance et auscultation d'un secteur sous-miné (Lynda DRIAD, Pascal BIGARRÉ)

Quelle place pour la recherche à l'INERIS ?

Ulrich Beck, philosophe de la mouvance « post moderne », est l'auteur bien connu de « La Société du Risque »¹, ouvrage dans lequel il analyse l'évolution de la société moderne qui deviendrait « réflexive », c'est-à-dire qu'elle devient à la fois un problème et une solution pour elle-même. Il affirme sans ambages dans un autre ouvrage² : « La leçon de la Société du Risque est donc celle-ci : la politique et la morale l'emportent – doivent l'emporter ! – sur le raisonnement scientifique. » Il analyse également la dilution des responsabilités dans un monde incertain. Parallèlement, le principe de précaution a fait son chemin et est désormais inscrit dans la constitution. Il en résulte que les chercheurs sont souvent mis en demeure d'apporter des réponses et des solutions. Pour autant, celles-ci sont parfois remises en question, notamment parce que la perception des risques, le poids relatif des incertitudes sont éminemment subjectifs. Ces réflexions, ainsi que celles qui accompagnent la notion de développement durable, soulignent l'intérêt d'une négociation, non seulement autour de la maîtrise des risques, mais aussi de la notion de risque elle-même. Cette négociation doit se conduire au sein de forums dits « hybrides », ou chaque partie prenante peut exprimer son point de vue et sa part « d'expertise ». La voie semble donc bien étroite pour le scientifique ! Cette évolution sociétale oblige le chercheur à se poser les bonnes questions et à savoir formuler les réponses qu'il obtient tout au long de son travail

Quelques axes stratégiques pour la recherche

En cette période de renégociation du contrat d'objectifs de l'INERIS, pour la période 2006-2010, diverses pistes de réflexion stratégiques et prospectives ont été avancées avec le ministère de l'Écologie et du Développement durable : changement climatique et ses conséquences ; amélioration de la compréhension des impacts des pollutions et accidents ; conséquences sanitaires, conséquences sur la biodiversité et effets en retour ; développement de nouvelles technologies minimisant les risques et permettant de faire face aux enjeux du développement durable, minimisation des risques associés aux nouvelles technologies.

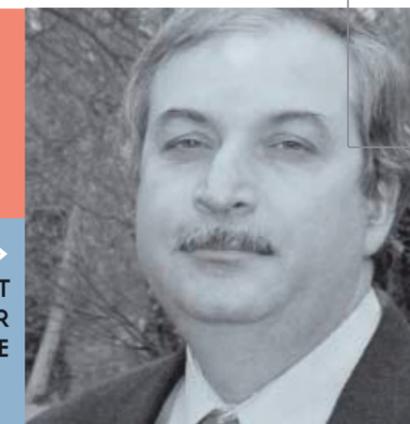
de manière à ce qu'elles puissent être comprises et donc partagées, non seulement par les pouvoirs publics, mais aussi par le monde économique et industriel, et enfin par le public. Ce cheminement, de la question opérationnelle ou sociétale, formulée par l'une ou l'autre des parties prenantes au débat sur le risque, jusqu'au partage d'éléments de réponse, assorties de marges d'incertitude est un défi que l'INERIS se doit de relever. La recherche finalisée menée à l'INERIS parcourt donc ce chemin – pas toujours rectiligne d'ailleurs – en transformant les questions opérationnelles en questions scientifiques, en y apportant des réponses scientifiques, qui doivent être à leur tour transcrites en réponses opérationnelles, permettant de contribuer à alimenter les débats menant au processus de décision.

L'expertise se nourrit de la recherche

Parmi les missions de l'INERIS, l'appui à la décision publique en matière de gestion et de maîtrise des risques est certainement la plus lisible. Cet appui repose sur une expertise qui se construit à partir de la recherche, mais bénéficie également du retour d'expérience. Dans des situations de crise, ou d'urgence économique ou politique, l'organisme expert est amené à délivrer son message dans les plus brefs délais, à partir de ce qu'il possède comme connaissances « sur étagère ». Il vide ainsi son étagère en apportant les réponses aux questions qui lui sont posées, il doit donc veiller à la regarnir de nouvelles connaissances, en anticipant les questions qui lui



GEORGES LABROY
DIRECTEUR GÉNÉRAL



PIERRE TOULHOAT
DIRECTEUR SCIENTIFIQUE

seront posées, à plus ou moins longue échéance. Il doit aussi évacuer les connaissances périmées de l'étagère, c'est-à-dire celles qui ne sont plus au meilleur de l'état de l'art. Une activité de recherche est donc absolument vitale pour un organisme d'expertise, car c'est ce qui permet de « regarnir les étagères ». La production des connaissances peut être, dans certains cas, externe à l'organisme, mais l'expert doit alors faire preuve de sa capacité à juger de la pertinence des travaux dont il se sert, ce qui n'est pas facile. Quand il est lui-même à la source de la production des connaissances, la meilleure garantie de qualité est l'évaluation par les pairs de ses travaux.

Garantir la qualité des recherches

La recherche menée grâce au financement issu du Budget Civil de Recherche-Développement attribué à l'INERIS - représentant 7 % de ses ressources - se place dans ce contexte. La qualité de la production scientifique et technique ainsi que les équipes elle-mêmes sont évaluées par les trois Commissions Scientifiques spécialisées, tandis que le Conseil Scientifique s'implique dans l'analyse et l'évaluation de la stratégie de l'Institut en matière de recherche et d'expertise. Les indicateurs de la production scientifique de l'INERIS sont en progression constante : publications dans des revues à comité de lecture, nombre de thèses soutenues, participation à des manifestations scientifiques. Les succès remarquables remportés par l'INERIS dans le 5^e Programme Cadre de l'Union Européenne et maintenant le

6^e témoignent de l'engagement et de l'efficacité des personnels de l'INERIS. Pour accompagner ces efforts, pour capitaliser les compétences et connaissances, l'INERIS s'est résolument engagé dans l'utilisation des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication. Le service de documentation, rattaché à la Direction Scientifique, est le maître d'œuvre de cette évolution, actée par sa transformation en CIVS, « Management des Connaissances, Information Scientifique et Technique, Veille Stratégique ».

Les résultats marquants de l'INERIS

Ce rapport scientifique présente les résultats les plus marquants obtenus en 2004 et 2005. La variété des sujets abordés et la diversité des angles de vues pourraient laisser penser à une grande dispersion des efforts, mais, pour chaque typologie de risque, les textes introductifs rappellent

les grands défis scientifiques posés aux chercheurs de l'INERIS. Leur singulière complexité souligne la nécessité d'une approche pluridisciplinaire, de l'écotoxicologie à la sociologie, de la mécanique des structures à la dynamique des fluides, des mathématiques appliquées à la chimie analytique, etc. Enfin, il est important de souligner, pour revenir à la nécessité absolue du partage des fruits de la recherche, que l'INERIS peut s'enorgueillir d'avoir contribué à produire PREV'AIR, un outil, accessible à chaque citoyen, lui permettant en permanence d'avoir accès à la répartition de polluants atmosphériques comme l'ozone, à leur évolution prévisible à un ou deux jours, assortie des zones de vigilance ou d'alerte particulières, notamment en période de canicule.

1) Risiko Gesellschaft, Suhrkamp, 1986
2) The Politics of Risk Society, J. Franklin ed., Polity Press-IPPR, 1998

Une expertise à l'échelle planétaire

L'INERIS, traditionnellement mieux placé sur des problématiques locales, doit s'attaquer aussi progressivement à des problématiques transfrontalières, puis planétaires, qui auront tendance à rattraper, puis supplanter les problématiques locales. Ces pistes de réflexion s'ajoutent aux axes stratégiques qui structurent les programmes actuellement en développement à l'INERIS : Santé-environnement ; Santé-travail ; Règlement REACH : Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals ; Sécurité des installations ; Transposition de la Directive Cadre Eau ; Risques et gestion du territoire : les Plans de Prévention des Risques : technologiques, miniers et naturels, programmes régionaux santé-environnement.

Liste des membres DU CONSEIL SCIENTIFIQUE

(au 1^{er} janvier 2005)

RENÉ AMALBERTI

Président du Conseil Scientifique
Docteur en Médecine et Psychologie Cognitive
Chef du Département de Recherche en
Sciences Cognitives
Institut de Médecine Aéronautique du Service
de Santé des Armées (IMASSA)

JEAN-LUC WYBO

Vice-Président du Conseil Scientifique
Maître de recherches
Directeur du Pôle Cindyniques
École des Mines de Paris

JEAN-CLAUDE ANDRÉ

Directeur Scientifique
INRS

GEORGES BONNIER

Directeur Adjoint du BNM-INM
Conseiller du Directeur du BNM
BNM-Institut National de Métrologie
CNAM

CHRISTIAN ELICHEGARAY

Chef du Département Air
ADEME

CHRISTIAN FOUILLAC

Directeur de la Recherche
BRGM

ISABELLE GIRI

Directeur des Laboratoires Internationaux de
Recherche

MICHEL GOUSAILLES

Directeur de la Recherche et du
Développement
SIAAP

ANDRÉ GROSMAITRE

Directeur Hygiène Sécurité Environnement –
Développement Durable
TOTAL DG CHIMIE

MICHEL JOUAN

(À titre personnel)

PIERRE JOULAIN

Directeur Adjoint
Laboratoire de Combustion et Détonique
ENSMA

GILLES KIMMERLIN

Conseiller Scientifique
GAZ DE FRANCE

JOSEPH LEWI

Directeur de l'Évaluation Scientifique et
Technique et de la Qualité
IRSN

JEAN-PIERRE LIBERT

Professeur à la Faculté de Médecine
Directeur de l'Unité de Recherches
sur les Adaptations Physiologiques et
Comportementales
Université de Picardie Jules Verne

DOMINIQUE LISON

Professeur
Responsable de l'Unité de Toxicologie
Industrielle et de Médecine du Travail
Université Catholique de Louvain (B)

HANS PASMAN

Membre du Conseil Gouvernemental
Néerlandais pour les Substances Dangereuses
(NL)

OTTO RENTZ

Directeur de l'AEETC (Asia-Europe
Environmental Technology Center),
Pathumthani/ Thaïlande
Professeur à l'Université de Karlsruhe
Directeur de l'Institut
de Production Industrielle
Directeur de l'Institut Franco-Allemand
de Recherche sur l'Environnement (D)

NIGEL RILEY

Health & Safety Executive (UK)

CLAUDINE SCHMIDT LAINÉ

Directeur de Recherche CNRS (DR 1)
Directeur Scientifique du CEMAGREF

HENRI VIELLARD

Université de Marne-la-Vallée
Institut Francilien d'Ingénierie des Services
ENSMA

DENIS ZMIROU

Directeur Scientifique
AFSSE

INVITÉS PERMANENTS

ALAIN DESROCHES

Président de la Commission Scientifique
Risques Accidentels
Expert, Chargé de mission « Gestion
des risques et retour d'expérience »
Inspection Générale et Qualité
CNES

PHILIPPE GARRIGUES

Président de la Commission Scientifique
Risques Chroniques
Directeur de Recherche CNRS
Directeur du Laboratoire de Physico-Toxico-
Chimie des Systèmes Naturels
Université de Bordeaux 1
CNRS

JEAN-PIERRE MAGNAN

Président de la Commission Scientifique
Risques du Sol et du Sous-Sol
Directeur Technique (géotechnique)
Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées

Indicateurs DE RECHERCHE 2004

L'INERIS développe une grande diversité d'expertises au service des pouvoirs publics, des acteurs économiques, de la communauté scientifique et du public. Chaque domaine d'expertise est maintenu au plus haut niveau de qualité grâce à un effort de recherche permanent tant au niveau national qu'europpéen. Cette exigence stratégique pour l'INERIS requiert le renforcement des partenariats pour garantir une innovation durable.

◉ NOMBRE DE PROGRAMMES BCRD EN COURS ¹	43
◉ NOMBRE D'AUTRES PROGRAMMES OU TRAVAUX EN COURS ¹	6
◉ NOMBRE DE PROGRAMMES EUROPÉENS EN COURS ¹	27
◉ TAUX DE RÉUSSITE AU 6 ^E PCRDT (EN %) ²	40

◉ NOMBRE DE PARTENARIATS DE RECHERCHE FRANÇAIS ¹	60
◉ NOMBRE DE PARTENARIATS DE RECHERCHE ÉTRANGERS ¹	51

◉ NOMBRE DE PARTICIPATIONS À DES ASSOCIATIONS SCIENTIFIQUES ¹	64
◉ DONT INTERNATIONALES ¹	21

◉ NOMBRE DE DOCTORANTS, ENCADRÉS ET FINANCÉS PAR L'INERIS, AYANT CONTRIBUÉ AUX TRAVAUX DE RECHERCHE DE L'INSTITUT ¹	51
◉ THÈSES SOUTENUES ²	10

◉ PUBLICATIONS DANS DES REVUES À COMITÉ DE LECTURE ²	53
◉ DONT LES REVUES À COMITÉ DE LECTURE CLASSÉES À L'ISI ²	29
◉ COMMUNICATIONS ET POSTERS DANS DES CONGRÈS ET COLLOQUES ²	164

1) Au 31/12/2004

2) En 2004

Liste des membres de la Commission Scientifique RISQUES CHRONIQUES

(au 1^{er} janvier 2005)

PHILIPPE GARRIGUES

Président de la Commission Scientifique
Risques Chroniques
Directeur de Recherche CNRS
Directeur du Laboratoire de
Physico-Toxico-Chimie des Systèmes Naturels
Université de Bordeaux 1
CNRS

JEAN-MARIE MUR

Vice-Président de la Commission Scientifique
Risques Chroniques
Directeur de l'Unité 420 de l'INSERM
Adjoint au Directeur Scientifique
INRS

MARC BABUT

Responsable de l'Unité de Recherche Biologie
des Écosystèmes Aquatiques
CEMAGREF

KRISTIN BECKER VAN SLOOTEN

Laboratoire de Chimie Environnementale et
Écotoxicologie (CECOTOX)
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH)

CHRISTIAN BLAISE

Responsable de l'Unité de Toxicologie
Aquatique
Section Recherche
sur les Écosystèmes Fluviaux
Centre Saint-Laurent
Environnement Canada - Région du
Québec (CA)

JEAN-CHARLES BOUTONNET

Direction Sécurité/Environnement/Produit
Département Toxicologie et Environnement
ARKEMA

FRANÇOIS GALGANI

Laboratoire Environnement-Ressources
IFREMER

PHILIPPE GLORENNEC

Département Évaluation et Gestion des
Risques liés à l'Environnement
et au Système de Soins
École Nationale de la Santé Publique

MICHEL GUILLEMIN

Professeur à l'Université de Lausanne
Directeur de l'Institut Universitaire Romand
de Santé au Travail (CH)

CLAUDE LESNÉ

Département de Santé Publique
Faculté de Médecine - Université Rennes 1

PATRICK LÉVY

UIC

HANS LUNDBERG

International Director
IVL Swedish Environmental Research
Institute Ltd (SE)

PIERRE MOSZKOWICZ

Directeur du Laboratoire d'Analyse
Environnementale des Procédés
et des Systèmes (LAEPSI)
INSA

PAULE VASSEUR

Professeur de Toxicologie
CNRS FRE 2636
Université de Metz (UFR Sci F.A.)

ROBERT VAUTARD

Laboratoire de Météorologie Dynamique
École Polytechnique

RISQUES CHRONIQUES

10 Introduction

12

Qualité de l'air

- 13 PREV'AIR : prévision et cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe (Laurence ROUIL, Cécile HONORÉ, Laure MALHERBE, Bertrand BESSAGNET)
- 16 Caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques (Émeric FRÉJAFON, Olivier LE BIHAN, Éva LEOZ, Sylvain GEFFROY, Alexandre ALBINET)

20

Sites et sols pollués

- 21 Dynamique des éléments traces métalliques (Zn, Cd et Pb) sur un petit bassin versant contaminé par des déchets miniers : cas du bassin versant amont du Lez (Ariège, Pyrénées) (Rabia BADREDDINE, Célia BRUNEL)

24

Effets des pollutions sur le vivant

- 25 Caractérisation du danger des substances à l'aide d'outils biologiques *in vitro* et *in vivo* et application à la biosurveillance de l'environnement aquatique (Sélim AÏT-AÏSSA, François BRION, Jean-Marc PORCHER)
- 28 Échauffement et champs radiofréquences des téléphones mobiles (Elmountacer Billah ELABBASSI, René de SEZE)
- 29 Toxicologie de la reproduction : la montée en puissance (Emmanuel LEMAZURIER)
- 33 La pollution atmosphérique modifie-t-elle le pouvoir allergisant du pollen de graminées ? (Ghislaine LACROIX, Françoise ROGERIEUX)

35

Évaluation des risques et décision sanitaire

- 36 Modélisation des risques et décisions sanitaires (Frédéric Yves BOIS, Céline BROCHOT, Cheikh DIACK, Sandrine MICALLEF)
- 38 Projet européen ACUTEX (Annick PICHARD)

Quatre défis scientifiques

D

ans le domaine des risques chroniques, les principales missions de l'INERIS sont l'évaluation de l'impact à long terme des substances chimiques sur les espèces vivantes, les transferts de substances entre milieux, les outils d'évaluation des risques ainsi que la caractérisation des expositions. Dans ces domaines, l'INERIS a établi de nombreuses collaborations avec des équipes universitaires et des établissements publics de recherche nationaux et européens.



Laboratoire de chromatographie.

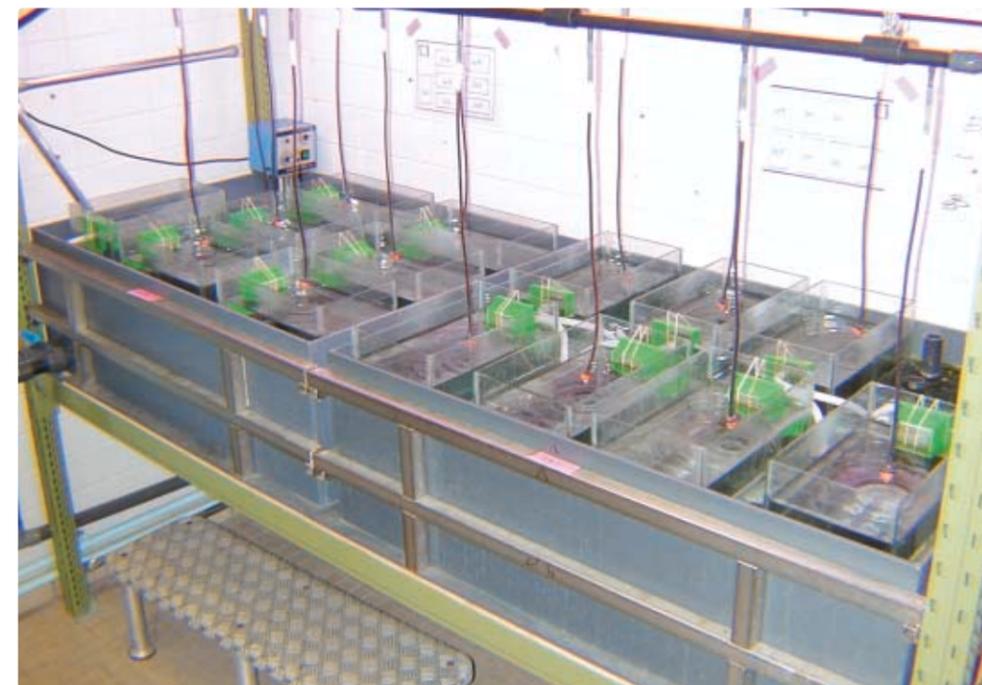
Les actions de recherche menées à la Direction des Risques Chroniques sont orientées selon quatre axes principaux :

④ Comprendre les effets sur la santé et l'environnement. Il s'agit de confirmer la causalité pour trois risques émergents : les perturbateurs endocriniens, les particules ultrafines, les champs électromagnétiques. Sur le plan des méthodes statistiques et mathématiques, l'INERIS travaille sur la prédiction quantitative de l'accumulation (pharmacocinétique) et des effets (pharmacodynamie) des substances chimiques. Dans le champ expérimental, les outils sont ceux de la biochimie moléculaire et de la génomique, permettant d'identifier des biomarqueurs sensibles et spécifiques des effets étudiés.

④ Expliquer et prédire le transport des contaminants dans l'environnement. Le but est ici de développer et valider des codes de calcul pour la prévision des transferts atmosphériques, de l'échelle locale jusqu'à celle du continent ; d'évaluer le confinement des déchets, et les sites pollués. Le lien est bien sûr fait avec la mesure, pour faire "vivre" les modèles et les adapter avec l'expérience.

④ Maîtriser la mesure. Comment développer la métrologie des substances émergentes, dans des matrices complexes à des niveaux de traces ? Ceci passe par la détermination des meilleures technologies pour la mesure (nature, répartition spatiale) des contaminants atmosphériques (gaz, particules...) et des dispositifs d'essais permettant d'assurer la qualité, la reproductibilité et la représentativité des mesures.

④ Évaluer et maîtriser les effets des pollutions sur la santé humaine et les écosystèmes. Le dernier volet des travaux s'attache à associer au mieux la



Salle d'élevage de poissons zèbres.

caractérisation des dangers, la détermination des voies de transfert et d'exposition, et la métrologie pour une évaluation plus robuste et quantifiée des risques et des coûts associés.

Les travaux scientifiques de la Direction présentés ci-après illustrent les activités dont les résultats sont concentrés sur la période 2004-2005.

Les cadres et les structures : PNSE, REACH, ANR

Un élément important du cadre d'action nationale de l'INERIS est bien sûr le récent Plan National Santé Environnement (PNSE). Au niveau européen, c'est le règlement REACH qui oriente l'action de recherche de l'INERIS vers l'identification des dangers et la prévention des risques liés aux substances chimiques.

Enfin, pour la recherche française, un événement majeur de l'année 2005, et qui aura des répercussions sur la stratégie de l'INERIS dans ce domaine, est la création de l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) dont les appels à proposition vont aider à structurer la recherche française. ●

L'INERIS A ÉTABLI DE NOMBREUSES COLLABORATIONS AVEC DES ÉQUIPES UNIVERSITAIRES ET DES ÉTABLISSEMENTS PUBLICS DE RECHERCHE NATIONAUX ET EUROPÉENS.

Qualité de l'air



INERIS est très présent dans le domaine de la qualité de l'air. Ses activités se développent aussi bien autour de la métrologie que de la modélisation. Il est, en particulier, membre du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA).

En matière de métrologie, l'INERIS constitue une référence pour l'évaluation des appareils de mesure en continu des polluants gazeux atmosphériques, qu'ils soient à prélèvement ponctuel ou intégrateurs sur de longues distances tels que le DOAS (1) ou le LIDAR (2).

Pour des polluants qui ne peuvent faire l'objet de mesures en continu, l'INERIS développe et valide des méthodes adaptées et les propose aux instances de normalisation. L'intérêt de l'INERIS se porte aussi bien sur les polluants réglementés ou en voie de l'être, que sur des polluants non réglementés éventuellement préoccupants, comme les pesticides. Soucieux de répondre aux attentes réglementaires, sanitaires et environnementales actuelles et futures, l'INERIS développe largement son expérience autour de la caractérisation physico-chimique des polluants particuliers. L'approfondissement des connaissances dans ce domaine s'impose à l'INERIS par des

travaux permettant une meilleure compréhension de l'évolution dans le temps et dans l'espace des particules, en considérant des paramètres tels que la nature des composés et leur distribution en taille. La modélisation des aérosols fait aussi l'objet de développements importants à l'INERIS. Ces travaux sont réalisés en collaboration avec le CNRS/IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace). En réponse au problème des particules atmosphériques, riche en challenges techniques, l'Institut met en œuvre de réelles synergies entre la métrologie et la modélisation afin de mieux garantir la qualité et la fiabilité de ses résultats de recherche.

Depuis 2003, le système national de prévision et de cartographie de la qualité de l'air, PREV'AIR, fournit quotidiennement des informations relatives aux concentrations de trois polluants atmosphériques déterminants : l'ozone, les oxydes d'azote et les particules. Une convention de partenariat a été signée, en 2004, entre l'INERIS et le ministère de l'Écologie et du Développement durable, l'Institut Pierre-Simon Laplace, l'ADEME et Météo France. Elle formalise les collaborations techniques mises en place autour de la plate-forme PREV'AIR afin d'en assurer le développement et la pérennisation.

L'INERIS est enfin un acteur important de la qualité de l'air au niveau européen, intervenant dans le contexte normatif, comme dans les négociations ayant trait au contrôle de la pollution atmosphérique transfrontière. Sa mission relève alors aussi bien de l'expertise technique que de l'analyse économique des méthodes de réduction de la pollution, en passant par l'évaluation des impacts environnementaux et sanitaires. L'INERIS fait ainsi partie de différents groupes d'experts intervenant auprès de la Commission Européenne (DG Environnement) et de la Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies. ●

(1) Differential Optical Absorption Spectrometry
(2) Light Detection and Ranging

L'INSTITUT MET EN ŒUVRE DE RÉELLES SYNERGIES ENTRE LA MÉTROLOGIE ET LA MODÉLISATION AFIN DE MIEUX GARANTIR LA QUALITÉ ET LA FIABILITÉ DE SES RÉSULTATS DE RECHERCHE.

PREV'AIR : prévision et cartographie de la qualité de l'air en France et en Europe

LAURENCE ROUÏL, CÉCILE HONORÉ,
LAURE MALHERBE, BERTRAND BESSAGNET

Le système PREV'AIR de prévision et de surveillance de la qualité de l'air en France et en Europe est mis en œuvre à l'INERIS depuis le printemps 2003, en coopération avec l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et Météo France. Il illustre le passage, avec succès, d'une plate-forme expérimentale de prévision de la qualité de l'air ayant permis au CNRS et à Météo France de mettre au point des modèles perfor-

mants¹, à un système opérationnel destiné à répondre aux attentes concrètes du public et des autorités.

PREV'AIR a pour objectif de répondre aux attentes du ministère de l'Écologie et du Développement durable en délivrant quotidiennement une information relative à la qualité de l'air en France et en Europe. PREV'AIR apparaît donc désormais comme un complément du dispositif national de surveillance de la qualité de l'air assurée au niveau local par une quarantaine d'Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA). Le système PREV'AIR s'appuie sur un ensemble d'outils numériques (modèles et post-traitement des sorties de modèles; modules d'interface pour la gestion des entrées/sorties de données). Les données numériques générées par le système sont exploitées afin de :

- ⊕ Fournir des prévisions des concentrations de polluants atmosphériques (ozone, dioxyde d'azote et particules) à trois jours d'échéance;
- ⊕ Élaborer des "analyses" des concentrations de polluants (ozone) – c'est-à-dire des cartographies réalisées a posteriori en intégrant les résultats de la modélisation et les observations disponibles.

Il délivre également des cartes d'observation en temps réel, présentant les mesures réalisées en France par les AASQA, avec plusieurs mises à jour quotidiennes. Les prévisions, les analyses et les cartes d'observation sont proposées quotidiennement sous forme de données numériques et de cartes sur le site : <http://www.prevoir.org>.

Matériel et méthodes

Architecture du système PREV'AIR

Le système PREV'AIR repose sur une architecture informatique schématisée par la figure 1. On peut distinguer trois types d'éléments : le "corps" du système constitué par des modèles numériques de simu-

⊕ ⊕ ⊕ [suite page 14](#)

FIGURE 1.

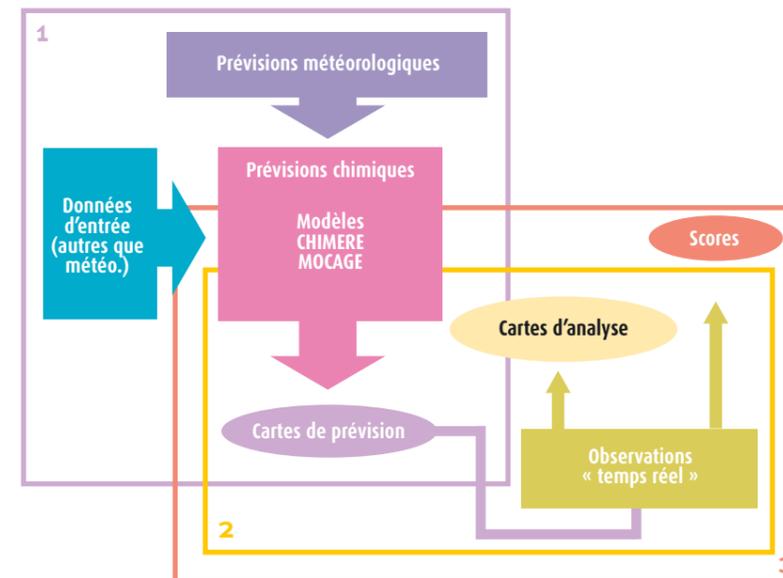


Schéma de principe du système PREV'AIR. Le cadre (1) concerne la partie "prévision" du système, le cadre (2) l'"analyse" et le cadre (3) les "scores".

lation de la météorologie et de la qualité de l'air, les modules de gestion des données d'entrée, les modules de gestion des produits de sortie, y compris le post-traitement des sorties de modèles.

Cette chaîne de calcul, exploitée de manière opérationnelle au sein du système PREV'AIR, permet d'accéder aux informations suivantes :

- prévisions à l'échelle européenne d'ozone, de dioxyde d'azote et de particules avec une résolution de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$;
- prévisions sur la France d'ozone et de dioxyde d'azote avec une résolution de $0,15^{\circ} \times 0,10^{\circ}$;
- prévisions globales d'ozone et de dioxyde d'azote avec une résolution de $4^{\circ} \times 4^{\circ}$.

Le modèle CHIMERE, développé par le CNRS/IPSL et l'INERIS, et le modèle MOCAGE, développé par le Centre National de Recherches Météorologiques de Météo France (CNRM / Météo France), sont mis en œuvre pour simuler le transport et la chimie des polluants atmosphériques.

Données d'entrée

Données météorologiques

Plusieurs filières permettent de disposer des données météorologiques nécessaires aux modèles de chimie atmosphérique : les modèles de Météo France (modèle ARPEGE en particulier) et le modèle de prévisions météorologiques globales AVN (Global Aviation Model) développé par le Service National Météorologique Américain (National Weather Service).

Données d'émission

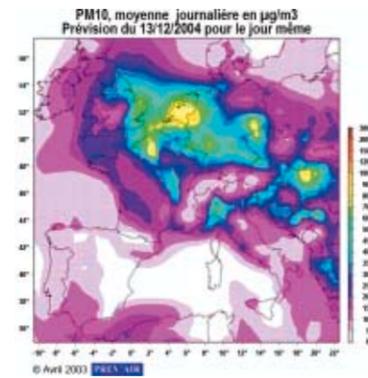
Elles sont issues du programme EMEP, programme coopératif pour la surveillance et l'évaluation du transport à longue distance des polluants atmosphériques en Europe (<http://www.emep.int>) mené sous l'égide de la Commission Économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-NU).

Observations

Ces données permettent :

- 1) d'évaluer les performances du système,
- 2) de corriger a posteriori les champs de concentrations d'ozone calculés par les modèles, et d'établir ainsi des analyses. Pour la France, les données d'observation

FIGURE 2.



Prévision des particules en Europe ; épisode du 13 décembre 2004

sont produites par les AASQA, et sont collectées toutes les trois heures au niveau national et archivées dans la base de données temps réel, BASTER, développée et gérée par l'ADEME. Le système PREV'AIR télécharge quotidiennement les données d'observation disponibles dans BASTER.

Une coopération étroite se met également en place avec plusieurs organismes européens en charge de la surveillance de la qualité de l'air, de façon à accéder aux observations en temps quasi réel, pour d'autres pays et élargir le domaine de validation et d'analyse du système.

Résultats

Prévision des concentrations de polluants

Chaque jour, la prévision est délivrée jusqu'à trois jours d'échéance (i.e. de J+0, 00h TU à J+3, 00h TU), vers 01h00 locale (J+0) pour le domaine européen et 06h00 locales (J+0) pour la France. Afin de limiter l'influence des conditions initiales sur les prévisions quotidiennes, le jour J-1 est simulé préalablement aux trois jours de prévision, fournissant ainsi une estimation de la qualité de l'air pour la veille.

Les prévisions et simulations sont diffusées chaque jour sur le site <http://www.prevair.org>, sous la forme de cartes d'isocourbes des moyennes et des maxima journaliers d'ozone, de dioxyde d'azote et

de particules. À titre d'exemple, la figure 2 présente la carte des maxima journaliers de PM10 (particules dont le diamètre est inférieur à 10 microns) en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, établie le 13 décembre 2004 pour le jour même à l'aide du modèle CHIMERE.

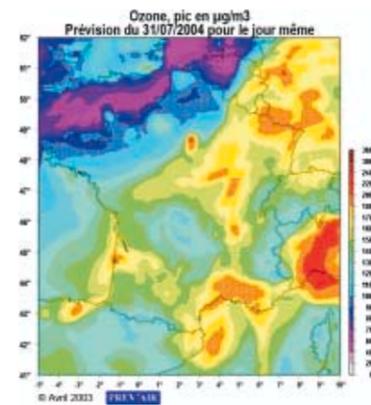
Les performances du système sont évaluées à l'aide des observations collectées chaque jour par PREV'AIR auprès des AASQA dans la base de données temps réel BASTER : les maxima journaliers de dioxyde d'azote et de particules simulés par les modèles sont comparés aux maxima et moyennes observés, à l'aide d'indicateurs statistiques, et ceci pour chaque échéance de la prévision (J-1, J+0, J+1, J+2).

Cette procédure permet d'apprécier la qualité des informations fournies par le système et d'identifier les points d'amélioration possibles, en fonction du secteur géographique, des polluants ou de la période de l'année.

Cartographie a posteriori des concentrations de polluants ou "analyses"

Les observations collectées chaque jour par PREV'AIR, via la base de données temps réel BASTER, sont également utilisées pour corriger a posteriori sur la France les concentrations maximales d'ozone de la veille et du jour même issues des simulations brutes. À titre d'exemple, la figure 3

FIGURE 3A.



Prévision de l'ozone en France ; du 31 juillet 2004.

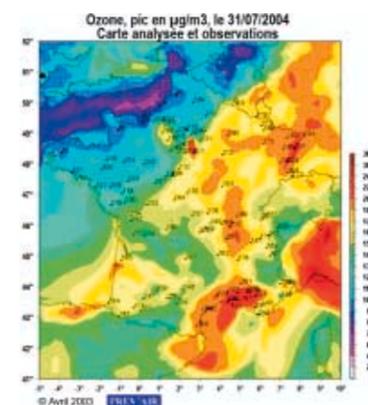
présente la carte des maxima d'ozone dans la couche de surface du modèle, corrigée par les observations disponibles, établie pour le 31 juillet 2004 ; pour ce jour précis, la correction sur le champ d'ozone calculé par le système PREV'AIR varie entre -50 et +30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, les écarts les plus forts étant localisés entre Rouen et Paris, le centre, le sud-est et le nord-est de la France. La structure du champ d'ozone simulé est conservée dans la carte analysée.

En situation d'épisode de pollution photochimique, ces cartes analysées sont générées plusieurs fois par jour en fonction de la fréquence de rafraîchissement des mesures afin de disposer de cartographies de suivi en « temps quasi réel » des panaches de pollution.

Un système au service des acteurs de la qualité de l'air...

Le système PREV'AIR a également pour vocation de fournir aux acteurs locaux de la surveillance de la qualité de l'air, les AASQA en particulier, les éléments contribuant au bon fonctionnement des systèmes régionaux de prévision et de cartographie de la qualité de l'air. Une quarantaine d'utilisateurs, dont une forte majorité d'AASQA, ont accès, grâce à leur compte utilisateur, à une extraction des données numériques de PREV'AIR sur leur domaine d'intérêt. Généralement, le système permet d'alimenter les modèles locaux avec des données sur les condi-

FIGURE 3B.



Carte d'ozone corrigée a posteriori avec les observations.

Références

■ Le système PREV'AIR : cartographie et prévision de la qualité de l'air à grande échelle en Europe. Cécile Honoré, Laurence Rouil, Laure Malherbe, Bertrand Bessagnet, Robert Vautard, Nathalie Poisson, Joëlle Colosio. Environnement, Risques & Santé - Vol. 3, n°3, mai-juin 2004, pp. 156-164 ; et Congrès CIFA, 2004, Douz, Tunisie, 22-24 novembre.

■ Aerosol modeling with CHIMERE- Preliminary evaluation at the continental scale.

B. Bessagnet, A. Hodzic, R. Vautard, M. Beekmann, S. Cheinet, C. Honoré, C. Liousse and L. Rouil, Atmospheric Environment, Volume 38, Issue 18, June 2004, pp. 2803-2817.

■ The PREV'AIR System: An Operational System for Large Scale Air Quality Monitoring and Forecasting over Europe. Applications at the Local Scale. C. Honoré, L. Rouil, F. Meleux, L. Malherbe, B. Bessagnet, R. Vautard, N. Poisson, and J. Colosio. Congrès ISES, 2004, Istanbul, 8-10 septembre.

tions aux limites pertinentes, ou bien les informations sur le domaine local sont simplement retraitées et corrigées à l'aide de l'ensemble des données de mesures disponibles.

Un comité de suivi réunissant deux fois par an utilisateurs et concepteurs du système aide à définir les produits de sortie et les formats de restitution les mieux appropriés.

Enfin, l'INERIS assure désormais, durant les trois mois d'été, période plus propice à l'apparition des épisodes de pollution photochimique, la mise à disposition des prévisions et cartographies de la qualité de l'air auprès du ministère, des professionnels et du public, de manière totalement opérationnelle, soutenue par un système d'astreinte 7 jours sur 7.

Perspectives

Le système PREV'AIR repose sur une active collaboration scientifique entre les partenaires impliqués, qui laisse présager de sérieuses possibilités d'amélioration de ses performances à moyen terme.

En particulier, disposer de diagnostics établis par des modèles différents (CHIMERE et MOCAGE) permet d'envisager le développement de techniques de « prévision

d'ensemble », afin de reconstruire une information optimale en exploitant les qualités intrinsèques de chaque outil. De telles techniques sont classiquement mises en œuvre dans le domaine de la prévision météorologique.

PREV'AIR se développe également dans un cadre européen, avec la mise en place des programmes de surveillance environnementale tels que GMES (Global Monitoring for Environment and Security) qui comprennent logiquement des actions dédiées à la surveillance de l'atmosphère. La prévision cartographique de la qualité de l'air connaît actuellement un véritable essor, fruit de l'intérêt croissant du grand public et des décideurs, et apparaît désormais comme un moyen de communication et de sensibilisation réellement efficace. La France est l'un des pays européens les plus avancés dans ce domaine, et la mise à disposition de notre savoir-faire et de notre expérience fait désormais partie des objectifs que PREV'AIR s'approprie à assumer dans un très proche avenir. ●

1) Jusqu'en 2002 le programme Pioneer soutenu par le PNCA (Programme National pour la Chimie Atmosphérique) avait pour vocation de développer la plate-forme expérimentale, précurseur de PREV'AIR

Caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques

ÉMERIC FRÉJAFON, OLIVIER LE BIHAN, ÉVA LEOZ,
SYLVAIN GEFFROY, ALEXANDRE ALBINET

Si la pollution gazeuse est de mieux en mieux évaluée, les particules restent difficiles à quantifier de manière précise car les paramètres les caractérisant sont beaucoup plus complexes que dans le cas des polluants gazeux. En effet, l'évolution temporelle de la concentration massive s'avère être un indicateur très insuffisant en termes d'impact sanitaire et d'autres paramètres doivent être pris en compte :

- les éventuels composés chimiques adsorbés à leur surface dont certains sont toxiques (mutagènes, cancérigènes...);
- leur distribution de taille afin de quantifier les fractions inhalées;
- leur spatialisation et leur évolution dans la colonne atmosphérique compte tenu de l'impact des échanges verticaux sur l'exposition des populations. Dans cette optique, de nouvelles méthodologies de caractérisation physico-

chimique des particules atmosphériques ont été mises en place, puis validées lors de campagnes de mesures spécifiques.

Chimie organique : fraction polaire des particules dans l'air ambiant

Plusieurs études sur la toxicité des particules dans l'air ambiant montrent que la phase polaire, qui contient, entre autres, des HAP oxygénés et nitrés, est plus toxique que la fraction aromatique contenant des HAP classiques. En effet, certains nitro-HAP et HAP oxygénés ont été identifiés comme des mutagènes directs, ce qui les rend plus toxiques que les HAP qui sont mutagènes par activation enzymatique. Ces études sont surtout centrées sur les particules diesel et ne permettent pas d'extrapoler à d'autres types de particules présentes dans l'air ambiant. De plus, très peu d'études renseignent sur les niveaux de concentration de ces mutagènes directs rencontrés dans l'atmosphère (surtout pour les HAP oxygénés), qui peuvent être, soit émis directement (composés primaires), soit formés par réaction (composés secondaires) avec des gaz présents dans l'air ambiant tels que l'ozone, les oxydes d'azote, etc.

Pour caractériser la fraction polaire des particules présentes dans l'air ambiant et ceci dans différents milieux (urbain, industriel et de fond), il a été choisi de prélever, d'une part, les phases particulières et gazeuses des HAP et de ses déri-

vés oxygénés et nitrés et, d'autre part, de faire un prélèvement par tranche granulométrique. Puis, ont été effectués des prélèvements urbains et de fond dans le cadre du programme POVA (Pollution des Vallées Alpines) en entrée et sortie de vallée afin d'étudier la réactivité des HAP : la contribution des dérivés des HAP formés par réaction au mélange total.

Les résultats présentés ci-dessous concernent essentiellement les HAP « classiques » et permettent, d'une part, d'apporter des données relatives aux niveaux d'exposition de la population des vallées alpines à ces composés toxiques et, d'autre part, d'évaluer l'influence des sources de combustion en s'intéressant aux contributions relatives de certains HAP caractéristiques. Ainsi, ont pu être mis en évidence :

- en hiver, des corrélations récurrentes en périodes anticycloniques entre les ΣPM_{10} et ΣHAP (corrélations non observées en période perturbée) qui indiquent que les variations de la concentration en PM_{10} résultent des variations de concentrations des composés anthropiques primaires. De plus, les étroites corrélations observées entre ΣHAP avec les concentrations en carbone élémentaire (EC), carbone organique (OC), NO_2 et NO montrent que la pollution est interne aux vallées;
- une accumulation des polluants plus importante dans la vallée de Chamonix (formation de couches d'inversion fréquentes en hiver);
- l'importance de la géomorphologie des vallées sur la dispersion des polluants;
- la nécessité de l'implantation d'un suivi des HAP dans la vallée de Chamonix en regard de la future directive européenne sur le B(a)P et des concentrations observées dans cette vallée;
- en été, une contribution majoritaire des sources véhiculaires diesel dans la vallée de la Maurienne et des sources véhiculaires essence dans la vallée de Chamonix;
- une influence importante en hiver de la combustion du bois dans la vallée de Chamonix, mais localisée principalement au niveau des Houches;
- une signature chimique perturbée l'hiver,

compte tenu des sources additionnelles de HAP en cette saison (chauffage domestique);

pour les deux vallées, en hiver, des particules émises localement et, en été, un aérosol plus mélangé et plus "vieux" traduisant la présence de particules importées. Après mise au point de la méthode analytique des HAP oxygénés et nitrés par GC-MS, les concentrations atmosphériques de 15 nitro-HAP et de 9 HAP oxygénés seront déterminées sur les échantillons déjà collectés et dont l'analyse a déjà été réalisée pour les HAP. De plus, en collaboration avec le LPTC de l'université de Bordeaux 1, l'analyse de 8 hydroxy-HAP sera réalisée sur une partie des échantillons.

Analyse couplée de la chimie et de la taille des particules

La production mondiale de nanoparticules est en développement quasi exponentiel depuis la découverte des propriétés particulières de matériaux à l'échelle nanométrique. Les nanoparticules sont de fait de plus en plus utilisées en électronique, optique, pharmacie, chimie... d'où une probabilité croissante d'exposition des personnes à ces nouveaux matériaux. Or, leurs effets potentiels sur la santé sont mal connus et les premiers résultats obtenus jusqu'à présent montrent une toxicité accrue par rapport aux particules de même composition chimique mais de taille supérieure. Compte tenu de cette relation étroite entre taille, composition chimique et toxicité potentielle, l'INERIS a proposé de mettre en place un outil utilisant le couplage entre un instrument fournissant le spectre dimensionnel (SMPS) et un appareil permettant d'y associer la composition chimique par analyse de plasma (LIBS). 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 MEDD. Des premiers résultats concluants ont été obtenus dans le cadre d'une collaboration avec le CNRS, visant à évaluer les

FIGURE 1. Corrélations entre PM_{10} et ΣHAP observées en période anticyclonique

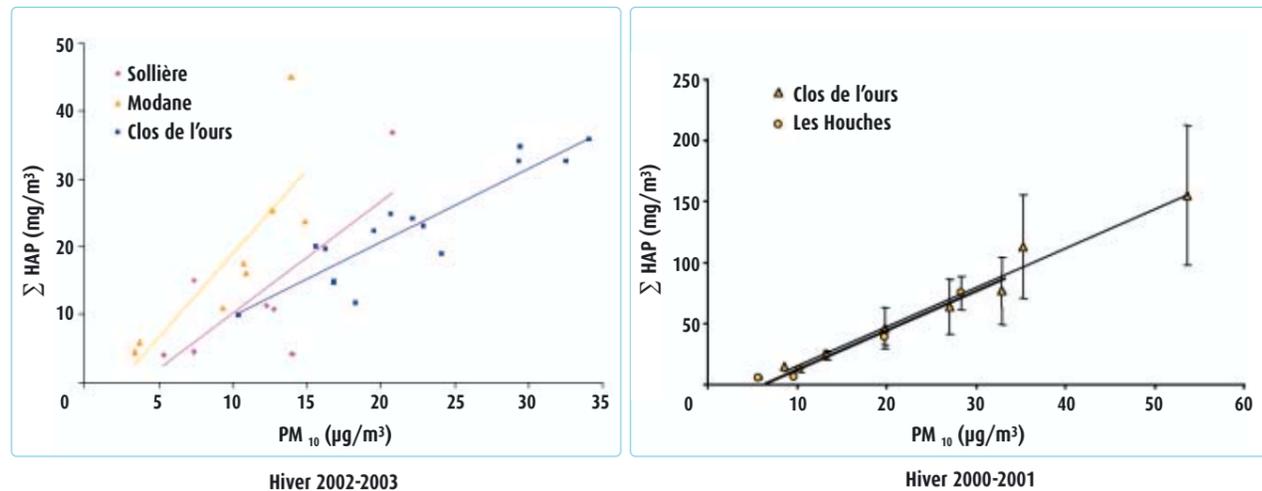
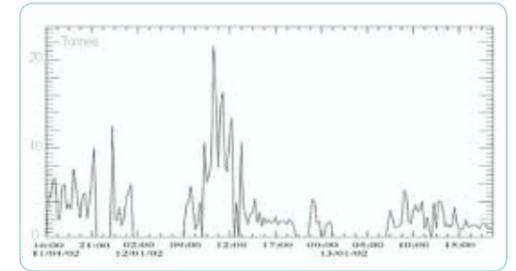
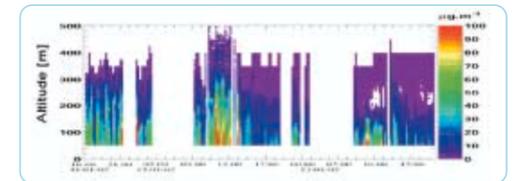


FIGURE 2A.



Distribution temporelle de la charge totale en particules présentes dans la couche limite atmosphérique de l'agglomération lyonnaise en période de smog hivernal.

FIGURE 2B.



Distribution verticale de la concentration en particules (code de couleur) au-dessus de Lyon en période de smog hivernal (11 - 13 janvier 2002).

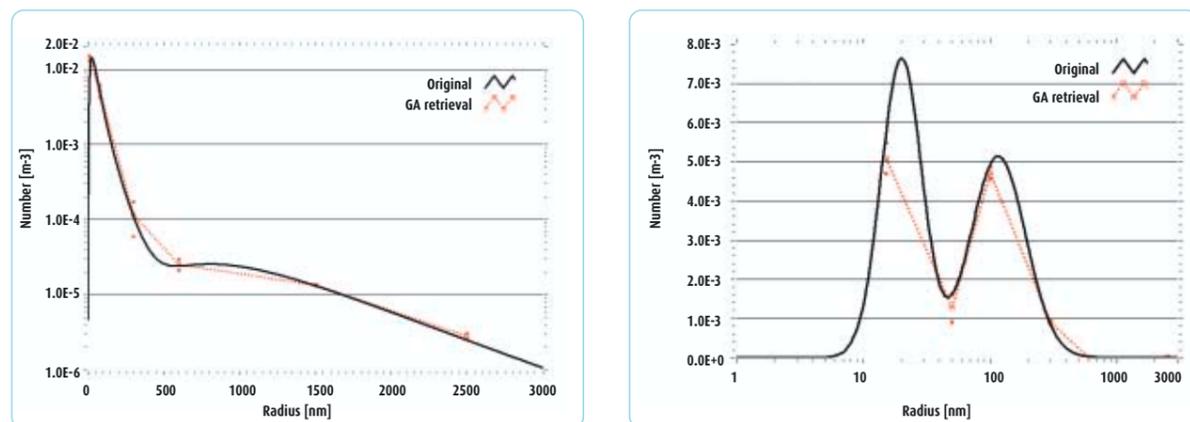
performances d'une technique d'identification par LIBS concernant des particules organiques (bactéries), minérales (silice) et métalliques (aluminium, argent). Ces résultats vont ensuite permettre d'optimiser le choix des différents composants intervenant dans la construction de cet instrument de détection et d'identification en temps réel de nanoparticules dans l'air ambiant.

Physico-chimie 3D des particules atmosphériques

Parmi les techniques optiques d'analyse, telles que celle décrite ci-dessus, le LIDAR tient une place privilégiée car il est apte à effectuer une mesure tridimensionnelle à distance de polluants atmosphériques. Si cette technique est aujourd'hui très opérationnelle pour le suivi de polluants gazeux, la très grande majorité des LIDAR actuels ne fournissent qu'une évaluation qualitative des particules atmosphériques, indépendamment de leur taille, composition chimique, masse et nombre. L'INERIS a développé et validé, en collaboration

» » » suite page 18

FIGURE 3.



Étude de la réponse de l'algorithme génétique (faculté à retrouver la distribution de taille) à partir de profils LIDAR. Cas de distributions de taille urbaine (à gauche) et continentale (à droite).



avec différentes unités de recherche du CNRS, une méthodologie permettant d'obtenir la charge totale en particules atmosphériques, leur spatialisation (stratification atmosphérique) ainsi que leurs propriétés microphysiques.

La possibilité de déterminer à distance la distribution de taille serait une information complémentaire d'un intérêt tout particulier. Pour ce faire, il a été engagé, en parallèle, le développement d'une méthode de caractérisation à distance de la distribution en taille des particules atmosphériques avec un LIDAR UV-IR, qui a été appliquée lors d'une campagne de mesure (POVA, été 2003). Il est apparu

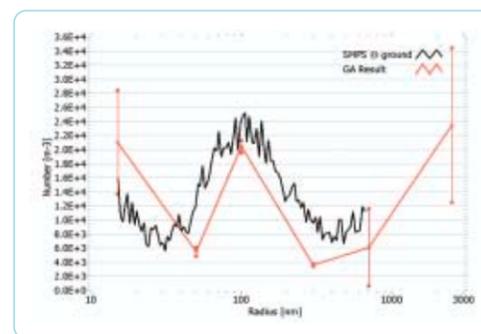
qu'une méthode basée sur l'algorithmique génétique serait susceptible de satisfaire ces objectifs. En effet, cette approche d'optimisation multi-objectifs sous contraintes est de plus en plus utilisée (applications industrielles pour l'ordonnancement, médicales pour la tomographie). La méthode que nous avons mise en place permet de retrouver la distribution de taille en nombre des particules atmosphériques inférieures à PM_{2,5} sans hypothèse sur sa forme. Ainsi, il n'est pas nécessaire de calculer les variations de la fonction étudiée, ce qui constitue un avantage certain dans le cas présent où la connaissance de la distribution de taille et son évolution avec l'altitude sont des paramètres sans hypothèses a priori.

Au regard des simulations effectuées (validation numérique sur la base de distributions de taille standardisées) et de la validation réalisée lors de la campagne POVA (comparaison des distributions de taille obtenues par LIDAR avec celles enregistrées par un analyseur de spectre dimensionnel de type SMPS), l'algorithme génétique apparaît comme un outil très prometteur car il se montre très stable et relativement modeste en temps de calcul et d'optimisation dans le choix des longueurs d'onde. ●

Les études de caractérisation physico-chimique des particules atmosphériques ont été réalisées en collaboration avec de nombreuses équipes et notamment :

- laboratoires de recherche : LPTC, LPCM-Bordeaux I, LCME-Savoie, LGGE-Grenoble, LASIM-Lyon, ECL-Lyon, LRCS-Amiens
- constructeurs : ANDOR Technology, AVANTES
- associations agréées de surveillance de la qualité de l'air : COPARLY, AIR-APS
- pouvoirs publics : mairies de Chamonix et de Saint-Jean-de-Maurienne

FIGURE 4.



Campagne POVA été 2003 : mesures LIDAR à quatre longueurs d'onde par couplage entre les LIDAR de l'INERIS et du CEA-LSCE. Comparaison de la distribution de taille obtenue par l'algorithme génétique avec celle enregistrée par un analyseur dimensionnel (graphique de droite).



Références

- Long optical path instruments for regional air quality monitoring: 3D aerosols and gaseous pollutants survey using LIDAR technique. Proceedings of 4th International Workshop on Photonics and Applications (IWPA), Hanoi, 2004. E. Fréjafon, S. Geffroy and P. Rairoux.
- Program POVA (Pollution des Vallées Alpines): general presentation and some highlights, submitted to Atmospheric Chemistry and Physics (2005). JL. Jaffrezo et al
- Spatial concentrations and seasonal variations of gaseous and particulate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH): cases of Chamonix and Maurienne valleys. 9th FECS Conference on Chemistry and the Environment, Bordeaux (France), August 2004. A. Albinet, E. Leoz-Garziandia, JL. Besombes, H. Budzinski, E. Villenave and JL. Jaffrezo
- Seasonal variation of PAH particle size distribution and gas/particle partitioning in two Alpines valleys. European Aerosol Conference, Budapest (Hungary), September 2004. A. Albinet, E. Leoz-Garziandia, JL. Besombes, H. Budzinski, E. Villenave and JL. Jaffrezo
- Atmospheric aerosol size retrieval from LIDAR data applying genetic algorithm approach. Abstracts of the European Aerosol Conference, 2004, 6-10 September, Budapest, pp. 5515-5516. E. Fréjafon, S. Geffroy and P. Rairoux.
- Urban aerosols survey using LIDAR and numerical model. Reviewed and revised papers presented at the 22nd International Laser Radar Conference, 2004, 12-16 July, Matera (Italy), pp. 539-540. S. Geffroy, L. Soulhac, E. Fréjafon, R. Perkins, J.P. Wolf and P. Rairoux.

Sites et sols pollués



La gestion des déchets (filières de recyclage et de valorisation de matière) et des sites et sols pollués nécessite une évaluation rigoureuse des risques de contamination des récepteurs (eaux, homme et écosystèmes). En fonction des matrices considérées, les transferts depuis les déchets et les sols pollués vers les récepteurs représentent une des difficultés majeures à appréhender de manière globale. Les approches simplistes du type essai « unique et universel », telles que les essais de lixiviation utilisés dans les années 1990 pour l'acceptation des déchets en centres de stockage, ne peuvent pas être appliqués de manière isolée dans le cas de la valorisation des déchets dans divers scénarios, ou pour la gestion durable des sites pollués en fonction de l'usage.

Dans ce cadre, l'INERIS s'est associé avec plusieurs partenaires, institutionnels et universitaires afin de mettre en place des programmes de recherche permettant d'apporter des réponses quant au comportement à long terme des matériaux et au transfert des polluants. Pour ce faire, des approches couplant caractérisation fine des matériaux et modélisations du relargage, du transfert et de l'impact ont été réalisées.

L'INERIS S'EST ASSOCIÉ AVEC PLUSIEURS PARTENAIRES, INSTITUTIONNELS ET UNIVERSITAIRES AFIN DE METTRE EN PLACE DES PROGRAMMES DE RECHERCHE PERMETTANT D'APPORTER DES RÉPONSES QUANT AU COMPORTEMENT À LONG TERME DES MATÉRIAUX ET AU TRANSFERT DES POLLUANTS.

Le premier niveau de compréhension du comportement des matériaux dans un scénario nécessite de pouvoir traduire les mécanismes physico-chimiques de relargage du terme source. Dans ce cadre, un programme de recherche a été lancé, depuis 2002, sur l'apport de la caractérisation cristalochimique (spéciation...), couplée à l'utilisation d'un modèle numérique chimie-transport (CHESS-HYTEC) sur différentes typologies de déchets. Une thèse de doctorat vise à évaluer cet aspect sur des déchets de l'industrie métallurgique. Par ailleurs, un projet d'évaluation du comportement d'un stockage de déchets miniers a également été initié depuis 2002 et fournit des éléments d'appréciation importants en terme d'évaluation du potentiel de remobilisation des substances toxiques du terme source étudié. Enfin, la mise en place d'une plate-forme expérimentale (ARDEVIE) dédiée à l'évaluation du comportement des sols et des déchets permettra prochainement à l'INERIS et à ses partenaires de disposer d'un outil innovant et performant, susceptible de s'affranchir des effets d'échelle observés lors des essais en laboratoire.

Le second niveau de compréhension et d'évaluation des risques environnementaux nécessite de pouvoir apprécier et quantifier les mécanismes de transfert des polluants à partir du terme source vers l'environnement. Pour ce faire, le programme de recherches TRANSPOL a mis en évidence, par ses travaux de modélisation, la nécessité de réduire les incertitudes. Ainsi, il a été montré l'importance de prendre en considération les phénomènes d'atténuation naturelle, et en même temps la difficulté d'obtenir des données d'entrée justifiées pour les caractériser en vue d'obtenir des prédictions fiables de transfert vers et dans les eaux souterraines.

Enfin, le dernier niveau permet de préciser les impacts sur les cibles. Dans le cadre des évaluations des risques pour la santé humaine, l'INERIS modélise l'exposition des populations cibles sur la base d'une démarche par scénarios, spécifique à chaque contexte. ●

Dynamique des éléments traces métalliques (Zn, Cd et Pb) sur un petit bassin versant contaminé par des déchets miniers

Cas du bassin versant amont du Lez (Ariège, Pyrénées).

RABIA BADREDDINE, CÉLIA BRUNEL

PHOTO 1.



Vue des résidus de flottation sur la rive droite du Lez – site de Bentailou (Sentein, Ariège).

Importants réservoirs de métaux, les déchets miniers représentent un risque de contamination pour les rivières. À partir d'un ancien site d'extraction de plomb et de zinc représentatif des Pyrénées, une recherche fondée sur une démarche couplant l'étude sur le terrain et l'étude au laboratoire (approches expérimentale, géochimique et minéralogique) a montré que, plus que les eaux de rivière, ce sont les sédiments qui portent la contamination métallique et les particules en suspension qui en assurent la dispersion et particulièrement à l'occasion des crues. Le relargage des métaux sous forme dissoute est limité dans le contexte carbonaté du site. Il est contrôlé par la précipitation des phases secondaires.

Problématique et objectifs

Les déchets miniers constituent d'importantes sources de contamination métallique pour les eaux de surface et les sols. En effet, ils contiennent des résidus de minerai, généralement des sulfures, qui s'oxydent dans les conditions de surface, génèrent de l'acidité et libèrent des métaux.

À ce jour, la gestion des anciens sites miniers est devenue un enjeu environnemental majeur. Dans l'objectif de prévenir ou de minimiser les effets et les risques

négatifs sur l'environnement et la santé, le Parlement et le Conseil européens ont établi un projet de directive concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive. Dans ce contexte, ce projet vise la caractérisation de la contamination liée aux anciennes activités minières à l'échelle d'un bassin versant amont et à identifier les principaux mécanismes géochimiques et/ou minéralogiques qui contrôlent le transfert des métaux des déchets jusqu'aux milieux récepteurs.

Synthèse des résultats

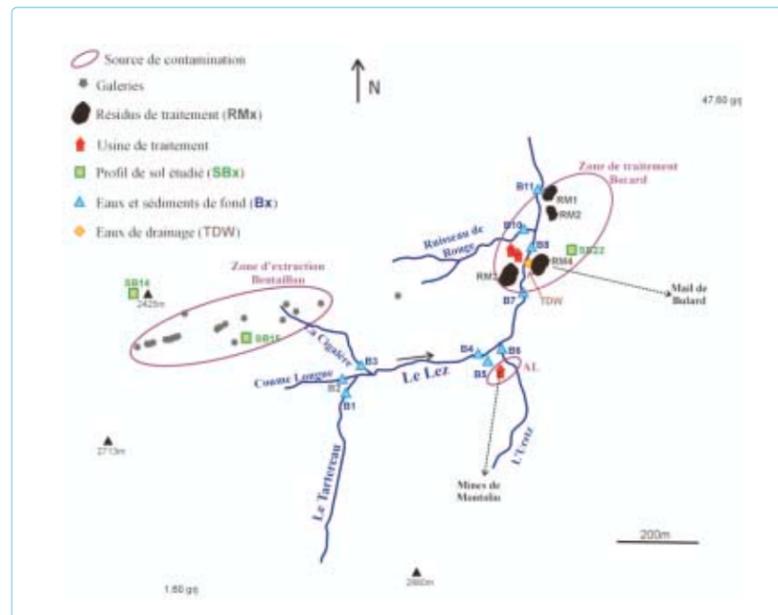
Cette étude a concerné le site des anciennes mines de Bentailou, secondes mines de plomb (Pb) et zinc (Zn) des Pyrénées. Pendant un siècle, ont été exploitées, sur

le bassin versant amont du Lez (1 000 – 2 400 m d'altitude), 25 000 tonnes de Pb et 75 000 tonnes de Zn à partir d'une minéralisation à galène (PbS) et à sphalérite ($Zn_{(1-x)}Cd_xS$), associée à une gangue carbonatée. Après la fermeture de l'exploitation, plusieurs milliers de tonnes de résidus ont été abandonnées sur le site. Il s'agit principalement de résidus d'extraction. En aval, à proximité de l'ancienne usine, plus de 200 000 tonnes de résidus de flottation demeurent sur les berges du Lez (Photo 1). Pour évaluer l'impact des résidus miniers, l'étude a concerné plusieurs compartiments : les résidus de traitement, les sols, les eaux et les sédiments de fond (Fig. 1).

☉ ☉ ☉ [suite page 22](#)

FIGURE 1.

Localisation des sources potentiellement contaminantes (résidus de traitement, sols, eaux et sédiments de fond)



L'activité minière, et notamment l'extraction du minerai, a dû contribuer à la dispersion des métaux sur le bassin. En particulier, les résidus de flottation, caractérisés par de fortes teneurs en métaux (17,8 g.kg⁻¹ Zn, 7,5 g.kg⁻¹ Pb et 50 mg.kg⁻¹ Cd) et fortement érodables, représentent une source de contamination majeure du milieu récepteur.

À l'échelle du bassin versant, les sols contaminés constituent un compartiment de stockage des métaux. Parmi les profils de sols étudiés, ce sont les sols développés sur la roche encaissante portant la minéralisation qui présentent les plus fortes teneurs en métaux. Dans la zone de traitement, bien qu'ils soient contaminés en surface, les sols présentent des teneurs en métaux inférieures.

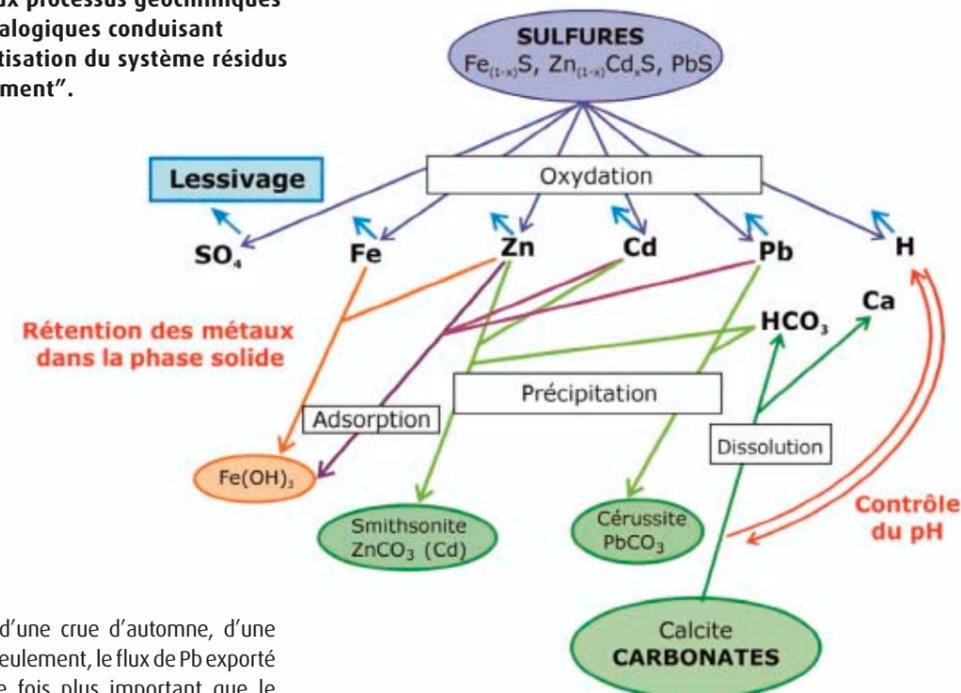
À l'exutoire du bassin, les résidus de flottation constituent la principale source de contamination. Malgré l'oxydation des sulfures, qui génère de l'acidité, les eaux de drainage des résidus (naturelles

ou expérimentales) sont neutres. En effet, la minéralisation étant incluse dans une gangue carbonatée, les résidus contiennent environ 40 % de calcite qui, par dissolution, maintient des conditions neutres (effet tampon). Dans ce contexte, la majorité des métaux libérés en solution est piégée sous forme solide dans des minéraux secondaires à l'équilibre (Fig. 2). Il s'agit principalement des (oxy)hydroxydes de fer (Fe(OH)₃) et des carbonates (ZnCO₃, PbCO₃). Ainsi, parce que les résidus sont fortement carbonatés, le risque de contamination lié à l'érosion chimique est faible. On estime qu'il faudrait plusieurs milliers d'années pour oxyder la totalité des sulfures. Néanmoins, non consolidés, les résidus sont fortement érodables. L'érosion mécanique est ainsi le principal vecteur de la dispersion des métaux.

Les eaux de surface présentent de faibles concentrations en métaux (42 µg.l⁻¹ Zn, 0,3 µg.l⁻¹ Cd, 0,6 µg.l⁻¹ Pb, phase < 0,2 µm) à l'exutoire. En revanche, les sédiments de fond sont fortement contaminés. En aval des résidus, leurs concentrations en Zn, Cd et Pb atteignent respectivement 11,5 g.kg⁻¹, 30 mg.kg⁻¹ et 6,5 g.kg⁻¹ (< 2 mm) et représentent un enrichissement d'un facteur 5, 4 et 13 par rapport à l'amont. Dans ce contexte carbonaté, les sédiments sont les vecteurs efficaces de la dispersion des métaux vers l'aval. À l'exutoire du bassin versant, le transfert des métaux a été étudié en conditions hydrologiques variées. En particulier, deux crues, contrastées par leur amplitude et leur durée, ont été suivies. Malgré leurs différences, les deux crues correspondent à une remobilisation des métaux à la fois dans la phase dissoute et dans la phase particulaire. Dans la phase particulaire, l'augmentation des flux de métaux résulte des augmentations du débit et de la charge en suspension, mais surtout de la remobilisation de particules contaminées.

FIGURE 2.

Principaux processus géochimiques et minéralogiques conduisant à "l'inertisation du système résidus de traitement".



Au cours d'une crue d'automne, d'une semaine seulement, le flux de Pb exporté est quatre fois plus important que le flux total de Pb annuel en périodes de récession. De même, le flux de Zn exporté représente un cinquième de la quantité totale transférée annuellement en périodes de récession. Ainsi, les crues sont des périodes efficaces de dispersion des métaux vers l'aval. Bien qu'elles soient

limitées dans le temps, les crues contribuent significativement à la charge totale de métaux exportée annuellement, et par conséquent, doivent être considérées dans les études environnementales. ●

Références

- Brunel C., Badreddine R., Munoz M., Probst A.
Geochemical and mineralogical study of Pb, Zn and Cd fate in flotation tailings: experimental approach and modeling. International Symposium of Environmental Geochemistry (ISEG, Edinburgh, 2003).
- Brunel C., Badreddine R., Munoz M., Probst A.
Impact des déchets miniers sur le milieu environnant : méthodologie d'évaluation et résultats. First International symposium on the management of liquid and solid residues (Malisore, 2004).
- Brunel C., Probst A., Munoz M., Badreddine R.
Dispersion of Pb and Zn from an orphan mining site - Importance of storm events. Réunions des Sciences de la Terre (RST, Strasbourg, septembre 2004).
- Brunel C., Munoz M., Probst A., Badreddine R.
Impact de l'activité minière sur les concentrations en Pb, Zn et Cd des sols du bassin versant amont du Lez (Ariège) - Rôle de ce compartiment dans le stockage et le transfert des métaux. Journées Nationales d'Étude du Sol (JNES, Bordeaux, octobre 2004).
- Brunel C., Probst A., Munoz M., Badreddine R.
Remobilisation of Zn, Pb and Cd on a small catchment contaminated by mining wastes during two contrasted rain events - impacts on the metal dispersion downstream. Soumis à Applied Geochemistry.

Effets des pollutions sur le vivant



Le ministère de l'Écologie et du Développement durable s'appuie sur l'INERIS pour l'évaluation des dangers et des risques des substances chimiques vis-à-vis de la santé et des écosystèmes. Afin de fonder l'expertise de l'Institut sur des bases solides, un important effort de recherche est mené sur ce sujet depuis plusieurs années. Cet effort porte ses fruits, comme l'illustrent les exemples suivants. Quatre défis scientifiques ont été identifiés et sont présentés en introduction de ce chapitre. En réponse à ces défis, les travaux ci-après visent à comprendre les effets sur la santé et l'environnement et à confirmer la causalité pour trois risques émergents : les perturbateurs endocriniens, les particules atmosphériques et les champs électromagnétiques.

Perturbateurs endocriniens et produits toxiques pour la reproduction

La perturbation des fonctions de reproduction par les substances chimiques fait depuis plusieurs années l'objet d'une attention particulière en raison de la menace qu'elle représente pour la biodiversité et la santé humaine. Deux équipes de recherche de l'INERIS travaillent de manière concertée sur ce thème. La première étudie la capacité d'interaction des substances avec le système endocrinien d'espèces animales aquatiques. Son objectif est la caractérisation du potentiel perturbateur des substances chimiques et le développement de biomarqueurs précoces de leurs effets. Les biomarqueurs mesurent des variations biochimiques ou physiologiques chez les organismes exposés à des polluants. Ils sont complémentaires des analyses chimiques et apportent de nombreuses informations sur les interactions entre le milieu pollué et les espèces concernées. Cette équipe dispose d'un "mésocosme" (un ensemble de rivières artificielles) qui permet d'étudier en conditions semi-naturelles l'effet d'un contaminant sur les écosystèmes. La seconde équipe s'intéresse aux problèmes de reproduction chez

l'homme, qu'elle étudie par voie expérimentale *in vitro* ou *in vivo* sur modèle animal. Un programme sur les effets des éthers de glycol administrés sur plusieurs générations vient de se terminer. Un second programme, en cours, s'attaque à la compréhension des mécanismes d'action des perturbateurs endocriniens chez les mammifères et développe des tests complémentaires à l'expérimentation animale. Cette action s'inscrit dans la mise en place du pôle régional ANIMEX, développé en partenariat avec l'Institut Supérieur d'Agriculture de Beauvais (ISAB).

Particules atmosphériques

L'INERIS s'est fait une spécialité de la toxicologie pulmonaire sous ses diverses formes. Cette activité bénéficie, par le pôle ANIMEX, d'une unité d'expérimentation animale conforme aux Bonnes Pratiques de Laboratoire et maîtrisant les techniques d'exposition par inhalation. Elle se consacre, depuis plusieurs années, à l'étude des liens entre la pollution atmosphérique et l'asthme, en particulier chez l'enfant. Une des causes de l'asthme est sans conteste le pollen, cause tout à fait "naturelle", mais dont la présence constante ne permet pas d'expliquer l'augmentation du nombre d'enfants asthmatiques. L'hypothèse d'une aggravation des propriétés allergisantes des grains de pollen par les polluants atmosphériques est étudiée à l'INERIS. De telles études des interactions entre la nature et les activités humaines sont au cœur de la gestion efficace des pollutions.

Champs électromagnétiques

On observe actuellement un accroissement des démences (maladie d'Alzheimer, etc.), en partie lié à l'allongement de la durée de vie. Par ailleurs, l'échauffement du corps et les modifications du système nerveux central sont les manifestations les mieux établies d'une exposition aiguë aux champs électromagnétiques. Si les phénomènes observés sont cumulatifs, on peut poser la question de leur participation à l'augmentation observée de l'incidence des démences. C'est à cette question importante que l'INERIS s'attache à répondre au travers de plusieurs études, dont celle présentée ici est particulièrement représentative. ●

Caractérisation du danger des substances à l'aide d'outils biologiques *in vitro* et *in vivo* et application à la biosurveillance de l'environnement aquatique

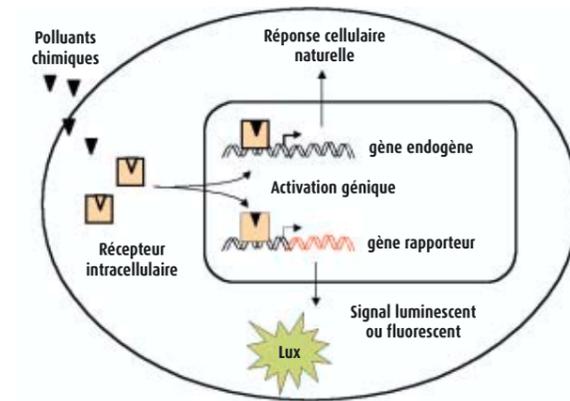
SÉLIM AÏT-AÏSSA, FRANÇOIS BRION, JEAN-MARC PORCHER

Un très grand nombre de substances chimiques issues des activités humaines agricoles, urbaines ou industrielles, est rejeté dans les milieux aquatiques et contribue à une contamination croissante des ressources en eau. Ces polluants sont retrouvés à des concentrations parfois très faibles, ce qui rend difficile leur détection et l'évaluation de leurs impacts. Un des défis actuels en écotoxicologie consiste à développer des outils sensibles qui permettent une évaluation du devenir et des effets des polluants chimiques dans la biosphère. Les outils biologiques basés sur le mécanisme d'action toxique des substances apparaissent particulièrement adaptés pour répondre à ces exigences. À travers l'exemple des polluants perturbateurs endocriniens (PE), nous décrivons ici les outils *in vitro* et *in vivo* mis en place à l'INERIS et leur utilisation combinée pour caractériser le danger des substances, les niveaux de contamination des milieux ainsi que les effets biologiques chez le poisson *in situ*.

Études *in vitro* et *in vivo* des mécanismes d'action des PE

Les perturbateurs endocriniens sont des substances chimiques d'origine naturelle ou anthropique, susceptibles de modifier le fonctionnement du système endocrinien et de provoquer des effets néfastes sur la santé d'un organisme ou de sa descendance. Les PE appartiennent à des classes chimiques diverses (stéroïdes naturels et synthétiques, alkyl phénols, dioxines, pesticides, plastifiants, etc.) et sont présents dans les eaux de surface, les sédiments ou les rejets de stations d'épuration. L'un des mécanismes primaires importants qui initie leur toxicité

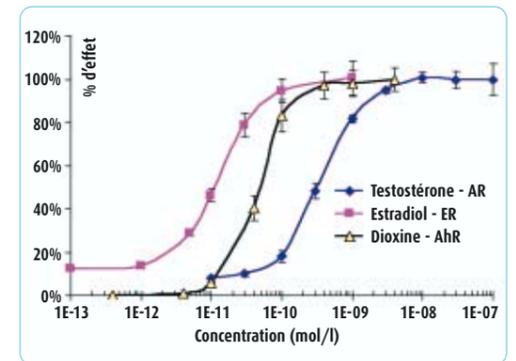
FIGURE 1.



1.A Principe des tests *in vitro* utilisés pour mesurer l'activité PE des substances ou de mélanges environnementaux.

réside dans leur capacité à se lier aux récepteurs des hormones et à perturber l'expression des gènes médiée par ces récepteurs.

Des modèles cellulaires utilisant des gènes rapporteurs luminescents ou fluorescents ont été développés, en partie en collaboration avec l'unité INSERM 540. Ces tests *in vitro* permettent une mesure simple de la capacité des substances à se lier aux récepteurs nucléaires et à induire/inhiber une réponse génique (Fig. 1). Les récepteurs ciblés dans nos études sont les récepteurs des œstrogènes (ER), des androgènes (AR) et de la dioxine (AhR). Du fait de leur simplicité d'utilisation, ces tests sont tout à fait adaptés au criblage de substances ou d'échantillons environnementaux. D'autres mécanismes de perturbation endocrinienne sont liés à une altération de certaines enzymes impliquées dans la synthèse des hormones stéroïdiennes. Des systèmes *in vitro* plus ou moins complexes (fractions microsomaux de cerveau et d'ovaires de poisson, lignée cellulaire



1.B Le graphique montre l'effet de l'œstradiol, la testostérone et la dioxine sur l'activation des récepteurs des œstrogènes (ER), des androgènes (AR) et de la dioxine (AhR) respectivement dans les cellules MELN, MDA-kb2 et PLHC-1.

● ○ ○ ○ suite page 26

TROIS RISQUES ÉMERGENTS : LES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS, LES PARTICULES ATMOSPHÉRIQUES ET LES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES.

Échauffement et champs radiofréquences des téléphones mobiles

ELMOUNTACER BILLAH ELABBASSI, RENÉ DE SEZE

L'objectif principal de ce projet était de déterminer si une exposition chronique aux champs radiofréquences (RF) émis par un téléphone mobile (TM) peut constituer un risque pour la santé des utilisateurs. Ceux-ci sont plus de quarante millions en France. Même si, au niveau individuel, les conséquences paraissent aujourd'hui négligeables, au niveau collectif, du fait du grand nombre d'utilisateurs, elles doivent être considérées comme un problème potentiel de santé publique.

Le rayonnement radiofréquence émis par les téléphones mobiles numériques (GSM) constitue, par sa proximité avec la tête de l'utilisateur, une des sources de champs électromagnétiques les plus importantes auxquelles l'Homme ait jamais été exposé. L'absorption du rayonnement électromagnétique peut entraîner un échauffement de la peau et des tissus sous-jacents.

Le réchauffement local peut modifier la régulation thermique à trois niveaux :

en augmentant le stockage local de chaleur dans l'organisme,

en modifiant la température cérébrale ou la température du sang irriguant le cerveau,

en modifiant les influx nerveux issus des thermorécepteurs cutanés de la tête et ainsi en agissant sur les fonctions de régulation végétative ou sur le confort thermique.

Matériels et méthodes

L'Institut a effectué des mesures de température sur la peau de la région temporale de la tête au contact d'un téléphone mobile GSM 1800 MHz; puissance de rayonnement 125 mW. Les mesures de température sont faites avec un thermomètre Luxtron 790 à fibre optique. On a dérivé le rayonnement radiofréquence de l'antenne du téléphone mobile sur une charge résistive de 50 Ω . La température ambiante était de 23 °C et le téléphone mobile était en position normale d'utilisation lors d'une communication pendant au moins 30 min afin d'atteindre l'équilibre thermique. Lorsque le TM est éteint, l'augmentation de la température de la peau est significative: elle est de 1,88 °C. Lorsque le TM est allumé, l'augmentation de température est de 2,93 °C en mode réception, de 3,29 °C en mode émission sans la charge et de 3,31 °C en mode émission avec la charge. La différence de température

entre le mode émission sans la charge et avec la charge n'est pas significative ($t_{17} = 0,707$; $p = 0,489$) (Fig. 1).

Résultats

La contribution des émissions RF du téléphone mobile dans l'augmentation de la température de la peau est négligeable. L'augmentation de la température de la peau lors d'une communication avec un TM est donc due à l'isolation thermique réduisant les pertes de chaleur de la peau vers l'air et à la conduction thermique de la chaleur produite par la batterie et les circuits RF du TM pendant une communication de longue durée.

Ce travail a fait l'objet du soutien financier du Conseil Régional de Picardie. ●

Références

■ E.B. Elabbassi et R. De Seze. Warmth Sensation on the Head Associated with Mobile Phone Use: Electromagnetic Field Effects? 10th US Airforce Laboratory Workshop: Measuring and Modeling Thermal Responses to Directed Energy Exposure. June 20, 2004 Washington, D.C., États-Unis, lors du 26th annual meeting of the Bioelectromagnetics Society (BEMS), June 21-24, 2004, Washington, D.C., États-Unis. <http://www.emfdosimetry.com/ws2004.htm>

■ E.B. Elabbassi et R. De Seze. Skin Heating of Phone's User and Thermal Modeling. IEEE ICES/COST 281 Thermal Physiology Workshop, September 22-24, 2004, Paris, France.

■ E.B. Elabbassi et R. De Seze. Mobile Phone Use and Temporal Skin Heat Sensation. 3rd International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, 4-8 October, 2004, Kos Greece. Paper published in the Proceedings of the Workshop Volume I, pp. 543-548.

Toxicologie de la reproduction : la montée en puissance

EMMANUEL LEMAZURIER

leur implication dans les troubles de la fertilité et du développement observés depuis plusieurs années (exemple des perturbateurs de la fonction endocrinienne). Depuis quelques années, les frontières entre la toxicologie de la reproduction et la cancérologie fusionnent. En effet, les troubles de la fertilité et les cas de cancer du testicule pourraient avoir une (ou des) cause(s) commune(s). Ils pourraient être le résultat d'un dysfonctionnement de la programmation embryonnaire et du développement gonadique pendant la vie fœtale. Dans ce sens, l'impact étiologique des facteurs environnementaux néfastes tels que les perturbateurs de la fonction endocrinienne doit donc être considéré.

Les éthers de glycol : toxiques connus pour la reproduction

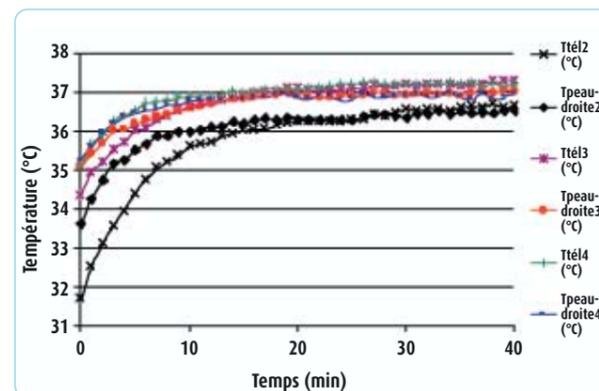
Les éthers de glycol sont des solvants amphiphiles largement utilisés pour des applications industrielles ou domestiques. Leurs effets toxiques sur la reproduction et le développement des mammifères ont été largement étudiés et des recommandations voire des interdictions concernant leur utilisation ont été édictées. Cependant, cette famille de produits présente des différences structurales importantes entraînant des comportements variés quant à leur métabolisme et leurs effets toxiques. Au cours d'un premier programme, ont été comparés

☺ ☺ ☺ suite page 30



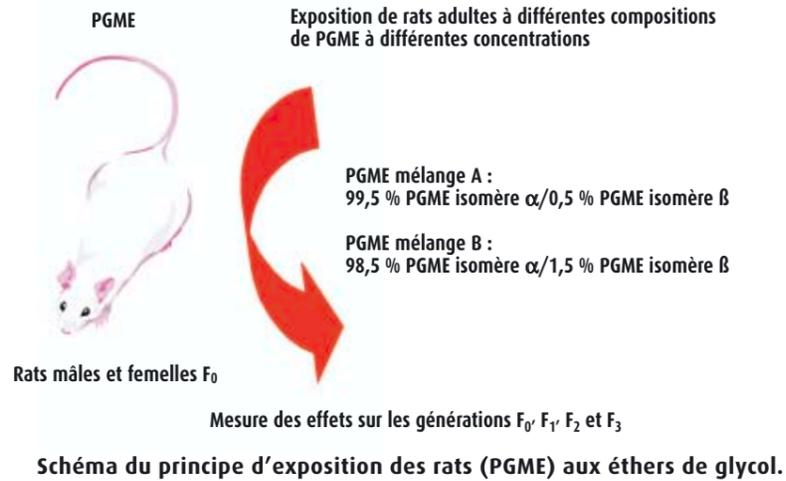
Volontaire avec un téléphone mobile en position "joue".

FIGURE 1.



Variation de la température de surface de la peau (Tpeau, °C) et du téléphone (Ttél, °C) en fonction du temps (min), en mode réception (2), en mode émission sans charge (3) et en mode émission avec charge (4).

FIGURE 1.



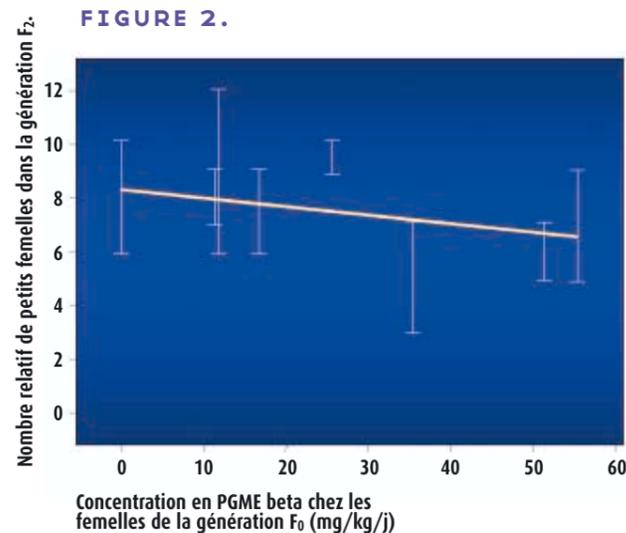
les effets délétères sur la reproduction et le développement des mammifères de deux éthers de glycol de générations différentes : l'éther méthylique de l'éthylène glycol (EGME), appartenant à la série éthylénique (ancienne) des éthers de glycol, et l'isomère α de l'éther méthylique du propylène glycol (PGME), appartenant à une nouvelle famille d'éthers propyléniques (Fig. 1). Alors que l'altération de la spermatogénèse et l'effet tératogène de l'EGME sont bien établis, les effets du PGME réclament un certain nombre d'études complémentaires, notamment en ce qui concerne les différences entre l'isomère α et l'isomère β .

Dans cette étude nous avons utilisé un protocole sur 3 générations (Fig. 1). Des rats mâles et femelles ont été exposés pendant un cycle de gamétogénèse à un mélange de PGME α (99,5 %) et β (0,5 %).

Les résultats les plus intéressants concernent les effets du PGME. L'exposition de rats mâles pendant un cycle de spermatogénèse à un mélange de PGME α (99,5 %) et β (0,5 %) a montré une diminution du nombre de spermatozoïdes avec une concentration de PGME β de 11,5 mg/kg/jour (Fig. 2). Des troubles non dépendants de la dose ont été observés sur le sexe ratio des générations 2 et 3 (Fig. 3). Cependant, seules des études complémentaires pourraient permettre de conclure quant à des effets persistant sur plusieurs générations du PGME au travers d'un mécanisme génotoxique.

Les perturbateurs de la fonction endocrinienne et la santé humaine : mythe ou réalité

La diminution du nombre de spermatozoïdes chez l'homme et l'augmentation des hypospadias et des cancers testiculaires au cours des 40-50 dernières années semblent en relation notamment avec l'exposition *in utero* à des perturbateurs de la fonction endocrinienne. Les mécanismes sous-jacents à ces phénomènes doivent donc être élucidés afin d'estimer les risques réels de l'exposition à ces



Exemple de résultats obtenus sur le sexe ratio. La portée F_2 montre par exemple une inversion du sexe ratio chez des petits issus de couple dans lequel seule la femelle a été traitée. Cependant, ces résultats ne semblent pas en relation avec la dose, des études complémentaires sont nécessaires avant de pouvoir conclure.

agents chimiques mais également de prévenir leurs effets délétères.

Afin de mener ces études, a été mis en œuvre un programme BCRD comprenant trois grands volets (Fig. 3). Tout d'abord l'étude des mécanismes de protection contre les perturbateurs de la fonction endocrinienne (PE) au niveau testiculaire (Fig. 3A). Puis, la mesure de l'effet des PE sur le développement et la reproduction avec une attention particulière pour le testicule embryonnaire (Fig. 3A). Enfin, le développement d'un test de toxicité dose-réponse des PE permettant de discriminer l'effet perturbateur endocrinien de l'effet hormono-mimétique (Fig. 3B).

Grâce à la méthode mise en point, il a pu être montré que l'exposition aux PE entraînait une diminution de l'expression des gènes codant pour une protéine de résistance aux xénobiotiques (isoforme multi-drug-resistance *mdr-1a*) fragilisant ainsi certaines défenses intrinsèques de la barrière hémato-testiculaire. Cependant, de façon concomitante, une autre isoforme de ces gènes de résistance aux xénobiotiques montre une augmentation de son expression. Ceci suggère que les défenses intrinsèques de la barrière hémato-testiculaire semblent régulées après exposition aux PE.

Les outils de la recherche

Depuis 2001, l'équipe de toxicologie de la reproduction s'est dotée d'outils d'analyse de pointe. Le programme sur les éthers de glycol a permis de valider l'utilisation d'un analyseur des caractéristiques spermatozoïdaires assisté par ordinateur : le CASA (Computer Assisted Sperm Analysis) de chez Hamilton Thorne. Grâce à cet outil, il est possible de gagner un temps important dans l'évaluation des caractéristiques spermatozoïdaires de 3 générations de rats mâles. L'assistance par ordinateur permet de standardiser les mesures contribuant ainsi à l'acceptation de notre article sur le PGME. Une plate-forme d'outils de biologie moléculaire a également été développée. Elle permet d'amplifier les gènes cibles des perturbateurs de la fonction endocrinienne (Mastercycler®, Eppendorf), de suivre l'expression de ces gènes en temps réel

FIGURE 3A.

Rôle des P-glycoprotéines dans la résistance aux atteintes des PE

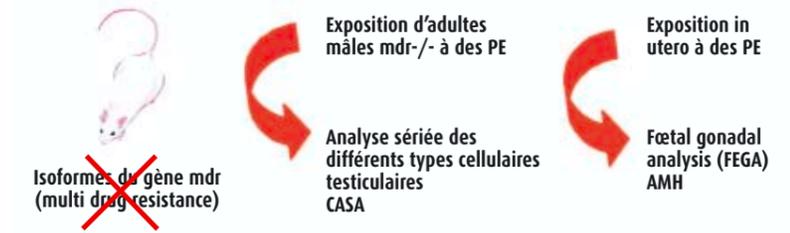
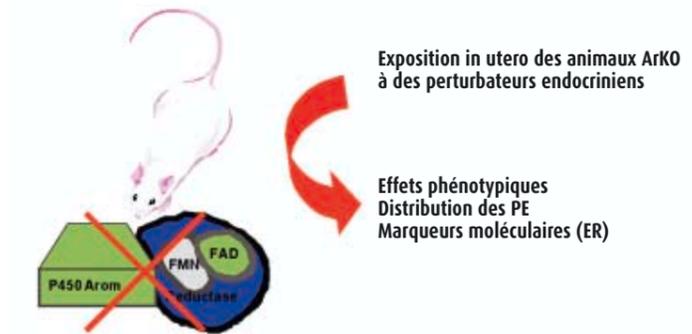


FIGURE 3B.

ArKO : nouveau modèle animal pour l'effet hormono-mimétique des PE



Approche des effets des perturbateurs de la fonction endocrinienne sur la reproduction. A) Étude des systèmes intrinsèques de défense du testicule vis-à-vis des xénobiotiques. B) Utilisation du modèle animal aromatase knock out pour distinguer les effets estrogéniques des effets anti-androgéniques.

(Light Cycler®, Roche) et maintenant de lire des séquences d'ADN et de caractériser leur état de méthylation (Pyrosequencing®, Biotage). La partie *in vivo* de la thématique n'est pas en reste. Un développement en collaboration avec l'Institut Supérieur d'Agriculture de Beauvais (ISAB) porte actuellement sur une plate-forme d'animalerie expérimentale (ANIMEX).

▶ ▶ ▶ suite page 32

ANIMEX
en cinq points clés

Partenaire industriel : ANIMEX bénéficie déjà de l'implication de l'INERIS dans son activité commerciale et industrielle de prestations de services, en particulier auprès des entreprises du secteur agro-industriel. Trois organismes de recherche de la région (UTC, UPJV, Biobanque de Picardie) ont d'ores et déjà indiqué leur intérêt pour ce projet.

Taille critique : ANIMEX est une plateforme à deux pôles (INERIS et ISAB) pour un coût total estimé aux alentours de 6 M€.

Marché potentiel : les études réglementaires de toxicologie, notamment dans le cadre du règlement REACH, vont nécessiter des adaptations pour l'expérimentation animale (animaux transgéniques, couplage biologie moléculaire - méthodes *in vivo*, types d'exposition en relation plus étroite avec les situations humaines comme les expositions chroniques par inhalation, expositions à des microorganismes pathogènes, etc.).

Recherche publique : ANIMEX souhaite développer une recherche publique de haut niveau basée sur les financements du Budget Civil de Recherche et Développement (60 %). À titre d'exemple, des programmes de recherche ont déjà été lancés sur les pesticides et leur impact sur la reproduction. L'INERIS et l'ISAB souhaitent déposer, en partenariat avec l'UPJV, un projet sur les produits de la réaction de Maillard dans l'alimentation auprès d'IBFBio.

Recherche privée/impact international : ANIMEX, c'est également une opportunité de transformer des activités

commerciales en études de Recherche et Développement financées par les industriels (40 %). Ce type d'étude pourrait profiter du financement de partenaires régionaux comme cela s'est déjà fait (commande du CETIM : une étude de toxicologie par inhalation) mais également nationaux et surtout européens. En effet, les nouveaux outils du 6^e et du 7^e PCRD donnent l'opportunité de déposer des projets à titre d'infrastructure, mais également de coopération avec les industries (COLT en préparation avec le Syndicat International du Traitement de Surface).

Références

Perturbateurs de la fonction endocrinienne et santé : un point non exhaustif sur les connaissances. Sophie Desmots, Catherine Brulez, Emmanuel Lemazurier. *Soumis à Environnement, Risques et Santé*, 2005 ; vol. 4, n° 3, pp. 195-204.

Expression of both Mrp1 and Mdr1a genes, two members of the ABC transporter family, is regulated by estrogenic environmental pesticide methoxychlor. Desmots S., Lecomte A., Robidel F., Bois F.Y., Lemazurier E. *Soumis à Toxicology and Applied Pharmacology*.

Rôle de la P-glycoprotéine dans le passage de la barrière hémato-testiculaire par les perturbateurs endocriniens. Sophie Desmots, Emmanuel Lemazurier. *Journées École Doctorale ABIES, Institut National d'Agronomie, Paris-Grignon (INA-PG)*, novembre 2003.

Rôle de la P-glycoprotéine dans le passage de la barrière hémato-testiculaire par les perturbateurs endocriniens. Sophie Desmots, Emmanuel Lemazurier. *Congrès "Génomique, expression de gènes"*, Institut Pasteur, Paris, mai 2003.

Mécanisme de la toxicité de l'éthylène glycol méthyl éther (EGME) et des isomères du propylène glycol méthyl éther (PGME) sur la reproduction et le développement. Emmanuel Lemazurier, Luc Multigner, Anthony Lecomte, Franck Robidel, Frédéric Y. Bois. *Environnement, Risques et Santé*, 2003 ; volume 2, n° 2, mars.

Propylene glycol monomethyl ether. A 3-generation study of isomer β effects on reproductive and developmental parameters in rats. Emmanuel Lemazurier, Anthony Lecomte, Franck Robidel, Frédéric Y. Bois. *Toxicology and Industrial Health*, 2005 ; vol. 485, n° 4, pp. 304-320.

La pollution atmosphérique modifie-t-elle le pouvoir allergisant du pollen de graminées?

GHISLAINE LACROIX, FRANÇOISE ROGERIEUX

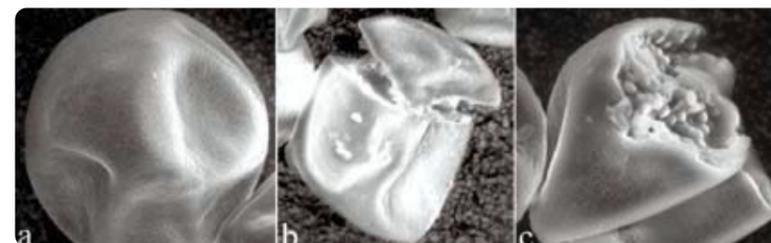
L'allergie est un problème de santé majeur dans la plupart de nos sociétés développées. Il est unanimement reconnu que la prévalence de certaines allergies augmente depuis plusieurs dizaines d'années dans de nombreux pays industrialisés. Les causes de cette augmentation sont encore inconnues, mais, en raison de la rapidité du phénomène, il est admis que des facteurs environnementaux plutôt que génétiques soient impliqués. Parmi ceux-ci, la pollution de l'air semble avoir un rôle non négligeable. Les polluants atmosphériques particuliers (en particulier les particules diesel) et gazeux (NO₂, O₃ et SO₂ notamment) sont des facteurs adjuvants connus de la réaction allergique respira-

toire. Ils exacerbent la nocivité des allergènes, dont celle des aéroallergènes extérieurs, représentés en majorité par les pollens. En plus de cet effet adjuvant, divers travaux ont montré que l'interaction pollens-polluants aboutissait également à une modification qualitative et quantitative des allergènes de pollens et à une agrégation des pollens avec les polluants particuliers.

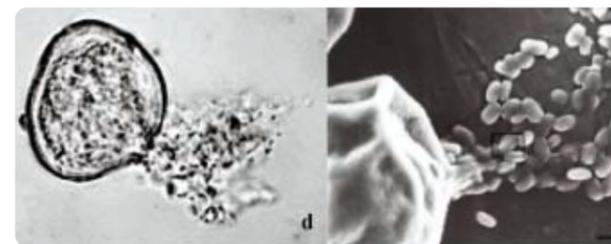
Durant trois ans, une étude a été menée par l'INERIS, en collaboration avec le centre de recherche RIVM aux Pays-Bas et le laboratoire Environnement et Chimie Analytique de l'École Supérieure de Physique Chimie Industrielle (ESPCI) à Paris, pour déterminer l'impact de la pollution gazeuse sur le potentiel allergisant des pollens de graminées. Au cours de cette étude, des grains de pollen de la fléole des prés ont été exposés durant 4 heures à différents polluants gazeux : l'ozone (O₃), le dioxyde d'azote (NO₂) et/ou le dioxyde de soufre (SO₂). L'observation, en microscopie électronique à balayage, des grains de pollens exposés a montré que ces polluants endommageaient la structure du grain de pollen, par exemple en provoquant des cassures et des éclatements de l'enveloppe (Photos a, b et c). Cet effet abrasif se traduit par une libération spontanée de granules intra-cytoplasmiques lors de l'exposition ou par une capacité plus importante du pollen à libérer son contenu au contact de l'eau (Photos d et e). Or, ces granules ainsi libérés dans l'atmosphère peuvent former un aérosol inhalable, et sont d'autant plus dangereux qu'à l'inverse des grains de pollen, ils peuvent pénétrer profondément dans les poumons en raison de leur petite taille (environ 3 µm contre 25-30 µm pour les pollens de graminées).

Au vu de l'importance potentielle des granules contenus dans le pollen, l'INERIS s'est intéressé à leur pouvoir allergisant chez le rat Brown Norway sensibilisé soit aux pollens entiers, soit aux granules intra-cytoplasmiques. Les travaux de thèse

☺ ☺ ☺ suite page 34



Grains de pollens intacts (a) ou endommagés à la suite de l'exposition à 50 ppm de NO₂ (b) ou 0,7 ppm d'O₃ (c). Microscopie électronique, X7500 (a), X3000 (b), X6000 (c).



Pollen expulsant ses granules, à la suite d'un contact avec l'eau. (d) : microscopie optique, X400, (e) : microscopie électronique, X5000.

aux pollens entiers, soit aux granules intra-cytoplasmiques. Les travaux de thèse d'Alexandre Motta ont montré que ces granules possèdent un pouvoir allergisant au moins équivalent au pollen entier. En effet, les allergènes présents dans le grain de pollen se retrouvent dans les granules, et ils sont capables, à eux seuls, d'induire une réaction allergique de type asthmatique chez ce modèle animal d'allergie. D'un point de vue épidémiologique, ces granules ont été mis en cause dans des épisodes épidémiques d'asthme associés à de violents orages pendant la saison de pollinisation. Le mécanisme proposé de ce phénomène est la libération des granules dès le début de l'orage par contact des pollens avec les premières gouttes de pluie. Ils sont alors emportés par les vents violents et transportés à l'avant du front de l'orage sur une zone pouvant atteindre 1 km de hauteur, tandis que les pollens sont, quant à eux, lessivés par la pluie. Ces granules en grande quantité forment un "nuage" dans lequel une personne asthmatique sera susceptible de développer plus facilement une crise d'asthme. En conclusion, cette étude a mis en évidence un mécanisme par lequel la pollution de l'air pourrait expliquer, au moins en partie, l'augmentation de la fréquence des allergies respiratoires induite par le pollen. La fragilisation de l'enveloppe du grain de pollen par les polluants entraînerait une libération plus importante des granules cytoplasmiques dans l'atmosphère. Ces granules se comportant, d'un point de vue allergénique, comme des "pollens miniatures", peuvent alors être à l'origine d'un risque épidémiologique accru pour les allergies respiratoires. ●

LES GRANULES INTRAPOLLINIQUES À L'ORIGINE D'UNE EXACERBATION DES ALLERGIES RESPIRATOIRES ?

Références

■ Motta A. (2004) Effet de polluants atmosphériques gazeux sur l'allergénicité du pollen de *Phleum pratense* et sur la réponse allergique respiratoire. Thèse de doctorat, Université Paris VII, soutenue le 9 novembre 2004.

■ Motta A., Peltre G., Dormans J.A.M.A., Withagen C.E.T., Lacroix G., Bois F. and Steerenberg P.A. *Phleum pratense* pollen starch granules induce humoral and cell-mediated immune responses in rat model of allergy. *Clinical Experimental Allergy*, 2004, 34, 310-314.

■ Motta A., Dormans J.A., Peltre G., Lacroix G., Bois F.Y. and Steerenberg P.A. (2004) Intratracheal instillation of cytoplasmic granules from *Phleum pratense* pollen induces IgE- and cell-mediated responses in the brown norway rat. *International Archives of Allergy and Immunology*, 2004, 135, 24-29.

■ Motta A.C., Marlière M., Peltre G., Steerenberg P.A., Bois F.Y., Lacroix G. Effects of gaseous traffic-related pollutants on release of allergens-containing cytoplasmic granules from grass pollen. Soumis à *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

■ Motta A.C., Rogerieux F., Marlière M., Robidel F., Steerenberg P.A., Peltre G., Bois F.Y., Lacroix G. Effects of gaseous air pollutants on pollen allergenicity in a rat model. Soumis à *Allergy*.

Évaluation des risques et décision sanitaire



L'évaluation des risques est au cœur de la problématique de gestion du risque chimique. Pendant très longtemps les risques chimiques n'ont été considérés que du point de vue de la toxicité aiguë. Il a fallu attendre l'ouvrage de référence de l'Académie des Sciences des États-Unis en 1983 pour que soit défini un nouveau paradigme pour évaluer le risque chronique. Celui-ci fait apparaître une phase spécifique, l'évaluation des risques, qui est une phase d'interprétation des données, intermédiaire entre la phase de recherche (génération de données) et la phase de gestion du risque (utilisation des données). Cette phase d'évaluation des risques se décompose en quatre opérations :

- ⊕ l'identification du danger
- ⊕ l'évaluation de la relation dose-effet
- ⊕ l'évaluation de l'exposition
- ⊕ la caractérisation des risques

Ce paradigme a été confirmé en 1994 dans l'ouvrage « Science and Judgment in Risk Assessment ». Il a été repris par l'Union Européenne en 1993 et 1994 dans les textes organisant l'évaluation des risques pour les substances existantes et

3 DISCIPLINES SCIENTIFIQUES DE BASE DE L'ÉVALUATION DES RISQUES : ÉPIDÉMIOLOGIE, TOXICOLOGIE ET EXPOLOGIE

nouvelles. C'est cette démarche qui sert de base à la mise en œuvre du règlement REACH, actuellement en cours de discussion au parlement européen.

Cette démarche permet aujourd'hui de mieux gérer le risque chimique, mais elle présente encore des faiblesses sur de nombreux points :

- ⊕ Le manque de données de base est considérable. La base la plus complète (la base IRIS de l'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis) ne regroupe les données que de 600 substances, alors qu'il existe 1800 substances dites HPV (High Production Volume) substances produites ou importées à plus de 1000 tonnes en Europe et 30 000 substances produites ou importées à plus de 1 tonne en Europe.
- ⊕ Des effets toxiques comme la perturbation du système endocrinien, dont on n'a pris conscience que récemment, ne sont pas pris en compte dans les données de base.
- ⊕ La coexposition est prise en compte de façon sommaire (additivité des effets).
- ⊕ Les facteurs de sécurité sont définis de façon empirique sans considération spécifique des différences de sensibilité des personnes.
- ⊕ Les lignes directrices permettant d'évaluer les risques n'existent pas pour tous les effets sanitaires.

Il y a donc nécessité de développer des programmes de recherche dans les trois disciplines scientifiques de base de l'évaluation des risques : épidémiologie, toxicologie et expologie (évaluation des expositions). La première discipline n'est pas développée à l'INERIS, mais les deux autres le sont. Même dans le domaine de la toxicité aiguë, les connaissances sont insuffisantes, d'où le développement du programme ACUTEX. Les études de toxicologie portent sur la toxicocinétique (étude du devenir des substances dans l'organisme) et la toxicodynamique (étude de l'effet des substances sur l'organisme). L'expologie est abordée dans des études visant à évaluer l'exposition de populations sensibles comme celle de l'enfant aux pesticides organophosphorés. ●

Modélisation des risques et décisions sanitaires

FRÉDÉRIC YVES BOIS, CÉLINE BROCHOT,
CHEIKH DIACK, SANDRINE MICALLEF

LINERIS développe une recherche méthodologique sur les outils de l'analyse des relations dose-réponse en toxicologie. Ces outils ont pour but d'améliorer la fiabilité des transpositions de l'animal à l'homme, de permettre l'analyse et l'intégration de données sur les biomarqueurs, d'aider à la prise de décision en présence d'incertitudes. Les priorités de cet axe de travail sont :

La toxicocinétique (étude du devenir des produits chimiques dans le corps)

Forts de notre expérience en modélisation toxicocinétique physiologique, nos programmes ont pour but de développer des modèles généraux applicables à la femme et à l'enfant, sur l'ensemble de leur vie ; d'explorer les applications de l'imagerie médicale à la toxicocinétique ; de proposer de nouvelles techniques de traçage. Les produits étudiés sont le butadiène, la caféine, le trichloréthylène, le tétrachloréthylène, et les nanomatériaux.

La toxicodynamique (étude des effets des toxiques)

Il existe une très forte demande en modélisation des relations dose-réponse, tant en France qu'au niveau international, et tant sur les aspects de toxicité aiguë que de toxicité chronique. Un programme BCRD en cours constitue le cœur méthodologique de plusieurs programmes plus appliqués (programme européen ACUTEX - par ailleurs décrit dans ce rapport, prestations pour les administrations). Dans ces programmes, les modèles complexes tiennent une part prépondérante pour inférer des effets aux niveaux intéressants pour la gestion. Une orientation complémentaire concerne la mise en place de passerelles entre la toxicologie et l'épidémiologie, via le développement de

biomarqueurs et la modélisation dose-réponse. Nous illustrons ici ces travaux par l'exemple d'une application de la modélisation toxicocinétique bayésienne à un problème de décision médicale. Le projet DIADEME ne concerne pas directement un contaminant de l'environnement, mais il offre une occasion unique d'accès à des informations de première main sur une population hypersensible : les enfants prématurés.

Projet DIADEME

Les nouveau-nés prématurés présentent à la naissance un certain nombre de déficits physiologiques en raison de leur immaturité. En particulier, des pauses respiratoires (apnées) surviennent de façon spontanée et fréquente. Pour réduire l'occurrence de ce phénomène, un traitement par la caféine est administré à près d'un tiers d'entre eux. Ce traitement dure parfois plusieurs semaines et n'est pas sans conséquences, notamment sur le sommeil, le métabolisme, la diurèse, ou la prise de poids.

Les spécificités de la pharmacocinétique de la caféine chez le nouveau-né imposent des régimes thérapeutiques tout à fait particuliers. Cependant, malgré des protocoles d'administration de la caféine bien établis, les concentrations plasmatiques et, par conséquent, les effets physiologiques observés sont très variables selon les nouveau-nés. Une surveillance étroite de la concentration de caféine dans le sang (caféinémie) s'impose donc, mais il est également nécessaire de limiter les prélèvements sanguins chez ces enfants. La marge de manœuvre des cliniciens est donc faible.

L'objectif de ce programme de recherche, subventionné par le ministère de la Recherche dans le cadre de l'Action Concertée Incitative Technologie-Santé, est de développer un outil d'aide au

traitement des apnées du nourrisson par la caféine. Ce logiciel, disponible en ligne via Internet, est basé sur des concepts statistiques bayésiens, et il permettra d'individualiser le traitement de patients sur la base de données historiques et de données issues du suivi thérapeutique des patients.

Pour mieux juger de l'opportunité de traiter et pour optimiser les dosages individuels, le développement du logiciel intègre les résultats de travaux spécifiques sur la pharmacologie de la caféine dans le traitement des apnées et des autres effets physiologiques. Ce travail comporte deux étapes :

- ④ Développement et ajustement d'un modèle pharmacocinétique physiologique pour la caféine chez le nouveau-né, sur la base d'un suivi de la population de patients au CHU d'Amiens et d'une modélisation statistique de la variabilité de la population.
- ④ Étude et modélisation pharmacodynamique des relations entre concentration plasmatique, temps, et réponses thérapeutiques désirables (amélioration de la respiration) ou indésirables (altération du sommeil, etc.).

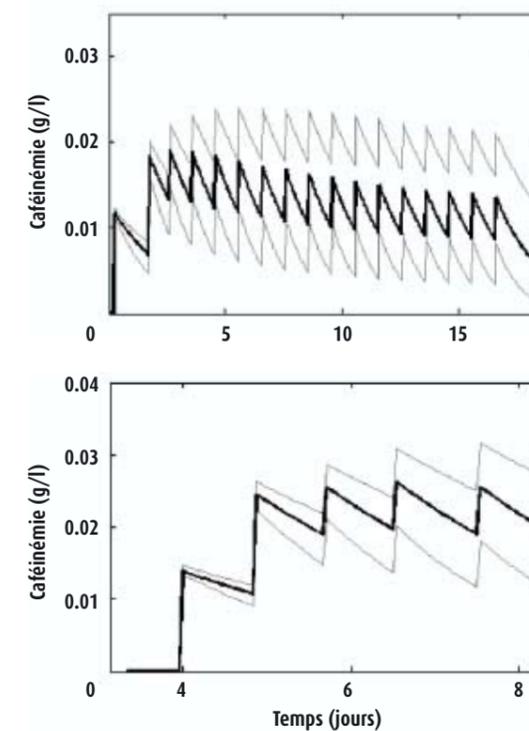
Les modèles de pharmacocinétique de la caféine, chez le nourrisson ou le prématuré, publiés jusqu'à présent ne sont pas satisfaisants. Le nouveau-né y est décrit de façon statique, alors que sa physiologie et son anatomie sont en pleine évolution. Pour améliorer cet état de fait, l'INERIS a mis au point un modèle dynamique de la pharmacocinétique de la caféine chez le nourrisson. Ce modèle prend en compte l'évolution continue de la masse corporelle et du métabolisme de la caféine dans les semaines qui suivent la naissance. Le modèle a ensuite été ajusté et vérifié à l'aide des données de caféinémie et d'évolution de la masse corporelle obtenues au CHU d'Amiens au cours des deux dernières années. Le modèle donne une prévision individualisée de la caféinémie compte tenu du traitement administré (Fig.1). Le modèle, et le logiciel correspondant, sont en cours de validation par les pédiatres du CHU d'Amiens.

Ce travail de construction du modèle a été présenté lors de séminaires et conférences scientifiques. Un article sur la méthodologie d'analyse bayésienne de données toxicocinétiques a été publié. Une procédure de mise à jour des paramètres du modèle sur la base de nouvelles données collectées au cours du traitement d'un individu a également été proposée. Cette mise à jour séquentielle est beaucoup plus rapide que les mises à jour classiques.

À l'aide de méthodes d'optimisation développées en collaboration avec l'ENGREF et le CEREMADE, le modèle permet d'optimiser le traitement des prématurés par la caféine par :

- ④ la construction d'une stratégie de mesure de caféinémie conduisant à un maximum d'information sur la conduite future à tenir,
- ④ la définition de la concentration de caféine à administrer, compte tenu des caractéristiques physiologiques de l'enfant, et de façon à assurer le maintien de la caféinémie de l'enfant dans un intervalle efficace et non toxique. ●

FIGURE 1.



Prédiction de la concentration sanguine de caféine au cours du traitement pour deux enfants. 20 mg/kg de caféine sont administrés le premier jour puis 5 mg/kg tous les jours à partir du troisième jour de traitement. Le trait gras correspond à la moyenne des prédictions et les traits fins à un intervalle de crédibilité à 90 %.

Références

- Amzal B., Bois F., Parent E., Robert C.P. Bayesian optimal design via interacting MCMC, accepté au Journal of the American Statistical Association.
- Amzal B., 2004 Bayesian Optimal design via interacting MCMC. Congrès international "ISBA meeting" organisé par l'International Society of Bayesian Analysis, à Vina del Mar, Chili, Mai 2004.
- Amzal B., 2004 Optimisation bayésienne de décisions et de plans d'expérience par algorithmes particuliers. Thèse de doctorat : Université de Paris-Dauphine, Décembre 2004.
- Brochet C., Marchand S., Couet W., Gelman A., Bois F., 2004 Extension of the isobolographic approach to interactions studies between more than two drugs: illustration with the convulsant interaction between pefloxacin, norfloxacin and theophylline in rats, Journal of Pharmaceutical Sciences, 93:553-562.
- Chiu W.A., Bois F.Y. Population pharmacokinetic analysis of aggregated data using a hierarchical Bayesian approach, soumis au Journal of the American Statistical Association.
- 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, soumis au Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics.
- Micallef S., Bois F. Application des modèles physiologiques à l'analyse de données toxicocinétiques, Journal de la Société Française de Statistique, 2004, tome 145, n°3, pp. 15-32.
- Micallef S., Brochet C., Bois F.Y., 2005 L'analyse statistique bayésienne de données toxicocinétiques, Environnement, Risques et Santé. 4: pp. 21-34.

Projet européen ACUTEX

ANNICK PICHARD

Le projet ACUTEX (Acute Exposure) est un projet de recherche financé sur trois ans par la Commission européenne dans le cadre du 5^e PCRD. Coordonné par l'INERIS, il s'achève à la fin de l'année 2005. L'objectif du projet ACUTEX est de développer une méthodologie européenne permettant de fixer des seuils de toxicité aiguë (A.E.T.Ls - Acute Exposure Threshold Levels) en cas d'émission accidentelle de substance dangereuse à partir d'une Installation Classée. Ces seuils d'effets toxiques sont utilisés pour définir des zones de sécurité dans le cadre de la maîtrise de l'urbanisation et la mise en place de plans de secours d'urgence. Enfin, ACUTEX entre dans le domaine d'application pratique de la Directive Seveso II. Il doit accélérer la mise en place harmonisée de cette directive et améliorer la qualité et la pertinence des études de dangers.

Le projet se déroule en deux phases essentielles :

⊕ Le développement de la méthodologie en s'appuyant sur les méthodologies européennes (France - UK - NL) et américaines existantes tout en y introduisant des éléments innovants comme les travaux de modélisation.

⊕ La validation de la méthodologie par la détermination de seuils de toxicité aiguë à partir de l'étude de 21 substances dangereuses.

21 SUBSTANCES À EXAMINER POUR LA VALIDATION DE LA MÉTHODOLOGIE.

Outre la coordination du projet, l'INERIS a la responsabilité de deux groupes de travail. L'un concerne le développement de la méthodologie et sa validation, le second s'intéresse à la modélisation de la relation dose - effet.

État d'avancement

Au début de la troisième année du projet, les travaux des différents groupes de travail discutés au sein du Consortium Scientifique et commentés par un « Critical Review Panel » (experts, représentants des Autorités Compétentes et de l'Industrie Chimique) ont permis la rédaction d'un premier projet de la méthodologie permettant de déterminer des seuils de toxicité aiguë.

À ce stade, les points clés qui ont fait l'objet de travaux scientifiques et de débats sont :

⊕ La définition des trois niveaux de seuils de toxicité aiguë sur la base d'effets toxiques létaux, irréversibles, réversibles ainsi que la définition d'un « seuil d'alerte sensoriel ».

⊕ Le développement d'une procédure de sélection et de classement des substances chimiques à retenir dans le cadre de la gestion des risques. Les propriétés physico-chimiques et toxicologiques sont prises en compte ainsi que la demande des Autorités Compétentes en charge des études de dangers des Installations Classées Seveso. Cette procédure a permis de sélectionner 21 substances à examiner pour la validation de la méthodologie. Il s'agit de : l'acrylonitrile, l'allylamine, l'ammoniac, l'aniline, le disulfure de carbone, le chlore, le dichlorophényl isocyanate, l'oxyde d'éthylène, l'hydrazine, l'acide chlorhydrique, l'acide fluorhydrique, le sulfure d'hydrogène, le méthanol, le dioxyde d'azote, le phénol, le phorate, le phosphore, le trichlorure de phosphore, le propionitrile, le toluène diisocyanate et le nickel tétracarbonyl. Par ailleurs, une 22^e substance a été étudiée, il s'agit du styrène.

⊕ Une étude des propriétés toxicocinétiques et toxicodynamiques de quelques substances chimiques afin de définir plus précisément le degré de susceptibilité au sein de sous-populations sensibles.

L'identification des populations sensibles en cas d'exposition aiguë de courte durée par voie respiratoire montre que, pour les effets locaux (appareil respiratoire), les asthmatiques sont les plus sensibles. Pour les effets systémiques, ce sont les nouveau-nés qui sont les plus vulnérables.

⊕ Des travaux sur la modélisation des relations dose-réponse.

Une revue des modèles de toxicité systémique générale a conduit à la rédaction d'un rapport (« Modelling categorical toxicity data ») qui propose l'introduction de concepts toxicocinétiques pour une analyse plus robuste des relations dose-réponse. On a ensuite développé des modèles de type pharmacocinétique/pharmacodynamique (PK/PD) qui permettent le couplage entre les modèles dose-réponse empiriques et les modèles toxicocinétiques.

L'implémentation en langage C et sous interface Web de ces modèles a été développée. Un test intensif de ce logiciel au moyen des études de cas est en cours. Une méthode de vérification et de validation de ces modèles, dans le cadre statistique bayésien, sera bientôt disponible.

La validation, ou tout au moins la vérification de l'adéquation des modèles aux données, est une nécessité, car tous ces modèles ont une forme fonctionnelle fixe. Pour tenir compte de l'incertitude sur la forme des modèles, un modèle semi-paramétrique de relation dose-réponse a été développé et un article scientifique est en cours de rédaction.

Le problème du choix du meilleur modèle parmi ceux qui sont disponibles se pose naturellement. Un tel choix est facilité par une évaluation de l'incertitude totale liée à un modèle donné. Un article sur l'analyse d'incertitude pour l'évaluation des risques a été rédigé dans le cadre d'un ouvrage paru en 2005. La validation de la méthodologie du premier projet est en cours et s'effectue par la détermination de seuils de toxicité pour les 21 substances chimiques qui ont été retenues.

À ce stade, plusieurs points font également l'objet de débats et de discussions :

⊕ La validation des logiciels mis au point par l'INERIS.

⊕ L'utilisation des facteurs d'incertitude. Enfin, en parallèle des travaux scientifiques, un important effort de valorisation et de diffusion auprès des utilisateurs finaux a été effectué par la rédaction d'une brochure descriptive du projet, la mise à disposition d'informations sur le site Internet (www.acutex.info) et la réalisation de séminaires, notamment dans le cadre de conférences telles que celle de la Society for Risk Analysis (SRA) qui s'est tenue à Paris en novembre 2004. ●

Références

■ M Wood, A Pichard, U Gundert-Remy, and C de Rooij
Acutex: A European research project to develop a methodology for acute exposure values. *Journal of Hazardous Materials* (en cours).

■ F. Y. Bois, C. Diack
Uncertainty analysis: the Bayesian approach in "Quantitative Methods for Cancer and Human health Risk Assessment" Edler L. and Kitsos C.P., Eds. Wiley, 2005.

■ C. Diack, F.Y. Bois
Pharmacokinetics pharmacodynamics models for categorical toxicity data. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2005, vol. 41, pp. 55-65.

■ C. Diack, F.Y. Bois
Dynamic survival models for mortality data (en cours).

■ Abraham K., Mielke H., Huisinga W., Gundert-Remy U. (2005)
Internal exposure of children by simulated acute inhalation of volatile organic compounds: the influence of chemical properties on the child/adult concentration ratio. *Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology*, vol. 96, 2005, pp. 242-243.

■ Mielke H., Gundert A., Abraham K., Gundert-Remy U. (2005)
Acute inhalative exposure assessment: derivation of guideline levels with special regard to sensitive subpopulations and time scaling, *Toxicology* (sous presse).

Liste des membres de la Commission Scientifique **RISQUES ACCIDENTELS**

(au 1^{er} janvier 2005)

ALAIN DESROCHES

Président de la Commission Scientifique Risques Accidentels
Expert, Chargé de mission « Gestion des risques et retour d'expérience »
Inspection Générale et Qualité
CNES

NEIL MITCHISON

Vice-Président de la Commission Scientifique Risques Accidentels
Bureau des Risques Majeurs
Institut pour la Protection et la Sécurité du Citoyen
Centre Commun de Recherche
ISPRA (IT)

JEAN BATTISTON

Chef du Bureau d'Analyse de Sécurité d'Installations
IRSN

JEAN-PIERRE BIGOT

Maître de recherche
Responsable de l'activité « Thermo-hydraulique et sécurité »
École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne

JEAN CHAPELAIN

Département Études et Recherche
INESC

DENIS DUVAL

Chargé de mission à la Sécurité Industrielle
TOTAL S.A.

DIDIER LACROIX

Directeur de la Recherche
Centre d'Étude des Tunnels (CETU)

JEAN-PIERRE LANGUY

Directeur du Département Sécurité/
Environnement/Sûreté
TECHNIP France

ANDRÉ LAURENT

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

ANNE LEPRINCE

Expert Risques Industriels
GAZ DE FRANCE

LAURENT MAGNE

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

JOHN ROBERT TAYLOR

Chief Consultant
Risk and Reliability
RAMBOLL (DK)

JACQUES VALANCOGNE

Responsable de l'Unité Maîtrise des Risques Système
RATP

RISQUES ACCIDENTELS

●● 42 Introduction

□□□□ 44

Maîtrise des risques à la source grâce à la sécurité intrinsèque

44 Secutech2 : prise en compte de la sécurité dans le développement des technologies de l'hydrogène (Lionel PERRETTE, Samira CHELHAOUI)

□□□□ 46

Maîtrise des risques à la source par une meilleure connaissance des phénomènes

47 Évaluation des conséquences d'un incendie d'entrepôt (Luc FOURNIER, Stéphane DUPLANTIER)
48 MECHEX : mise au point d'une méthode de prédiction du risque d'inflammation d'atmosphères explosibles par un frottement mécanique (Christophe PROUST)
51 Prédiction des effets dominos dans le cadre d'éclatements de capacités métalliques : résultats des essais et enseignements pour la maîtrise des risques (Frédéric MERCIER)

□□□□ 54

La gouvernance des risques dans le processus de prévention des risques technologiques

55 Analyse du processus de décision en gestion préventive des risques (Myriam MERAD)

□□□□ 57

Analyses d'accidents prenant en compte la composante organisationnelle

57 Apport de l'approche systémique et organisationnelle au retour d'expérience (Jean-Christophe LECOZE, Samantha LIM)
59 Investigation de l'accident de Billy-Berclau (Jean-Christophe LECOZE, Samantha LIM)

□□□□ 61

Maîtrise des risques

61 Bases de données de fiabilité des dispositifs de sécurité (Dominique CHARPENTIER, Brice LANTERNIER)

□□□□ 63

Dangers liés aux produits

63 Évaluation des matières dangereuses à l'aide du calorimètre de Tewarson (Guy MARLAIR)
66 Dangers du nitrate d'ammonium et des artifices de divertissement : des accidents récents qui justifient un examen approfondi du rôle joué par les scénarios d'incendie (Guy MARLAIR, Marie-Astrid KORDEK, Ruddy BRANKA)
68 Les produits chlorés utilisés pour le traitement de l'eau en piscine : une famille de produits aux dangers méconnus (Marie-Astrid KORDEK)

Intégration des savoirs et multidisciplinarité pour mieux évaluer et gérer les risques



La demande sociétale en matière de risques industriels a évolué ces dernières années, notamment du fait de la survenance des accidents de Enschede (2000), Toulouse (2001), Baia Mare (2002)... La société réclame de nouvelles approches d'évaluation et de gestion des risques plus précises et plus transparentes. En effet, les enjeux sont importants, tant sur le plan économique que sur le plan foncier. Répondre à cette demande nécessite aujourd'hui la mise en œuvre de recherches finalisées qui s'appuient sur des équipes composées de chercheurs de cultures différentes et formés dans les disciplines des sciences techniques comme dans celles des sciences humaines. Compte tenu des besoins exprimés dans le domaine des risques technologiques majeurs, notamment par la loi du 30 juillet 2003, les recherches menées en 2004 et 2005 se sont orientées principalement vers :

1) la production de connaissances sur les produits, les procédés et les phénomènes dangereux,

2) le développement de méthodes d'analyse et d'évaluation a priori des risques ou tenant compte des retours d'expérience de situations accidentelles comparables, 3) enfin, l'utilisation de l'expertise dans la gouvernance des risques et la communication avec les parties prenantes.

Ainsi, mieux connaître les risques repose sur une connaissance accrue des dangers présentés par les produits aux caractéristiques souvent méconnues - cas des produits chlorés pour piscines, illustré dans ce rapport - et nécessite d'enrichir les données disponibles sur les procédés en fonctionnement normal et en cas de dysfonctionnement. Ces connaissances associées à l'emploi de méthodes d'évaluation des risques constituent une base solide pour construire une bonne représentation d'un système socio-technique industriel.

La connaissance du comportement des produits dans les différentes étapes de leur cycle de vie reste trop souvent approximative et le recours à des techniques pointues comme celle utilisant le calorimètre de Tewarson permet de mieux identifier les impacts chimiques et thermiques. Dans le cadre des nouvelles technologies, telles que les futures applications de l'hydrogène comme carburant ou les matériaux nanostructurés, l'INERIS a entrepris de développer un socle de connaissances permettant d'analyser les risques potentiels liés à l'utilisation de ces technologies avant qu'elles n'atteignent les phases de développement commerciales. Par exemple, pour l'hydrogène, les chercheurs de l'INERIS ont analysé les risques liés au stockage et à l'utilisation de ce carburant à l'aide d'essais en vraie grandeur.

Sur le plan méthodologique, le choix de méthodes d'analyses de risques adaptées et reconnues est un point clef pour apprécier le niveau de risques et optimiser leur maîtrise. La finalisation du projet européen ARAMIS, présenté dans le rapport scientifique 2002-2003, a montré la capacité d'un consortium européen, regroupant 12 États membres, à proposer des outils opérationnels pour l'évaluation



Transport de matière dangereuse.



Inflammation d'une fuite de gaz.

des risques majeurs en partant de concepts spécifiques issus des sciences de l'ingénieur et des sciences humaines.

Démontrer la robustesse d'un système ne peut se faire qu'en mettant en œuvre une approche structurée qui s'appuie sur l'identification claire des fonctions de sécurité et sur lesquelles des exigences sont fixées selon les enjeux. Ces fonctions sont assurées par des équipements, des dispositions organisationnelles et des hommes. Il est nécessaire de disposer de données sur chacun de ces éléments pris isolément mais également assemblés pour assurer la fonction de sécurité : le niveau de sécurité d'une fonction est toujours limité par le niveau de son élément le moins fiable. La cohérence entre les dispositifs techniques, les dispositions organisationnelles et les actions humaines est nécessaire pour construire une maîtrise robuste des risques. L'INERIS a ainsi développé des outils méthodologiques pour évaluer de manière homogène cette cohérence, associés à des approches plus spécifiques adaptées aux dispositifs techniques ainsi qu'à la dimension humaine et organisationnelle. Ce rapport présente les résultats de recherches dans le domaine des dispositifs techniques et également les développements menés sur les méthodes d'analyse d'accidents.

Le retour d'expérience vu dans l'objectif de formaliser un état de l'art et d'enrichir les connaissances sur la robustesse et la mise en évidence des limites des

systèmes industriels actuels est encore insuffisamment utilisé. Pour ce faire, il faut appréhender un système avec une vision plus socio-technique afin de pouvoir mieux le contextualiser. Les travaux de l'INERIS sur ce thème montrent l'intérêt de telles approches à travers l'analyse des accidents.

Enfin, la démonstration de la maîtrise des risques est un sujet complexe mais essentiel pour bâtir un dialogue constructif entre les industriels et l'inspection mais également pour construire une communication transparente avec l'ensemble des acteurs sociaux. La communication sur les risques, souvent sous-estimée, n'est pas uniquement une phase consécutive à l'évaluation des risques. Étape délicate, elle nécessite la mise en place, dans le cadre de processus de concertation, des forums d'échanges. Elle doit également s'inscrire dans un ensemble cohérent de gouvernance des risques. Des expériences aux niveaux national et européen acquises dans d'autres secteurs, tels que le nucléaire, les déchets, l'implantation des aéroports, ont pu être valorisées dans le cadre de la concertation sur les risques industriels. Les travaux de l'INERIS dans ce domaine ont permis de mieux comprendre le positionnement des acteurs, leurs attentes et leurs contraintes dans des processus de décision vis-à-vis des risques de plus en plus participatifs. De ce fait, les évaluations répondront mieux aux attentes des gestionnaires des risques.

Pour relever ces défis scientifiques, les équipes travaillant dans le domaine des risques accidentels, essentiellement techniques jusqu'à un passé récent, se sont renforcées de profils nouveaux de chercheurs en sciences humaines et sociales. De plus, compte tenu de la volonté de l'Institut d'être un acteur majeur dans la création de l'espace européen de la recherche, une stratégie de partenariats nationaux et européens a été déployée pour ancrer ses travaux aux plans communautaire et international.

Par ailleurs, la confrontation des connaissances à la réalité dans le cadre d'observations, d'expérimentations *in situ* ou d'essais en grand est une source essentielle de questionnement pour les chercheurs. Cette confrontation permet de mieux appréhender les limites des approches de modélisations. C'est pourquoi, en 2004, les chercheurs de l'Institut se sont mobilisés pour promouvoir les activités expérimentales dans leurs travaux de recherche et d'expertise. Enfin, un effort important a été développé par les chercheurs pour transférer et partager les fruits de leur recherche. Ainsi, le nombre de publications et communications dans ce domaine a été doublé entre 2003 et 2004. ●

**AINSI, MIEUX CONNAÎTRE
LES RISQUES REPOSE SUR UNE
CONNAISSANCE ACCRUE DES
DANGERS PRÉSENTÉS PAR LES
PRODUITS AUX CARACTÉRISTIQUES
SOUVENT MÉCONNUES**

Maîtrise des risques à la source grâce à la sécurité intrinsèque



La croissance des besoins énergétiques satisfaits par l'utilisation de sources non renouvelables (énergies fossiles) devrait accentuer le phénomène planétaire du réchauffement climatique. Le secteur de l'énergie (transport, bâtiment...) est le contributeur principal des émissions de gaz à effet de serre. La transformation de ce secteur s'impose afin d'enrayer les conséquences de l'activité humaine sur le climat. Des innovations technologiques et des changements de paradigmes énergétiques se révèlent nécessaires. Le recours à l'hydrogène comme vecteur d'énergie obtenue par des procédés respectueux de l'environnement s'est imposé comme l'une des clés futures de la transformation du secteur de l'énergie. L'hydrogène présente, d'une part, l'intérêt de la flexibilité de sa production puisqu'il peut être produit à partir de toutes les sources primaires d'énergie et, d'autre part, celui d'une conversion énergétique sans émission polluante notable.

Ce gaz peut être utilisé de façon efficace et propre dans les piles à combustible. En revanche, des verrous technologiques subsistent : il faut disposer de piles à combustibles peu chères et fiables, et aussi définir, dans le secteur des transports, des moyens embarqués de stockage sûrs et assurant une autonomie comparable à poids et volume égaux à ceux des réservoirs actuels.

Convaincu que la maîtrise des risques à la source ne peut que favoriser l'émergence des nouvelles technologies d'utilisation de l'hydrogène et leur acceptation par le public, l'INERIS a engagé, dès 2002, des réflexions sur ce thème. Ses travaux de recherche ont permis de mieux cerner les risques des procédés de fabrication et d'utilisation de l'hydrogène pour des applications mobiles ou stationnaires et d'apporter des réponses concrètes aux concepteurs pour développer des systèmes intrinsèquement plus sûrs. Les résultats des recherches ont été valorisés dans l'élaboration de standards internationaux. Grâce à ses compétences dans ce domaine, l'INERIS est devenu partenaire du réseau d'excellence européen HySafe, et contribue à l'étude des nouveaux projets relatifs à la filière. Par ailleurs, pour augmenter la maîtrise des risques à la source par la conception de systèmes intrinsèquement plus sûrs, l'INERIS analyse les gains apportés par les principes d'intensification sur des procédés chimiques. ●

Secutech2 Prise en compte de la sécurité dans le développement des technologies de l'hydrogène

LIONEL PERRETTE, SAMIRA CHELHAOUI

Dans le cadre de ses travaux de recherche sur la maîtrise des risques liés à l'utilisation de l'hydrogène comme nouvelle source énergétique, l'INERIS s'intéresse notamment au comportement de réservoirs hyperbares soumis à diverses agressions mécaniques et thermiques. Un système de stockage hyperbare est normalement composé d'un ou de plusieurs réservoirs identiques équipés de systèmes

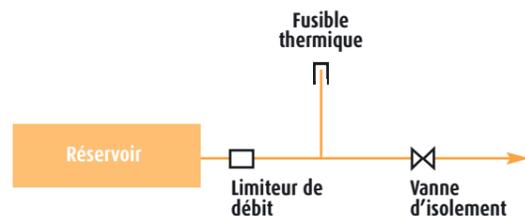


FIGURE 1. Schéma d'un stockage hyperbare et de ses équipements de sécurité.

de sécurité, à savoir une vanne d'isolement, un limiteur de débit, un ou plusieurs fusibles thermiques et éventuellement une soupape de surpression. La figure 1 illustre l'agencement de ces composants sur le réservoir.

L'INERIS a étudié d'abord la mesure du champ de concentration d'hydrogène dans une situation de fuite puis les agressions thermiques et mécaniques de réservoirs composites de 9 litres, sous 70 MPa.

Mesure du champ de concentration d'hydrogène dans une situation de fuite

On a simulé une rupture totale de la canalisation en aval du limiteur de débit (orifice de 0,35 mm de diamètre). Le champ de concentration induit par la décharge du jet d'hydrogène en champ libre a été mesuré. La figure 2 correspond à une décroissance hyperbolique de la concentration sur l'axe du jet. Elle indique qu'au-delà de 1,9 m de l'orifice, le mélange d'air et d'hydrogène n'est plus explosible. À titre indicatif, le volume de la partie explosible du jet est évalué à 20 litres.

Agressions thermiques et mécaniques des réservoirs

Six essais figurant différentes agressions thermiques et mécaniques ont été entrepris.

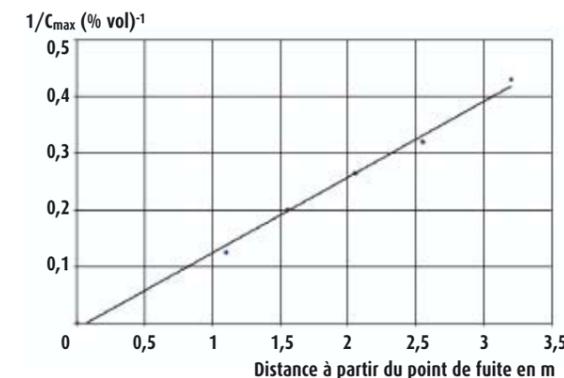


FIGURE 2. Variation de l'inverse de la concentration en fonction de la distance à partir du point de fuite (points de mesure et courbe linéarisée).

Ces essais et leurs résultats sont synthétisés dans la figure 3. Les résultats de ces deux types d'essais sont utiles à l'évaluation des risques des systèmes à hydrogène car ils ont notamment montré que la protection du réservoir par un fusible thermique n'est pas efficace lors d'une agression thermique localisée. Quant au fusible thermique lui-même, sa sollicitation lors d'un incendie doit être exceptionnelle compte tenu du jet enflammé qui peut accompagner la décharge du gaz. À partir de ces observations, deux axes de travail se dégagent : l'isolation thermique du réservoir et le pouvoir calorifique du véhicule.

Les programmes expérimentaux visant à évaluer le comportement des réservoirs lors d'agressions seront poursuivis notamment vis-à-vis de situations d'agression mécanique réalistes mais sévères. ●

Références

- Lionel Perrette, Samira Chelhaoui, David Corgier, Safety evaluation of a PEMFC bus, European Hydrogen Energy Conference, 2-5 septembre 2003, Grenoble, France.
- Jacques Chaineaux, Christophe Devillers, Pierre Serre-Combe Security of highly pressurised tanks equipping GH2 fueled road vehicles, EU contract n° 13461-97-11 F1ED ISP F; Topical report, septembre 2000.
- Nijs Jan Duijm, Lionel Perrette Safety issues of hydrogen as an energy carrier, Risoe Energy Report 3 – Hydrogen and its competitors, chapter 6.2 « Hydrogen Safety », 2004.

FIGURE 3. Liste des agressions appliquées aux réservoirs et résultats.

Type de gaz et pression initiale (bar) dans le réservoir	Type d'agression	Principales caractéristiques de l'agression	Résultats
Hydrogène - 700	Thermique	Jet enflammé impactant.	Éclatement du réservoir après 3 minutes.
Hydrogène - 700		Feu de flaque.	Non éclatement, ouverture du fusible thermique après 2 minutes. Vidange en 8 minutes. Jet enflammé de plusieurs mètres.
Hydrogène - 700	Mécanique	Cordeau détonnant placé à la périphérie du réservoir.	Éclatement et inflammation de l'hydrogène. Les effets de pression associés à l'inflammation sont négligeables devant la détente pneumatique du gaz.
Hydrogène - 700		Tir à balle.	Pas d'éclatement. L'hydrogène s'est vidangé par l'orifice créé par la balle. Pas d'inflammation.
Sans hydrogène. Rempli d'eau pour moitié.		Test de chute suivi d'un test hydraulique (CEA).	Pas d'éclatement. Rupture à 1000 bars à partir de la zone endommagée par la chute.
Azote - 700		Crash test (réservoir placé sur le pare-chocs d'un véhicule lancé à 65 km/h) suivi d'un test hydraulique (CEA).	Pas d'éclatement. Rupture à 1700 bars. Le crash test n'a pas modifié de manière significative la pression maximale de rupture.

Maîtrise des risques à la source par une meilleure connaissance des phénomènes

(couplage modélisation et expérimentation)

La réduction du risque à la source constitue depuis longtemps l'axe prioritaire de la politique globale de prévention des risques industriels en France et en Europe. Il s'agit, d'une part, de réduire les potentiels de danger d'un site industriel et, d'autre part, d'améliorer la maîtrise des risques en s'appuyant sur la complémentarité entre des mesures techniques et des mesures organisationnelles. Le choix et l'optimisation des moyens destinés à améliorer la sécurité sur un site industriel nécessitent une connaissance précise des dysfonctionnements des systèmes industriels et des phénomènes physiques susceptibles de survenir lors d'un accident industriel. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser trois approches complémentaires et indissociables :

- ⊙ l'analyse méthodologique pour connaître le système socio-technique et ses modes de défaillance ;
- ⊙ la modélisation numérique pour estimer les conséquences des accidents industriels ;
- ⊙ les essais expérimentaux pour mieux comprendre les phénomènes physiques, développer et valider des outils de calcul.

L'INERIS A POURSUIVI SES TRAVAUX DE RECHERCHE AVEC LA RÉALISATION D'ESSAIS EXPÉRIMENTAUX DANS LE DOMAINE DE L'INCENDIE, DE L'EXPLOSION ET DE LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES.

Les travaux de l'INERIS sur l'analyse méthodologique se sont concentrés sur le développement de méthodes intégrées d'évaluation des risques.

Ces méthodes analysent, pour chacun des systèmes socio-techniques, les situations à risques, l'impact des organisations et des barrières de sécurité sur le niveau de maîtrise des risques et, enfin, la vulnérabilité des cibles susceptibles d'être affectées par un accident.

En ce qui concerne les phénomènes physiques, l'INERIS a poursuivi ses travaux de recherche avec la réalisation d'essais expérimentaux dans le domaine de l'incendie, de l'explosion et de la résistance des structures.

Concernant l'incendie, un programme d'essais à petite échelle (au sein d'un rack), à moyenne échelle (plate-forme de 14 m²) a été mené de 2001 à 2004. Il a débouché sur le développement d'une méthode et d'outils destinés à déterminer les conséquences d'un incendie d'entrepôt. Suite à des modifications réglementaires notables en 2003, des industriels de la filière logistique se sont associés à ce programme de recherche pour cofinancer des essais à l'échelle 1 qui valideront complètement les outils développés pour en faire des outils de référence.

Dans le domaine des explosions, un programme de recherche a débuté en 2002 pour mieux caractériser les processus de dégradation d'énergie liés aux frottements mécaniques ainsi que les mécanismes de développement de flamme. Les travaux ont abouti à une méthode fiable pour évaluer le risque d'inflammation induit par des frottements mécaniques.

En ce qui concerne les effets dominos liés à l'éclatement de capacités, un programme expérimental terminé en 2005 a permis de développer un modèle qui décrit la rupture d'une capacité ainsi que ses effets dans l'environnement.

Les travaux expérimentaux actuels et futurs permettent d'apporter aux industriels et aux autorités de contrôle plus de précision quant à la maîtrise du risque industriel. ●

Évaluation des conséquences d'un incendie d'entrepôt

LUC FOURNIER, STÉPHANE DUPLANTIER

L'INERIS s'est engagé, depuis plusieurs années, dans une démarche de développement d'une méthode de référence au plan national pour déterminer les conséquences d'un incendie en entrepôt. Cette méthode doit remplacer celles employées actuellement qui reposent, en majeure partie, sur l'utilisation d'outils principalement dédiés à des feux de nappe, avec des hypothèses variant d'un expert à l'autre sans disposer de référence unanimement reconnue.

La démarche mise en œuvre par l'INERIS repose sur des approches numériques et expérimentales complémentaires et comporte les étapes suivantes :

- ⊙ Comprendre le développement de la combustion au sein d'un rack en réalisant des essais à petite échelle ainsi que des modélisations.
- ⊙ Réaliser des essais à moyenne échelle pour déterminer l'influence du facteur d'échelle ainsi que pour appréhender les mécanismes de propagation au sein d'un entrepôt.
- ⊙ Confronter les différentes méthodes utilisées par les experts nationaux (voire internationaux) et essayer de dégager un consensus le plus large possible pour définir une nouvelle méthode de calcul.
- ⊙ Valider la méthode avec un essai à l'échelle 1 et faire évoluer, le cas échéant, cette méthode après exploitation des résultats de cet essai.

La première étape s'est terminée en 2004. La partie expérimentale, qui faisait intervenir un seul rack, a permis de faire ressortir les points suivants :

- ⊙ Le paramètre « espacement vertical et horizontal » entre les charges combustibles (bûchettes) a une influence limitée sur la puissance de feu et son effet est suffisamment limité pour que le paramètre « espacement » ne soit pas considéré dans une modélisation simplifiée des feux d'entrepôts.
- ⊙ *A contrario*, l'étude expérimentale a

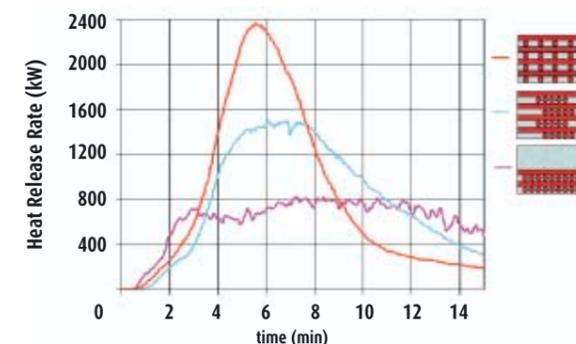


FIGURE 1.
Influence de la compacité sur la puissance libérée.

FIGURE 2 (A ET B).

Photographie d'un essai réalisé (A) et modélisation d'un incendie d'entrepôt (B).



démonstré que la puissance maximale dégagée par le feu est une fonction linéaire du nombre de niveaux dans la configuration étudiée.

- ⊙ De même, le paramètre « compacité » joue un rôle primordial dans l'évolution de la puissance de feu. Un très bon aérage des bûchettes (organisation des bûchettes sous forme de bûchers de bois) peut tripler la puissance maximale de feu (Fig. 1). Par ailleurs, des modélisations d'incendie d'entrepôt ont été réalisées à l'aide d'un outil de calcul 3D (FDS, développé par le

National Institute of Standards and Technology [NIST] aux USA). Un exemple de simulation numérique est donné sur la figure 2 (B). Les simulations avaient pour principal objet d'ajuster un outil de modélisation complexe sur une géométrie relativement simple avant de passer à des simulations de taille supérieure. La deuxième étape a débuté fin 2004 avec le soutien financier de l'AFILOG, consortium d'industriels du secteur de la logistique. Cette étape a consisté à réaliser des essais

⊙ ⊙ ⊙ *suite page 48*

de combustion de quatre racks contenant du bois (3,1 tonnes) sur une plate-forme de 14 m² de surface. La figure 2 (A) montre des essais réalisés en 2005, sur lesquels apparaissent des flammes discontinues au-dessus de chaque rack. Ont été mesurés en temps réel : la masse du plateau, les flux radiatifs ainsi que les températures à l'intérieur de la structure. Par ailleurs, des moyens vidéo ont été mis en œuvre pour estimer la hauteur des flammes lors des différentes phases de l'incendie. Outre le développement d'un outil de référence, il est important de noter que les résultats obtenus permettent de comprendre les modes de propagation d'un incendie au sein d'un entrepôt ou plus particulièrement au sein d'une cellule. C'est une donnée qui s'avère déjà très utile, notamment dans le cadre des études

d'ingénierie de la sécurité incendie (ISI), dont le nombre est appelé à croître dans un avenir proche. Les résultats de ces recherches s'appuient sur les travaux de thèse de P. Russo au sein du LCD (Poitiers) ●

Références

- Fournier L., Carrau A., Russo P., *Roof characterisation related to fire propagation risk by a numerical approach*, Fire and Materials Conference, San Francisco, janvier 2003.
- Wang H.Y., Russo P., Joulain P., Carrau A., *Risk assessment of a fire involving combustible materials in a warehouse*, in proceedings of the Fourth International Seminar Fire and Explosion Hazards, 8-12 septembre 2003.
- Patej S., Fournier L., Carrau A., *Experimental analysis of rack storage fires for a better understanding of warehouses fires*, Interflam 2004, Edimbourg, 5-7 juillet 2004.

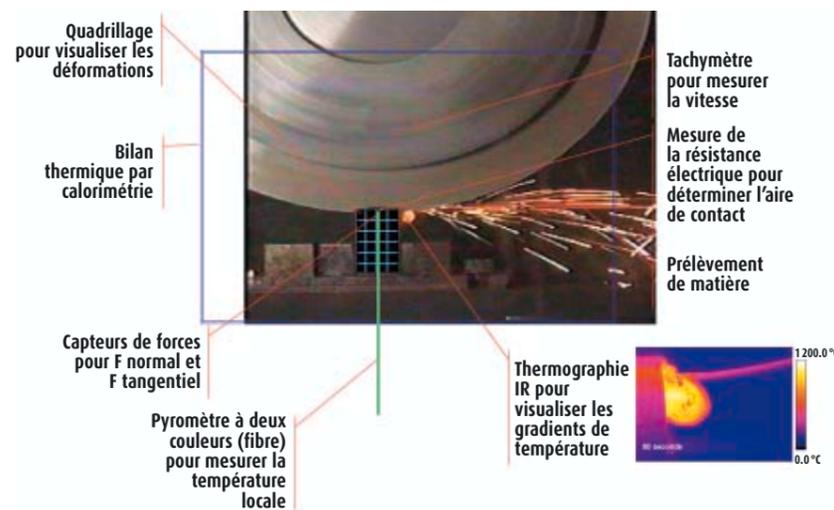
MECHEX

Mise au point d'une méthode de prédiction du risque d'inflammation d'atmosphères explosibles par un frottement mécanique

CHRISTOPHE PROUST

Les frottements d'origine mécanique sont l'une des causes principales d'inflammation des Atmosphères Explosibles (ATEX) dans l'industrie. Elles sont incriminées dans au moins un quart des situations accidentelles et cette tendance semble se maintenir au cours du temps. Cette situation proviendrait d'une large méconnaissance des mécanismes sous-jacents (Proust et Raveau, 2003a) et donc des paramètres sur lesquels il faut agir. Compte tenu d'une demande sociale vers plus de sécurité, relayée par une évolution de la réglementation (directives ATEX), les autorités européennes et les constructeurs de machines sont à la recherche d'une méthode suffisamment fiable pour évaluer le risque d'inflammation induit par un frottement mécanique. MECHEX, programme de recherche européen, a pour objectif premier l'étude du processus de dégradation de l'énergie mécanique en

FIGURE 1.



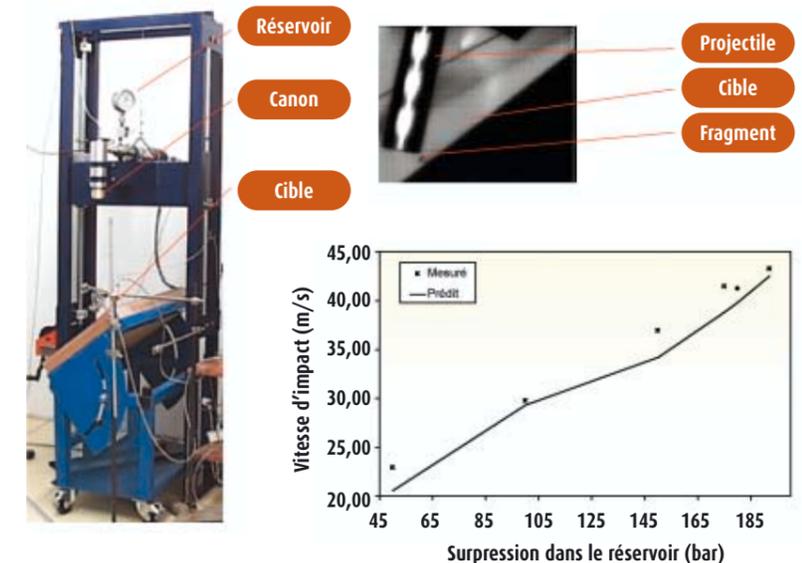
Installation de frottement continu (roue frottant sur un poinçon fixe maintenu dans un étai).

chaleur lors d'un frottement mécanique, d'une part, et l'examen des mécanismes d'inflammation de l'ATEX au contact de la zone de frottement, d'autre part. Ces travaux s'appuient largement sur le fonds documentaire existant, l'analyse théorique et l'expérimentation.

Au plan théorique, les chercheurs de l'INERIS sont parvenus à une description plus cohérente de la nature des frottements mécaniques, du mécanisme de dégradation de l'énergie mécanique en chaleur et des échanges thermiques associés (Proust et Raveau, 2003b, 2004). Ces phénomènes seraient retrouvés tant pour les frottements continus que pour les impacts. Par contre, dans ce dernier cas, l'on accède aux efforts dans la zone de contact par le biais de la théorie des ondes de pression qui se propagent dans les corps et assurent le rebond ou l'équilibre ultime des forces de contact. Par ailleurs, l'analyse détaillée des processus d'inflammation qui a été conduite suggère des liens étroits avec la physique de l'amorçage au contact d'une paroi chaude (Rivière, 2004).

Plusieurs techniques expérimentales innovantes ont été mises en place à l'INERIS (Proust et Raveau, 2003c, Hawksworth et al., 2004 a et b) pour vérifier ces points : un banc pour l'étude des frottements continus capable de réaliser simultanément des bilans de forces et d'énergie (Fig. 1), un « canon » à air pour propulser des projectiles avec précision jusqu'à plus de 50 m/s (Fig. 2), un dispositif de pyrométrie à deux couleurs à fibre optique pour mesurer les températures dans les zones de frottement, une technique de microcalorimétrie par mesure de pression aérienne pour mesurer les quantités de chaleur transmises à l'atmosphère pendant un impact (de l'ordre du millijoule), un dispositif

FIGURE 2.



Installation d'essai pour les impacts mécaniques (à gauche), exemple de visualisation à 4000 images/s de l'impact d'un rond d'acier de 18 mm (en haut à droite) et relation entre la vitesse d'impact et la surpression dans le réservoir du canon à air (courbes).

électrique de chauffage ultrarapide d'un ruban métallique (de 20 °C à 1400 °C en 50 µs : Fig. 3) pour simuler l'inflammation par un impact...

La comparaison expérience-théorie s'est avérée suffisamment favorable pour que des outils pratiques d'évaluation du risque soient constitués (Proust et Raveau, 2004). Ils utilisent comme point de départ, outre les propriétés d'inflammation des ATEX, les caractéristiques mécaniques du frottement (dimensions, vitesse, effort d'application...) et des données caractéristiques des matériaux (résistance ultime, point de fusion, conductibilité thermique...). Ils fournissent des seuils critiques d'inflammation en termes, par exemple, de puissance de frottement ou de vitesse d'impact. Sur cette base, une méthode globale, plutôt à destination des autorités est proposée, tandis que, pour l'expertise ou l'aide à la conception, des outils numériques plus fins ont été programmés.

Même si les objectifs semblent atteints, plusieurs aspects devront faire l'objet de

● ● ● suite page 50

◂ ◃ ◅ nouveaux développements plus appliqués aux problèmes quotidiens : il importe, en particulier, de proposer des textes normatifs raisonnables en concertation avec les autorités et les industriels, de vérifier que les outils de prédiction ne sont pas trop conservatoires par rapport à la réalité physique et aux applications technologiques. Des difficultés d'ordre scientifique restent à résoudre. En particulier, un champ relativement nouveau de processus d'inflammation a été mis en évidence pour les ATEX en contact avec des corps qui chauffent modérément pendant un bref laps de temps. Il conviendrait de continuer à l'explorer, la grande majorité des sources d'inflammation industrielles se situerait en effet dans ce domaine. ●

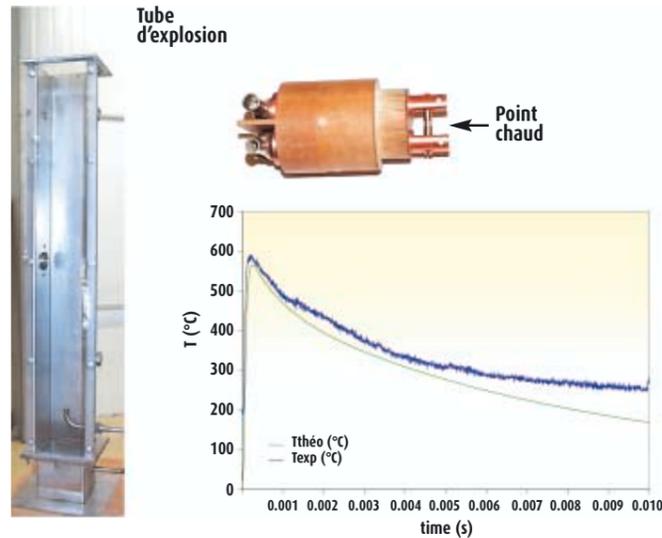


FIGURE 3. Appareillage d'inflammation par point chaud transitoire : la chambre d'explosion est un tube ouvert en haut long de 80 cm, rempli par balayage (à droite). Le point chaud est un ruban (en haut) brutalement chauffé par la décharge de condensateurs. La modélisation numérique a considérablement aidé la mise au point (courbes).

Références

- Carleton F, Bothe H., Proust Ch., Hawksworth S. (2000), *Prenormative Research on the Use of Optics in Potentially Explosive Atmospheres, Final Report, contrat européen SMT4-CT96-2104.*
- Proust Ch., Raveau D. (2003a), *Literature survey on mechanical impacts as a potential ignition source, Deliverable D1, March 2003, UE contract n°G6RD-2001-00553.*
- Proust Ch., Raveau D. (2003b), *Theoretical analysis of the effect of metallurgical characteristics on the characteristics of mechanically produced ignition sources - The specificity of impacts, Deliverable D3, March 2003, UE contract n°G6RD-2001-00553.*
- Proust Ch., Raveau D. (2003c), *Measurement of the characteristics of potential ignitions sources produced by impacts of solid surfaces, Deliverable D2, March 2003, UE contract n°G6RD-2001-00553.*
- Proust C., Raveau D., 2004, *Toward modelling of frictional ignition Loss prevention and safety promotion in the process industries : proceedings of the 11th International Symposium, 31 May - 3 June 2004, Praha, Czech Republic: PetroChemEng, 2004, pp.3348-3358, Pasman H.J., Skarka J., Babinec F. (Eds.).*
- Hawksworth S., Rogers R., Proust Ch., Beyer M., Schenck S., Gummer J., Raveau D. (2004a), *Mechanical ignition hazards in potentially explosive atmospheres - EC project MECHEX, communication to the international ESMG symposium, Nürnberg, Germany, 16th-18th of March 2004.*
- Hawksworth S., Rogers R., Beyer M., Proust Ch. (2004b), *Mechanical ignition hazards, communication to the IMEche symposium, U.K., 9th of March 2004.*
- Rivière N. (2004), *Étude théorique et expérimentale des mécanismes d'inflammation des atmosphères explosives par des points chauds transitoires, mémoire de DEA, Université de Poitiers, septembre 2004, Encadrement Ch. Proust.*

Prédiction des effets dominos dans le cadre d'éclatements de capacités métalliques

Résultats des essais et enseignements pour la maîtrise des risques

FRÉDÉRIC MERCIER

L'INERIS a conduit une recherche portant sur la prédiction des effets dominos liés à l'éclatement de capacités métalliques. Ce travail est mené au travers du programme de recherche FRACA (étude de l'influence du couplage fluide/structure sur la fragmentation de capacités métalliques sous pression).

Le projet FRACA a débuté en 2002, avec pour objectif de disposer d'une méthode permettant de décrire la rupture d'une capacité, ainsi que les effets associés à cet éclatement sur son environnement, quelles que soient la nature du fluide contenu, et celle du métal de l'enceinte.

La complexité du sujet réside dans la compétition qui s'établit entre la fuite de fluide et la propagation de fissures dans la paroi de l'enceinte, la pression constituant le moteur de la fissuration.

Dans un premier temps, le choix a été fait de simplifier le problème en le cantonnant à l'étude de la réponse de plaques à des sollicitations dynamiques.

À cette fin, un dispositif expérimental (Fig. 1) a été monté en vue de tester la réponse d'échantillons à ductilité décroissante (Al 5754 -AlMg3-, acier DC01 -EN 10.130-98-, Al 2017 A -AlCu4MgSi-), soumis à des sollicitations à vitesses croissantes (pneumatique, déflagration, détonation). L'échantillon à étudier, une plaque circulaire, est placé entre les deux tubes. Un mélange gazeux hydrogène/oxygène est introduit dans le tube 1 et l'explosion est réalisée.

La reproductibilité des chargements dynamiques est tout d'abord vérifiée dans tous les cas, ainsi que leur planéité vis-à-vis de l'échantillon. Puis, la dynamique de la réponse des plaques est étudiée au moyen de jauges de déformation placées en leur centre. Il en ressort pour l'acier une réponse dynamique intermédiaire (vitesse de déformation de $\sim 10^2 \text{ s}^{-1}$), plus faible que celle des aluminiums ($\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$), à dynamique rapide. Par la suite, afin de faciliter le suivi de la fissure au cours de l'expérience, les plaques à étudier sont pré-entaillées et leur comportement à l'explosion étudié. La fissuration des plaques est observée au cours de l'expérience au moyen de jauges de rupture et par caméra à très grande vitesse (10 000 images/seconde).

◂ ◃ ◅ *suite page 52*

FIGURE 1. Dispositif expérimental

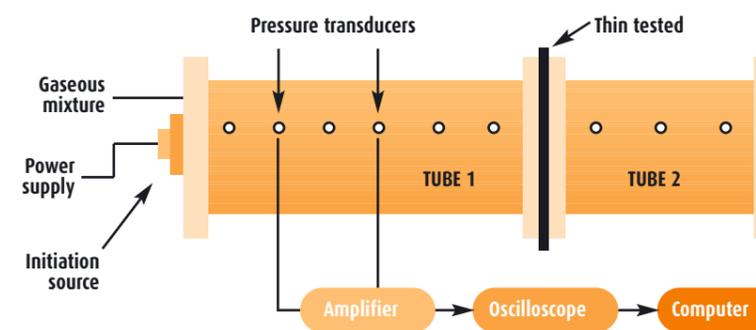
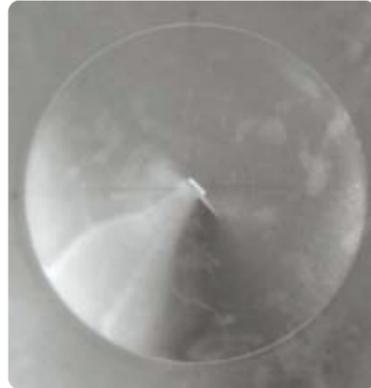
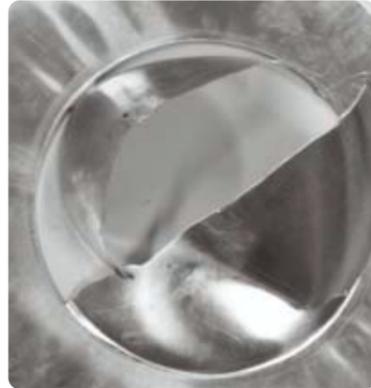


FIGURE 2.



1 mm, Al 2017 après déflagration (0,8 bar).

FIGURE 3.



1 mm, Al 2017 après détonation (0,6 bar).



Les résultats obtenus dépendent de l'épaisseur des échantillons ainsi que du chargement :

- ☉ soumises à une déflagration, des plaques de 2 mm d'épaisseur, d'Al 5754 et d'acier DC01 présentent un faciès ductile, alors que l'Al 2017, plus fragile, montre une rupture fragile ;

- ☉ soumises à une déflagration et une détonation, les plaques de 1 mm d'Al 5754 et d'acier DC01 se comportent de façon similaire à celles de 2 mm, alors que la réponse de l'Al 2017 est distincte suivant que la sollicitation est une déflagration ou une détonation : dans le premier cas, une fissure fine apparaît, alors que, dans le second cas, la plaque est coupée ;

- ☉ enfin, pour les plaques de 0,5 mm, à l'inverse de l'acier DC01, l'influence du chargement devient prépondérante pour l'Al 5754 : comme pour l'Al 2017, alors que la fissure est faible en déflagration, elle est beaucoup plus importante en détonation. Le mode de développement d'une fissure dans l'échantillon est illustré en figure 4 pour une plaque de 1 mm d'Al 2017. La figure présente de haut en bas une

succession de neuf photos séparées chacune de la précédente par un intervalle de 10^{-4} secondes. La première photo montre l'initiation de la fissure. Elle a une longueur de 34,2 mm, avec une vitesse d'ouverture de $342,3 \text{ m.s}^{-1}$. Puis, elle se propage : 83,7 mm de long (Fig. 4, photo 2) pour 495 m.s^{-1} . La photo 3 (Fig. 4, photo 2) pour 495 m.s^{-1} . La photo 3 (Fig. 4) montre que la plaque commence à se découper sur le contour du tube. La taille de la fissure augmente : 106,5 mm (photo 3, Fig. 4), 114,1 mm (photo 4, Fig. 4). La vitesse associée décroît (228 et 76 m.s^{-1}). Finalement, la fissure sur le contour du tube augmente jusqu'à la découpe complète de l'échantillon (Fig. 4, photo 9). La vitesse de découpe autour du contour est de presque 500 m.s^{-1} .

FIGURE 4.

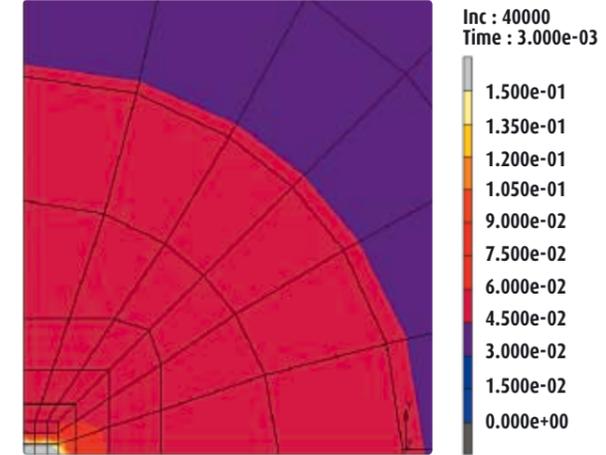


Développement d'une fissure sur une plaque (intervalle d'acquisition de 10^{-4} secondes).

À son terme, ce travail devrait permettre de disposer d'abaques exprimant la réponse d'un matériau à une sollicitation dynamique, prenant comme paramètres les caractéristiques mécaniques et géométriques de l'échantillon, ainsi que les caractéristiques de l'explosion.

En parallèle, un travail de modélisation à l'aide du logiciel MSC.Marc a été entrepris en vue de comprendre les mécanismes présidant au développement des fissures dans ces échantillons. Le comportement du matériau est modélisé à l'aide d'une loi élasto-visco-plastique, la loi de Chaboche. L'endommagement est pris en compte à l'aide des lois de Gurson et de Chaboche et Lemaitre. Les simulations réalisées visent à représenter les expériences décrites ci-dessus. À titre d'exemple, la simulation de la figure 5 représente le développement d'une fissure dans une plaque entaillée. Les simulations confrontées aux expériences montrent la sensibilité du modèle aux paramètres de la loi de Chaboche du matériau, qu'il faut identifier finement pour avoir une bonne représentation du comportement du matériau.

FIGURE 5.



Modélisation du développement d'une fissure dans une plaque.

Le couplage entre la modélisation et l'expérimental devrait permettre de réaliser un calage des modèles habituellement employés et donc de prédire avec davantage de précision les effets à attendre de scénarios accidentels. ●

Références

- M. Mosnier, B. Daudonnet, F. Mercier, J. Renard, G. Mavrothalassitis Metallic Pressure Vessel Failures, 25th ESREDA, 17-18 novembre 2003 à Paris.

- B. Daudonnet, M. Mosnier, K. Woznica, F. Mercier Étude numérique de la rupture dynamique de structures métalliques, 7^e colloque en calcul des structures, 17-20 mai 2005, à Giens.

- B. Daudonnet, M. Mosnier, F. Mercier, K. Woznica, J. Renard Numerical and experimental studies of dynamic ruptures in metallic systems, McMat 2005, Mechanics and Material Conference, 1-3 juin 2005, à BatonRouge (US).

- B. Daudonnet, K. Woznica, F. Mercier Numerical modeling of metallic systems submitted to dynamic solicitation, ASME Pressure Vessel and Piping Division Conference, 17-21 juillet 2005, à Denver (US).

- M. Mosnier, F. Mercier, J. Renard, P. Bailly An experimental investigation on metallic plates dynamic cracking, ASME Pressure Vessel and Piping, Division Conference, 17-21 juillet 2005, à Denver (US).

- B. Daudonnet, M. Mosnier, K. Woznica et J. Renard, F. Mercier Numerical modeling of dynamic rupture in metallic systems, 6^e conférence européenne en dynamique des structures Eurodyn du 4 au 7 septembre 2005, Paris.

- B. Daudonnet, K. Woznica, F. Mercier Modélisation numérique de la rupture de structures métalliques sous sollicitation dynamique, Congrès Français de Mécanique, du 29 août au 2 septembre 2005, Troyes.

- M. Mosnier, O. Penetier, F. Mercier, J. Renard, P. Bailly Une étude expérimentale de la fissuration de plaques métalliques, Congrès Français de Mécanique, du 29 août au 2 septembre 2005, Troyes.

- B. Daudonnet, K. Woznica, F. Mercier, P. Klosowski Modeling of damage in a circular plate and cylindrical shell submitted to dynamic excitation, VIIIth Conference « Shell Structures: Theory and Applications », 12-14th October, 2005, Gdansk-Jurata.

La gouvernance des risques dans le processus de prévention des risques technologiques

D

urant ces 20 dernières années, des catastrophes technologiques ont fortement marqué l'opinion publique. On peut citer notamment des accidents chimiques tels que celui de Bhopal (décembre 1984), nucléaires avec Tchernobyl (avril 1986), dans l'aérospatiale avec l'explosion de la navette Challenger (janvier 1986) et plus récemment la catastrophe de l'usine AZF de Toulouse le 21 septembre 2001. Ces catastrophes ont montré que la concertation et la consultation du public mais aussi des autres parties prenantes doivent être prises en considération dans le processus de prévention des risques afin de rendre effective la sécurité des populations à long terme. Ainsi, le maintien d'une activité industrielle est fortement dépendant de l'acceptation des risques qu'elle engendre. L'implication des acteurs dans le processus de prévention des risques peut prendre différentes formes.

La première, dite dirigiste, ignore l'opinion des parties prenantes (public ou autres). La seconde consiste à fournir l'information nécessaire afin de convaincre les différentes parties prenantes, « knowledge based theory approach ». Cette seconde

LE MAINTIEN D'UNE ACTIVITÉ INDUSTRIELLE EST FORTEMENT DÉPENDANT DE L'ACCEPTATION DES RISQUES QU'ELLE ENGENDRE.

approche est à l'origine des diverses pratiques actuelles où, par exemple, la phase de communication du risque est une phase linéairement postérieure à l'analyse du risque, ou bien encore elle fait appel à l'utilisation de la notion de grille d'acceptabilité dans le cadre des études de dangers.

La troisième approche consiste à prendre en compte l'avis et l'opinion des différents acteurs en amont et pendant le processus de décision lié à la prévention des risques, « value-oriented approach ». Que ce soit à l'échelle internationale, avec la convention d'Aarhus (1998) sur « l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement » ou à l'échelle nationale, avec la loi n° 2002-276 du 27 février 2002 relative à « la démocratie de proximité » puis, plus récemment, la loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à « la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages », la tendance forte est celle de l'implication des différentes parties concernées (ex. le public, les élus, etc.) dans les processus de décision liés à la prévention des risques.

Attentif à ces évolutions du contexte social et des aspirations des citoyens, l'INERIS a débuté plusieurs travaux de recherche qui s'intéressent à la compréhension des attentes et stratégies des parties prenantes impliquées dans la gestion des risques majeurs. Ces travaux portent sur l'étude des processus de décision et la compréhension des modes de communication en matière de risque. L'objectif est d'améliorer l'utilité et la pertinence des évaluations de risque menées par les experts, dans le cadre de décisions qui sont de plus en plus participatives. En effet, les évaluations de risque doivent avoir pour souci de rendre « lisibles » et « communicables » les conclusions d'expertise vis-à-vis du décideur final ou des personnes concernées par les études de risque telles que les maires, les associations de riverains sur les zones à risques, etc. Ainsi, les projets européens auxquels l'INERIS participe, STARC, TRUSTNET-IN-ACTION et prochainement RISKCOM, visent à y répondre. ●

Analyse du processus de décision en gestion préventive des risques

MYRIAM MERAD

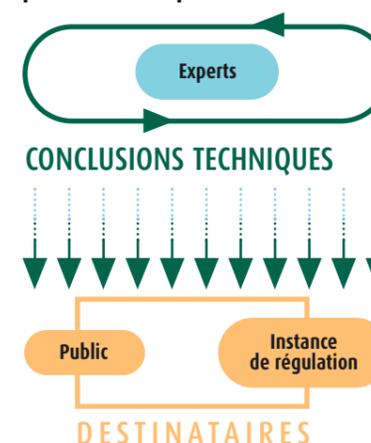
L'INERIS a lancé en 2003 un projet de recherche qui vise à analyser les processus de décision liés à la prévention et à la gestion des risques industriels en France, en Europe et plus généralement dans le monde. Ce travail s'appuie sur les travaux du projet Européen TRUSTNET-IN-ACTION, qui traite de la gouvernance participative des risques. Il vise à proposer une démarche d'aide au processus de décision lié à la prévention des risques. Cette méthodologie repose sur un processus prenant en compte la co-évolution des relations entre les différents acteurs, la nécessité de les informer de manière incrémentale et de permettre une plus grande transparence. De manière plus spécifique, l'INERIS a proposé :

- ⊕ une méthodologie d'évaluation de l'acceptabilité technique ou sociale des risques. Ceci a pour but d'enrichir les études de dangers (EDD) ; d'accompagner la mise en place des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT) ; d'accompagner la mise en place des Comités Locaux d'Information et de Concertation (CLIC) ;
- ⊕ une taxonomie des différents modes de communication dans le cadre de la prévention des risques.

La méthodologie proposée considère trois grands groupes d'acteurs impliqués dans le processus de gestion des risques : les instances de l'État ou régulateur, les experts et le public. Du fait de la diversité des devoirs, des obligations, attentes et finalités de chacun de ces groupes, la dynamique de leur interaction ne peut s'envisager de manière partielle. Pour parvenir à comprendre cette dynamique, la démarche méthodologique suivante a été proposée. Elle est basée sur la mise en évidence de trois processus d'information/négociation qui co-existent dans le processus de décision :

FIGURE 1.A

Processus A : processus d'expertise



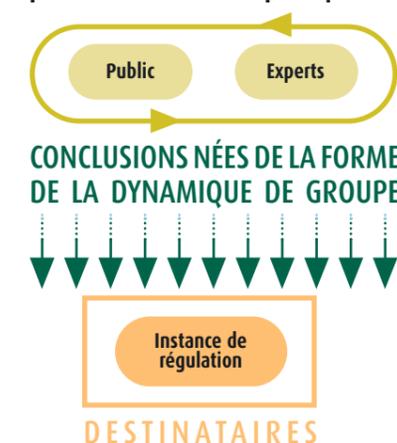
- ⊕ le processus d'expertise (Fig. 1, A). Ce processus est centré sur la problématique technique où les experts ont pour mission de proposer des solutions analytiques relatives aux niveaux d'information et de connaissances disponibles ;

- ⊕ le processus de décision publique (Fig. 1, B). Ce processus est tirailé entre des « représentations dites rationnelles » et d'autres dites « non rationnelles ou non rationalisables ». Les aboutissants de ce processus sont des solutions de compromis qui naissent d'une dynamique de groupe ;

▶ ▶ ▶ suite page 56

FIGURE 1.B

Processus B : processus de décision publique



- ⊙ ⊙ ⊙ ⊙ Le processus de décision du régulateur (Fig. 2). Ce processus est « structuré » à partir des propositions des experts mais aussi du « ressenti » des personnes concernées par la décision. On peut dire que le décideur a, dans ce cas, un poids prédominant dans la décision finale : on dit alors qu'il a un « droit

de veto ». Il représente le « point applicatif » du processus de décision. Ces trois processus, relatifs à trois typologies de fonctionnement de groupes d'acteurs, illustrent différentes configurations structurantes du processus de décision en prévention des risques. Les configurations structurantes ci-dessus peuvent être le reflet de différentes formes de modes concertatifs (ex. la structure Comité Local d'Information et de Concertation (CLIC), SPPPI, etc.), en prévention des risques qu'il est proposé d'approfondir dans le cadre des études sur la mise en place des Comités Locaux d'Information et de Concertation. ●

FIGURE 2. Processus C : processus du régulateur



Références

- Merad M. (2004) Les comités locaux d'information et de concertation : le programme européen TRUSTNET, Présentation Pollutec 2004. Forum Risques, Lyon.
- Merad M., Beaudoin F., Munier B. (2004) Multiple criteria decision aid for risk analysis and risk management Atelier, SRA Europe annual meeting 2004, Paris.
- Merad M., Gaston D. (2004) Is it necessary to separate risk evaluation from risk perception as regards to the control of industrial activities? SRA- Europe annual meeting 2004, Paris.
- Merad M., Lecoze J.-C., Salvi O. (2004) An integrated vision to assist the industrial risk prevention process in France. FUR XI-Paris 2004. 11th international conference on the foundations and applications of utility, risk and decision theory, Paris.
- Merad M., Salvi O., Debray B., Rodrigues N. (2005) About the relevance of the concept of risk acceptability in the risk analysis and risk management process: A decisional approach in the French national context. 28th ESReDA Seminar on the geographical component of safety management : combining risk, planning and stakeholder perspectives, 14-15 juin 2005, Karlstad, Suède.
- Salvi O., Merad M., Rodrigues N. (2004) An integrated vision to assist the evolution in industrial risk management process in France, International Conference on the 20th Anniversary of the Bhopal Gas Tragedy, India.
- TRUSTNET-IN-ACTION coordonné par Mutadis : <http://www.trustnetinaction.com>

Analyses d'accidents prenant en compte la composante organisationnelle

plus souvent qualitatifs. Ils sont construits sur des critères de suivi de la performance des barrières de sécurité, qu'elles soient techniques ou humaines. Grâce à une écoute attentive des employés, les problèmes liés à l'activité routinière sont pris en compte dans le contexte technique dont ils ont la maîtrise. Ce sont évidemment des éléments difficilement quantifiables, mais ils sont fondamentaux pour la prévention.

La survenue d'incidents et d'accidents, consécutifs à des dysfonctionnements des organisations révèle les carences de ces systèmes. Les investigations menées par les équipes de l'INERIS sur ces événements identifient les axes de progrès dans le management. La mise en œuvre effective de recommandations basées sur les travaux de recherche de l'INERIS doit permettre l'amélioration des systèmes. En particulier, pour identifier les facteurs majeurs d'influence sur la genèse des accidents (définition des rôles et responsabilités, coordination, gestion des conflits...), une approche Globale, Clinique et Compréhensive (AGCC) doit être privilégiée.

Les deux textes suivants présentent la méthodologie d'investigation de l'INERIS et une application concrète. Cette méthodologie assure une meilleure compréhension des liens entre les dimensions techniques, humaines et organisationnelles. Il a pu être vérifié sur le terrain que ces recommandations ciblent les divers leviers de la prévention, situés à plusieurs niveaux organisationnels. ●

L

INERIS réalise régulièrement des analyses d'accidents pour les autorités ou pour les industriels. Fort du constat que la majorité des accidents trouvent leur origine dans des causes humaines ou organisationnelles, l'INERIS a mené, depuis trois ans, des travaux de recherche en vue de bâtir un protocole d'enquête doté d'une analyse organisationnelle et de la culture sécurité.

Il ressort de ces travaux qu'une voie importante de progression aujourd'hui dans les pratiques et les connaissances de la prévention des risques d'accidents majeurs passe par une meilleure compréhension des organisations, à la fois en fonctionnement nominal et lors de situations accidentelles.

L'amélioration de la compréhension du fonctionnement normal des organisations implique la mise au point d'indicateurs pour suivre en continu l'état de la sécurité du système socio-technique industriel. Ces indicateurs sont semi-quantitatifs mais le

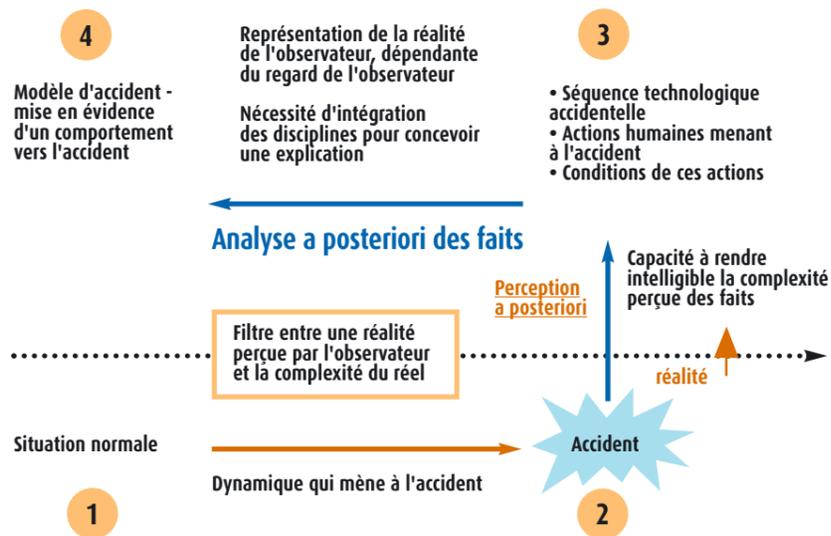
Apport de l'approche systémique et organisationnelle au retour d'expérience

JEAN-CHRISTOPHE LECOZE,
SAMANTHA LIM

⊙ ⊙ ⊙ suite page 58

FIGURE 1.

Recherche de dynamique organisationnelle, à partir d'enquête et de travail de compréhension.



important de comprendre le contexte, la globalité, les multidimensions et la complexité de ces événements. Les enseignements de ces accidents s'adressent donc aux différents acteurs du système socio-technique. Une telle représentation a été proposée par J. Rasmussen (1997).

Références

■ Lecoze J.-C.
Enquête après accident majeur. L'approche systémique et organisationnelle. *Préventique*, 2004 n°74, pp. 30-33.

■ Lecoze J.-C., Lim S.
L'intégration des aspects organisationnels dans le retour d'expérience : l'accident majeur, un phénomène complexe à étudier, INERIS P36988 JLz/SLi, 2002. www.ineris.fr

Une investigation consécutive à un accident doit pouvoir envisager cette complexité et la dynamique du système socio-technique, enrichir la compréhension du phénomène en prolongeant les analyses techniques et aller plus loin que les « erreurs humaines », qui sont souvent les premiers éléments mis en avant lors des accidents. Ceux-ci masquent les autres dimensions. Mettre en évidence ces autres dimensions aboutit à mieux prioriser les moyens de prévention (au-delà de simples mesures correctives) et, en particulier, à montrer comment la prévention doit aussi se porter sur l'organisation des activités. Une telle démarche d'investigation a été représentée par un schéma (Fig. 1) : en 1, l'entreprise fonctionne, produit, puis l'accident majeur survient, en 2. L'objectif des

étapes 3 et 4 est de passer d'une chronologie proche des faits à une reconstitution de la dynamique organisationnelle a posteriori, parfois impliquant de se plonger dans l'histoire de l'organisation. La méthodologie développée par l'INERIS capitalise un ensemble de pratiques reconnues dans ce domaine (principalement aujourd'hui anglo-saxonnes et toujours en cours d'évolution). Elle est le fruit de recherches engagées en 2001. Elle comporte sept étapes qui sont résumées ici :

① 1. Définir les objectifs de l'expertise, en fonction des ressources (personnel, temps, financement) mais aussi de l'accès à l'information.

② 2. Établir la chronologie, formuler des hypothèses et les tester, pour mettre en évidence les éléments proches, dans un premier temps, qui ont participé à la survenue de l'accident. Cette partie doit être très rigoureuse car la chronologie constitue la clef de voûte de l'approche.

③ 3. Identifier des points clés (par exemple, les fonctions et barrières de sécurité). À partir de l'identification des barrières, le questionnement est dirigé sur les conditions qui ont permis à ces barrières de ne pas remplir leur fonction.

④ 4. Identifier les acteurs et les systèmes impliqués. Cette étape permet de cibler les acteurs qui devront être interrogés pour comprendre leur lien avec les conditions qui ont favorisé les dysfonctionnements des barrières ou leur inadéquation. Les acteurs sont les personnes directement impliquées dans la séquence accidentelle, mais aussi tous les autres acteurs indirects qui participent au fonctionnement de l'organisation.

⑤ 5. Comparer les activités organisationnelles avec les principes de management de la sécurité. Cette étape a pour but de faire des recommandations sur la manière d'améliorer les activités propres à la sécurité, comme les activités d'analyse de risques, du retour d'expérience... car celles-ci conditionnent la gestion des risques.

⑥ 6. Approfondir l'analyse avec des connaissances spécifiques en sciences humaines et sociales. Le but de cette étape est de s'inspirer des connaissances dans

le domaine pour porter un éclairage sur les faits, avec des aspects liés au fonctionnement cognitif, aux phénomènes de groupe, aux dimensions organisationnelles. Quelques exemples de grandes enquêtes à la suite d'accidents majeurs illustrent bien cette dernière démarche (Columbia, ou encore Ladbroke Grove).

⑦ 7. Proposer une synthèse et des recommandations. Cette partie vise à restituer, de manière synthétique, les interprétations sur l'accident. Elle peut s'effectuer de manière graphique (approche de représentation systémique) ou littérale (texte contenant les principaux éléments).

Le degré de profondeur dépend donc, au-delà de la collecte des informations, de leur interprétation et ainsi des compétences interdisciplinaires disponibles au sein de l'équipe d'investigation. Les analyses détaillées du retour d'expérience permettent ensuite d'interroger

et d'enrichir les pratiques des acteurs au cœur du système socio-technique.

Les développements à venir viseront à spécifier davantage les modalités de mise en œuvre de ces étapes, leur enchaînement et leur déroulement au regard des caractéristiques et problématiques soulevées par l'incident ou l'accident. ●

Références

■ Rasmussen J. (1997)
Risk management in a dynamic society : a modelling problem. *Safety science*, vol. 27, n°2/3, pp. 183-213.

■ Dechy N., Bourdeaux T., Ayrault N., Kordek M.-A., Lecoze J.-C.
First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster, 21st september 2001, AZF plant, France. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, vol.111, pp. 131-138.

■ Lecoze J.-C., Lim S.
Integration of organisational aspects into learning from experience: illustration with a case study. *Proceedings of Loss Prevention Symposium*, May 2004, Prague.

■ Lecoze J.-C., Lim S., Gaston D.
Le retour d'expérience sur les accidents majeurs - l'analyse des phénomènes complexes. *Préventique*, 2003, n°71, pp. 34-36.

Investigation de l'accident de Billy-Berclau

JEAN-CHRISTOPHE LECOZE,
SAMANTHA LIM

Mandaté par le ministère de l'Écologie et du Développement durable (MEDD) dans le cadre de l'investigation de l'accident survenu le 27 mars 2003, à l'usine pyrotechnique Nitrochimie de Billy-Berclau (62), l'INERIS a pu mettre en œuvre la méthodologie décrite dans le texte précédent.

Une explosion a provoqué la destruction d'un atelier d'encartouchage de dynamite, provoquant le décès de 4 personnes y travaillant ou circulant à proximité. La puissance de l'explosion, après analyse, est de l'ordre de la centaine de kilogrammes en équivalent TNT.

L'investigation a comporté plusieurs

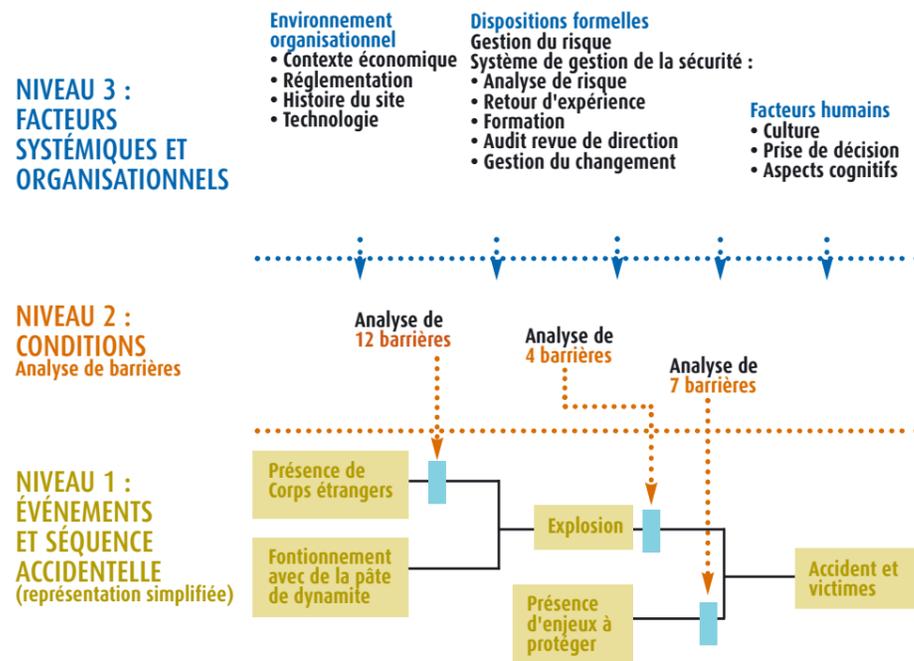
volets : d'abord, l'évaluation des dommages et la détermination de la quantité de produit qui a détoné, la chronologie, la recherche des causes, et aussi l'investigation du contexte organisationnel et systémique de l'accident. Ce deuxième volet d'étude est une innovation en France dans le domaine des installations à risques.

Le déroulement et quelques enseignements tirés de l'investigation concernant ce deuxième volet sont présentés ici et s'inscrivent dans le prolongement de la chronologie et des hypothèses techniques.

D'une manière synthétique, qui est représentée dans un schéma simplifié (Fig. 1), la démarche a consisté à identifier et à relier les barrières de sécurité et de contrôle qui se sont révélées inadéquates, avec, d'une part, les conditions qui ont localement influencé ces inadéquations et, d'autre part, le contexte systémique et organisationnel de l'accident. De nombreux enseignements ont été

② ③ ④ suite page 60

FIGURE 1. Les trois niveaux d'analyse.



☉ ☉ ☉ tirés à plusieurs niveaux du système, à partir des diverses dimensions (voir Fig. 1, cf. niveau 3 « facteurs systémiques et organisationnels »). Il est proposé de s'attarder sur deux d'entre elles.

Pratique réelle

Les modes opératoires propres à un site doivent être assez détaillés mais ne peuvent pas tout décrire. En effet, il y a

toujours une part d'inconnu dans les situations de travail. Elles évoluent sans cesse et des micro-dérives s'installent souvent, sans pour autant perturber le fonctionnement productif, mais plutôt même parfois en le facilitant ! Ces micro-dérives locales, difficiles à éviter, exposent l'entreprise au risque de dépasser des « limites » de fonctionnement en sécurité des opérations. L'exemple bien connu qui illustre la réalité

de ce principe de contournement des règles est la grève du zèle, où le suivi strict des règles vont paralyser le fonctionnement d'une entreprise.

Un des moyens d'accroître la vigilance est de commencer par reconnaître la réalité de ces pratiques, ne pas fermer les yeux sur celles-ci et d'encourager les acteurs à réfléchir à ces situations, collectivement, pour mieux les gérer. Les entreprises ne peuvent pas être gérées comme des machines et l'autonomie des individus autour des règles amène des évolutions de pratiques.

Indicateurs du niveau de sécurité vis-à-vis des accidents majeurs

Les indicateurs tels que les taux de fréquence des accidents et le taux de gravité associés à la santé et sécurité au travail sont nécessaires mais pas suffisants pour définir des critères explicites lorsqu'il s'agit du risque d'accident majeur. Ils peuvent même participer à une perception erronée du niveau de sécurité de l'entreprise par rapport à ce risque. Des indicateurs spécifiques doivent être mis en place sur les processus comme cela se pratique en matière de qualité. Ils peuvent porter, par exemple, sur la performance des barrières de sécurité, sur la réalisation des processus décrits dans le système de management.

En conclusion, il revient aux différents acteurs de la gestion des risques de s'en servir pour faire évoluer les pratiques de prévention. En terme de méthodologie d'investigation, cette expérience qui constitue une première en France dans l'industrie des procédés (hors nucléaire) a montré l'intérêt d'articuler expertise technique et organisationnelle pour mieux mettre en évidence les causes directes et indirectes des accidents. Utilisé par les acteurs de la gestion des risques pour la mise en place de leur système de prévention, le couplage technique/organisationnel permettra d'améliorer les pratiques en matière de sécurité. ●

Références

■ Branka R., Dechy N., Lecoze J.-C., Leprette E., Lim S.
Intervention de l'INERIS après le sinistre survenu le 27 mars 2003 sur le site de Billy-Berclau de la société Nitrochimie. Rapport final, septembre 2003. www.ineris.fr

■ Lecoze J.-C., Lim S., Dechy N., Gaston D.
Un exemple d'enquête organisationnelle et systémique. L'accident du 27 mars 2003 à l'usine Nitrochimie de Billy-Berclau. Préventique, 2004, n°78, pp. 19-22.

■ Lecoze J.-C., Dechy N., Lim S., Leprette E., Branka R.
The 27 march 2003 Billy-Berclau accident: A technical and organizational investigation. Proceedings of 39th Annual Loss Prevention Symposium - AIChE 2005 Spring National Meeting, April 10-14, 2005, Atlanta, GA.

Maîtrise des risques



La maîtrise des risques à la source est un des objectifs majeurs promus par la directive SEVESO II. Elle doit être traitée à tous les niveaux d'une installation : du choix d'un procédé plus sûr à la mise en place de barrière(s) de sécurité (en prévention et en protection) ayant des performances (efficacité, temps de réponse et niveau de sécurité) adaptées aux risques. L'INERIS mène des travaux de recherche concernant l'évaluation de la performance des barrières de sécurité sur les matériels et les fonctions de sécurité intégrant de l'instrumentation, des automatismes et des actionneurs. En 2004, les travaux relatifs à l'évaluation des facteurs influençant l'efficacité des confinements ont nécessité la création d'un module de dispersion en milieu confiné. Ces travaux ont permis d'évaluer, par le calcul, les performances (efficacité, temps de réponse) de ces systèmes en fonction

de plusieurs paramètres, dont le débit de fuite. Des expérimentations à grande échelle sont menées pour confirmer les résultats obtenus par ces calculs.

Ces travaux ont porté notamment sur l'influence du volume du confinement sur les distances de sécurité au seuil des effets irréversibles, pour une fuite de chlore de 30 kg/s. Ils montrent le caractère interdisciplinaire indispensable à l'évaluation des performances des barrières de sécurité dans le cadre de la maîtrise des risques, associant la connaissance des phénomènes physiques, les évaluations expérimentales, l'expertise des matériels de sécurité et l'évaluation de la sûreté de fonctionnement.

L'INERIS mène également des travaux relatifs aux bases de données de fiabilité des matériels électriques et mécaniques nécessaires à la réalisation des systèmes de sécurité instrumentés. Des travaux de recherche concernant la modélisation des facteurs d'influence (condition d'utilisation, environnement, stress...) sur l'évaluation des taux de défaillance sont décrits ci-après. ●

Bases de données de fiabilité des dispositifs de sécurité

DOMINIQUE CHARPENTIER, BRICE LANTERNIER

De nombreuses recherches en sûreté de fonctionnement sont à l'origine de développements industriels innovants dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'armement. Les principaux axes de recherches portent aujourd'hui sur le retour d'expérience, les outils d'aide à la décision et les évaluations probabilistes des installations industrielles.

La loi du 30 juillet 2003 sur les risques technologiques impose d'évaluer la fiabilité des dispositifs de sécurité et donc les probabilités de défaillances des installations. Ainsi, pour répondre à ces exigences réglementaires, l'INERIS a engagé des recherches en sûreté de fonctionnement relatives aux bases de données de fiabilité. L'évaluation quantifiée de la fiabilité ou de la disponibilité d'un dispositif de sécurité nécessite d'utiliser des bases de données de fiabilité. Peu d'entreprises ont la capacité de collecter et de traiter

des données spécifiques à une utilisation particulière ; seuls quelques secteurs industriels ont développé des bases de données (OREDA⁽¹⁾, EIREDA⁽²⁾ par les producteurs d'électricité). Les limites d'application de ces bases résultent soit de l'hétérogénéité des sources conduisant à une très grande variabilité des taux de défaillance, soit à des données trop spécifiques à un domaine d'utilisation. Les recherches de l'INERIS portent sur l'optimisation pour une meilleure utilisation

☉ ☉ ☉ suite page 62



des différentes bases de données et la prise en compte des facteurs d'environnement et de maintenance sur la fiabilité des matériels.

Les pratiques actuelles sont de choisir une base de données alors qu'il serait préférable d'utiliser toutes les bases pertinentes pour une utilisation donnée. L'INERIS a donc mené une recherche en 2004 s'appuyant sur des travaux antérieurs d'EDF et développé un logiciel permettant d'intégrer les données de plusieurs bases. Le principe d'intégration de données statistiques sous des formes variables (lois de distribution, grandeurs différentes) est basé sur un modèle de statistiques bayésiennes. Ce modèle prend en compte les avis d'experts relatifs à la pertinence des données et la quantité d'information apportée par chaque base de données. L'estimation du taux de défaillance d'un équipement s'exprime par une loi de distribution résultant de données, a priori complétée de données de vraisemblance.

FIGURE 1. Taux de défaillance d'une vanne à partir de trois bases.

Base de données de fiabilité	Nombre de défaillances	Temps cumulé	Taux de défaillance moyenne	Taux de défaillance intervalle
		10 ⁶		
OREDA	13	1.4	9.02	5.18 - 14.78
EIREDA	1	2.6	0.39	0.04 - 0.89
RADC	1	1	1	0.11 - 2.30
Taux de défaillance calculé			0.560	0.148 - 1.08
Taux de défaillance calculé pondéré par la quantité d'information			0.798	0.44 - 1.19

Le modèle permet aussi de vérifier la cohérence des données d'entrée et d'éviter des erreurs dans la prise en compte de données très peu informatives.

Un exemple de calcul du taux de défaillance d'une vanne à partir des 3 bases de données est présenté dans la figure 1.

Des recherches plus complexes relatives à la modélisation des taux de défaillances d'un matériel en fonction des conditions d'utilisation ont été lancées en 2005 en partenariat avec l'École centrale de Lyon et l'École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne.

Le modèle de Cox couramment utilisé dans la recherche médicale a été retenu pour la détermination de fiabilité des matériels car les démarches d'évaluation de la durée de vie d'un malade ou celle d'un matériel sont comparables en présence de variables explicatives (influence des paramètres d'environnement).

Les travaux ont consisté à définir les paramètres d'influence pour différents types de matériels (soupapes de sécurité, vannes) et à établir les modèles mathématiques correspondants.

La validation du modèle pour les soupapes s'appuie sur les données de fiabilité recueillies dans des industries chimiques et pétrochimiques.

Des accords de collaborations ont été passés avec des industriels afin de valider les modèles pour chaque catégorie de matériel. ●

(1) OREDA : Offshore Reliability Data, publié par SINTEF industrial management.

(2) EIREDA : European Industry Data Bank - European Commission.

Référence

■ Charpentier D., Lanternier B., Lyonnet P.
Évaluation des dispositifs de sécurité - pertinence des résultats obtenus avec des bases de données - 14 octobre 2004, Lambda Mu 14 - Bourges.

Dangers liés aux produits



L'identification des dangers liés aux produits tout au long de leur cycle de vie et à n'importe quel stade de la chaîne de valorisation constitue bien souvent la première démarche de sécurité nécessaire à la gestion préventive et prévisionnelle des risques.

Cette identification est très encadrée à travers notamment un paysage réglementaire à la fois national (code du travail...), européen (directives substances et préparations dangereuses, biocides, REACH...) ou plus large encore (transport des matières dangereuses).

Toutefois, cette analyse des dangers des produits industriels, parfois multiples et ne relevant pas toujours de propriétés intrinsèques, nécessite une véritable démarche d'expertise qui est une pratique déjà très ancienne à l'INERIS dans le domaine des matériaux énergétiques ou des substances simplement inflammables. En effet, l'INERIS possède, dans ce domaine, l'essentiel des compétences intégrant le caractère conventionnel des classements de dangers établis selon des critères d'évaluation strictement quantifiés.

Comme pour tous types de classements, ces derniers présentent des limitations

qu'il convient de prendre en compte dans l'évaluation des risques. La spécificité de l'expertise de l'INERIS dans ce domaine réside dans sa maîtrise de la démarche expérimentale, de l'essai de laboratoire à l'essai en grand, qui lui permet d'évaluer les dangers des produits (explosion, incendie, corrosivité...), avec les moyens les plus pertinents selon leur nature et l'environnement où ils se trouvent.

Ainsi, l'INERIS met en œuvre les essais de référence, dont il connaît ou étudie éventuellement au cas par cas les limites d'applicabilité en partenariat avec les autres laboratoires compétents. Chaque fois que c'est utile, il a recours à des moyens originaux ou innovants disponibles en propre (calorimètres adiabatiques, galerie d'incendie, calorimètre de Tewarson...) ou chez des partenaires. L'évaluation des dangers non intrinsèques aux produits tels que la toxicité des effluents émis par décomposition thermique ou combustion constitue également un savoir-faire reconnu de l'INERIS.

L'analyse des accidents impliquant les substances ou matières dangereuses constitue un troisième pôle reconnu d'activités et de recherches. Enfin, en matière d'évaluation des dangers des produits, l'INERIS participe aux différents groupes d'experts internationaux tels que ceux de l'ONU ou de l'OCDE (International group of experts on unstable substances), lesquels assurent un suivi au plus près des textes réglementaires ou autres référentiels et contribuent à leur amélioration. ●

Évaluation des matières dangereuses à l'aide du calorimètre de Tewarson

GUY MARLAIR

Un calorimètre de Tewarson (photo 1) a été mis en service à l'INERIS en 1997. Conçu dans sa version primitive dès le milieu des années 1970 [Tewarson et Pion, 1976], sa conception moderne a bénéficié de plus de 20 ans de développement et d'amélioration. Impliquant les matériaux les plus divers, les essais fournissent des informations sur la phénoménologie du feu de nature qualitative

☞ ☞ ☞ suite page 64

PHOTO 1.



Calorimètre de Tewarson.

PHOTO 2.



Amorçage de la combustion auto-entretenu du mélange fumigène (échantillon à 30 % de lactose, 30 % de féculé de pomme de terre et 40 % de KNO₃).

pement, a largement contribué à l'obtention de sa reconnaissance normative (ASTM E 2058, NFPA 287), en passe de devenir internationale. Diverses études ont progressivement permis, par la suite, de cerner que l'équipement recelait un potentiel d'applications allant bien au-delà du domaine d'utilisation initialement envisagé par son inventeur et par les autres utilisateurs pionniers de l'équipement. Ainsi, l'on a pu mettre en évidence, à plusieurs reprises, son intérêt pour l'évaluation des matières dangereuses ou de produits et matériaux susceptibles d'être libérés par agression thermique. Ces études ont couvert des applications aussi diverses que :

- ⊕ la dégradation thermique accidentelle d'anciens films d'archives sur support de type nitrocellulose ;
- ⊕ la combustion de mélanges de poudres organiques (encens, lactose, cellulose, féculé...) en association avec des comburants (nitrates, persulfates...);
- ⊕ la combustion de solvants et autres produits chimiques chlorés et l'étude du devenir de l'élément chlore dans les fumées (émission de Cl₂, HCl, COCl₂...);
- ⊕ la réactivité de déchets et de pigments de coloration organométalliques ;
- ⊕ les décompositions thermiques d'engrais complexes (NPK) ;
- ⊕ la combustion d'électrolytes liquides entrant dans les nouvelles technologies énergétiques ;
- ⊕ la caractérisation des sources accidentelles d'émission de dioxines, etc.

La figure 1 illustre plus précisément certains résultats d'une étude menée pour le compte de l'Institut Suisse de Promotion de la Sécurité. Cette étude porte sur la caractérisation des émissions produites par combustion de compositions fumigènes utilisées par les services d'incendie pour tester le bon fonctionnement des systèmes de désenfumage, sur deux mélanges dosés différemment en KNO₃. L'examen des données des essais permet de conclure à des facteurs d'émission relativement élevés en CO et en suies (et, dans une moindre mesure, en hydrocarbures totaux -HCT) qui sont à relier à l'effet fumigène recherché, et à un faible rendement de conversion de l'élément azote en

toxiques azotés (NOx et ammoniac). Les résultats confirment aussi la présence de substances irritantes en quantités non négligeables si on les rapporte aux vitesses de combustion très élevées.

Le calorimètre de Tewarson est un appareillage d'essai particulièrement intéressant qui permet de révéler et souvent quantifier les diverses phénoménologies associées aux combustions et décompositions thermiques. Son caractère polyvalent a largement été démontré par ses différents utilisateurs européens (dont l'INERIS) et américains. En particulier, son potentiel en appui aux activités d'évaluation des matières dangereuses non susceptibles d'exploser (dans les conditions d'essai) est prometteur et justifie une poursuite plus ciblée des recherches dans cette direction. ●

FIGURE 1.

Facteurs d'émissions des produits de combustion d'une composition pyrotechnique pour deux dosages en nitrate de potassium.

Produits de combustion	Mélange dosé à 40% KNO ₃	Mélange dosé à 45% KNO ₃
	Vitesse de combustion (g/m ² /s)	
	140	400
	Facteurs d'émission en mg/g	
CO ₂	690,2	700,4
CO	98,2	56,4
Hydrocarbures totaux	16,2	6,8
NOx	5,5	4,2
Suies	19,5	18,2
Ammoniac	10,8	4,6
Méthylamine	< 0,04	n.d.
Diméthylamine	D	D
Triméthylamine	D	D
Formaldéhyde	0,380	0,283
Acétaldéhyde	1,299	0,318
Acroléine	n.d.	n.d.
Pentanal	D	0,003
Butanal	0,016	0,004

Nd: non détecté - D: détecté mais non quantifiable

Références

- Tewarson A. et Pion R. *Flammability of Plastics, I. Burning Intensity, Combustion and Flame*, vol. 26, pp. 85-103 (1976).
- Marlair G., Marlière F., Desmet S., Costa C., Leck M. et Siegfried W. *Experimental Evaluation of the Fire Hazard of Organophosphorous insecticides by use of various test methods, Industrial Fire III Workshop, Riso, (DK), 17-18 September 1996, Proceedings EUR 17477 EN pp. 93-110.*
- Tewarson A. et Marlair G. *Liquids and Chemicals, Ch. 8 in Handbook of Building Materials for Fire Protection (Ed. Charles Harper), Mac-Graw Hill, (USA), 2004, pp. 8.1-8.43.*

- Brohez S., Marlair G., Bertrand J.-P. et Delvosalle C. *The effect of oxygen concentration on CO yields in fires, 10th International Symposium on Fire Science and Engineering (Interflam 2004), Proceedings (Ed. Interscience Comm.), (2004), pp. 775-780.*

- Marlair G. et Tewarson A. *Effect of the Generic Nature of Polymers on their Fire Behavior, 7th International Symposium on Fire Safety Science, Worcester, July 2002, Proceedings (2003), pp. 629-640.*

- Brohez S., Marlair G. et Delvosalle C. *Fire Calorimetry relying on the use of the FPA - Part I: Early learning from the use of the apparatus in Europe, accepted (2004) for publication in Fire and Materials (sous presse).*

Dangers du nitrate d'ammonium et des artifices de divertissement : des accidents récents qui justifient un examen approfondi du rôle joué par les scénarios d'incendie

GUY MARLAIR, MARIE-ASTRID KORDEK,
RUDDY BRANKA

En matière d'évaluation des dangers des produits industriels en conditions de stockage, d'utilisation ou de transport, l'examen du retour d'expérience est souvent riche d'enseignement. Des accidents récents survenus en Europe postérieurement aux catastrophes majeures de Toulouse (2001) [Dechy et al., 2004] et d'Enschede (2000) ont encore impacté, de manière significative, l'industrie des engrais à base de nitrate d'ammonium comme celle des artifices de divertissement.

Dans le cas des engrais, l'INERIS a, tout d'abord, été impliqué dans la gestion de crise lors de l'accident de Saint-Romain-en-Jarez (Loire), survenu en octobre 2003 [Kordek et al., 2004]. Dans ce cas précis, l'événement initiateur est un incendie de bâtiment horticole (Photo 1). Il a conduit, en temps décalé, à une explosion de quelques tonnes d'ammonitrates (stockés en big-bags) dans une pièce attenante au local où a eu lieu le départ du feu, occasionnant des dégâts impressionnants. Deux autres accidents significatifs ont eu lieu l'année suivante impliquant des transports routiers de ce même produit, en Espagne tout d'abord (février 2004, à Barracas, transport de 20 tonnes d'am-

monitrates en vrac, conforme à la réglementation européenne en vigueur), puis en Roumanie (mai 2004, à Mihailesti, transport de produits ensachés). Ces accidents montrent que toutes les barrières de sécurité mises en place par les fabricants et les autorités chargées de la réglementation présentent certaines limites devant la complexité des propriétés dangereuses de ces produits. Ils mettent surtout en évidence le rôle central joué par l'événement initiateur qu'est l'incendie (et corrélativement par le nitrate fondu) dans l'enchaînement des circonstances conduisant *in fine* à l'explosion en masse.

Dans l'ensemble des cas évoqués, les engrais ont très vraisemblablement été contaminés par des matériaux organiques (plastiques, carburants...), mais l'absence de confinement marqué laisse perplexe, eu égard à l'état des connaissances et milite pour un réexamen des données scientifiques.

Une contribution de l'INERIS dans cette réflexion s'est traduite par une évaluation des facteurs conditionnant le niveau de sécurité présenté par les petits stockages d'engrais à base de nitrate d'ammonium [Marlair et Kordek, 2005]. Une autre action en cours est une évaluation expérimentale du rôle joué par le nitrate fondu dans les scénarios accidentels d'incendie suivi d'une explosion d'engrais à base de nitrate d'ammonium, en collaboration avec l'industrie. On sait, en effet, que le diamètre critique de détonation est réduit lorsque l'on passe du produit granulaire au produit fondu. La photo 2 montre le dispositif mis au point pour préparer la mise en fusion et transférer une charge d'engrais à haut dosage en nitrate vers un tube d'essai comprenant dispositifs de mesures et plaque témoin d'explosion. La validation du bon fonctionnement du système a, d'ores et déjà, été réalisée avec de l'engrais de type ammonitrate à 33,5 % d'azote.

Par ailleurs, en matière d'artifices de divertissement, il est bien connu que ces produits grand public sont à l'origine de nombreux accidents de type incendies ou explosions. Un nouvel accident significatif, survenu sur un site industriel le 3 novembre 2004 à Kolding au Danemark



PHOTO 2.

Dispositif de fusion et de transfert d'engrais à base d'ammonitrate vers un tube récepteur pour essai de détonabilité de nitrate d'ammonium fondu.



PHOTO 1.

Explosion d'un bâtiment horticole à Saint-Romain-en-Jarez (42), le 2 octobre 2003.

mérite un examen attentif : il aurait impliqué l'explosion en phases successives de quelque 2 000 tonnes d'artifices dans un stockage (autorisé pour 1 200 tonnes) en milieu urbain, rappelant, par bien des aspects, les circonstances de la catastrophe néerlandaise d'Enschede. Dans le cas de Kolding, les opérations d'intervention, rendues extrêmement délicates du fait des multiples foyers d'incendie, a nécessité l'évacuation d'environ 2 000 habitants (700 habitations) dans un rayon de 1 kilomètre. La toxicité des fumées des compositions pyrotechniques (un cas bien particulier méritant des développements, selon les premiers échanges entre experts des matériaux énergétiques sur le sujet) serait, dans l'accident de Kolding, à l'origine du décès du sapeur-pompier tué sur le site. D'une manière générale, l'examen détaillé du rôle joué par l'événement incendie dans l'occurrence et les effets des scénarios accidentels impliquant les matériaux énergétiques mérite davantage d'attention, un axe de recherche que l'INERIS envisage de poursuivre selon les priorités recensées [Marlair et al., 2005]. ●

Références

- Marlair G., Simonson M., Gann R.G. Environmental concerns of fires, facts, figures and new challenges for the future, Proceedings Interflam, Edinburgh (Scotland), 5th-7th July 2004, Proceedings Interscience Comm. Ltd, (2004), pp. 325-338.
- Carvel R. et Marlair G. A history of fire incidents in tunnels, Partie 1, ch. 1 dans The Handbook of Tunnel Fire Safety (Ed. A. Beard and R. Carvel), Thomas Telford, (UK), 2005, pp. 3-41.
- Dechy N., Bourdeaux T., Ayrault N., Kordek M.A., Lecoze J.-C. First Lessons of the Toulouse Ammonium Nitrate disaster, 21st september 2001 AZF plant, France, Journal of Hazardous Materials, 111 (2004), pp. 131-138.
- Kordek M.A., Marlair G. et Michot C. Accident (explosion following a fire) at Saint-Romain-en-Jarez, Communication au congrès IPSF2004 (Int. Physical Security Forum), Oslo, 30 mai-4 juin 2004 (aussi présenté à la réunion du groupe d'experts OCDE-IGUS-EPP, Ottawa, 19-21 avril 2004).
- Marlair G. et Kordek M.A. Safety and Security Issues Relating to Low Capacity Storage of AN-Based fertilizers, Journal of Hazardous Materials (2005), vol. 123, n°1-3, pp. 13 à 28.
- Huth O. et Hauptmann O. Dänemark: Explosions-katastrophe in Kolding, Brandschutz, 3/2005 (179-198).
- C. Michot Toxicity of smoke pyrotechnics, Communication à la réunion OCDE-IGUS-EPP, Rijswijk, 12-14 mai 1998.
- Fujiwara S. Characterisation of Environmental Toxicity for Combustion Products of Fireworks, communication à la réunion OCDE-IGUS-EPP, Berlin, 13-14 juin 2001.
- Marlair G., Branka R., Kordek M.A. Energetic Materials and the Fire Problem, Projet de communication (poster) accepté pour le 8^e congrès de l'IAFSS, Beijing, China (18-23 septembre 2005).

Les produits chlorés utilisés pour le traitement de l'eau en piscine

Une famille de produits aux dangers méconnus

MARIE-ASTRID KORDEK

FIGURE 1.

Lieu/ date	Produit	Conséquences
Blue Systems, juillet 1997, France	ATCC et DCCNa (rebuts)	Nuage toxique
Blue Systems, janvier 2004, France	DCCNa	Nuage toxique
Springfield (MA, USA), juin 1988	ATCC	Incendie et explosion, 25000 personnes évacuées, 275 hospitalisées
Industriel américain, lieu et date non connus	DCCNa, 550 kg dans un réacteur	Nuage toxique, dégâts matériels, évacuation du personnel
Stockage, Phoenix, (Arizona, USA), août 2000 (stockage)	Produits pour piscine	Incendie, explosions, nuage toxique
Guelph (Ontario), Canada, août 2000	Fabricant de produits pour piscine	Boules de feu 30 à 40 m et nuage toxique, habitants proches du site évacués, personnes confinées dans un rayon de 20 km

Quelques accidents significatifs ayant impliqué des produits chlorés pour piscine (chloroisocyanuriques).

à risque d'explosion ou d'incendie, mis en cause également dans l'accident de Toulouse en septembre 2001, raison pour laquelle l'INERIS, comme d'autres équipes dans le monde (dont au Canada), a engagé une étude visant à évaluer les propriétés dangereuses des produits chimiques solides chlorés du type chloroisocyanuriques.

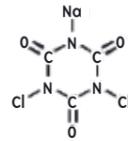
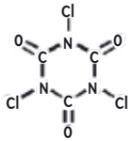
Ces produits, même s'ils sont stables dans les conditions normales, de température par exemple, ont des propriétés dangereuses méconnues. En effet, à l'état de substances, ces produits sont classés comme comburants puissants et nocifs et ces classements peuvent toujours être justifiés à l'état de préparations.

Ils sont généralement commercialisés sous la forme de galets d'environ 200 g ou de granulés de plusieurs millimètres de diamètre permettant d'assurer un traitement sur une durée de plusieurs jours : cette facilité d'utilisation a permis de démocratiser l'emploi de ces produits. En revanche, les nouvelles formulations sur le marché ont tendance à masquer les propriétés dangereuses intrinsèques du produit, du fait de la présence d'adjuvants et à cause de leur forme physique. Il en résulte une difficulté pratique d'identification des dangers. Actuellement, il existe une situation anarchique dans les étiquetages des produits : en effet, la détermination des propriétés comburantes par les épreuves reconnues internationalement est mal adaptée. Seul, l'essai à plus grande échelle permet d'évaluer les risques de ces produits. Des recherches sont menées sur ce sujet par l'INERIS et d'autres équipes.

De plus, la réglementation actuelle laisse souvent de côté le risque de mise en présence avec des contaminants ou des polluants susceptible d'entraîner des effets renforcés de type incendie, dispersion de produits toxiques, voire explosion en cas de réaction incontrôlée. Là encore, seul l'essai à une échelle réaliste permet de juger du risque correspondant.

Ces produits présentent des réactions d'incompatibilités chimiques peu connues. Même si l'enquête à la suite de la catastrophe de Toulouse a pointé du

FIGURE 2. Exemples de chloroisocyanuriques.

Nom chimique	Dichloroisocyanurate de sodium, anhydre DCCNa	Acide trichloroisocyanurique ATCC
Formule chimique		

doigt la présence sur le site de tels produits chlorés pouvant former un composé instable très réactif : le trichlorure d'azote (NCl_3) en présence de nitrate d'ammonium humide. Un autre comportement dangereux de ces produits est le risque de dégagement de fumées toxiques lors de leur décomposition thermique. En effet, cette décomposition, exothermique et auto-entretenue, est caractérisée par l'émission de chlore gazeux et la formation d'un résidu inerte poreux susceptible d'engendrer des nuisances à l'intervention (relargage progressif de chlore gazeux, par exemple).

Les sources potentielles d'allumage peuvent être de diverses natures : contamination, points chauds, décharges électriques, hydrolyse ou simple humidification accidentelle, friction, auto-échauffement.

L'incident de juillet 1997, en France, impliquant l'incendie de déchets de produits chlorés de ce type illustre bien le problème de la contamination : la conséquence a été l'évacuation de plus de 700 habitants à cause du nuage toxique et de son ampleur.

Pour mieux cerner les propriétés dangereuses de ces produits, l'INERIS a réalisé des essais de calorimétrie sur plusieurs chloroisocyanuriques – dichloroisocyanurate de sodium (DCCNa) et acide trichloroisocyanurique (ATCC), seuls puis en mélanges avec des produits incompatibles comme le nitrate d'ammonium. Selon la nature du chloroisocyanurique (Fig. 2), sel ou acide, la température de décomposition est différente et peut être relativement basse : environ 130 °C avec une forte énergie de décomposition,

d'environ 1800 J/g. De plus, des essais de sensibilité à l'impact et à la friction de tels mélanges avec des contaminants ont confirmé qu'ils avaient le comportement de matières explosives.

Les propriétés dangereuses des produits chlorés pour piscines, maintenant largement diffusés dans le grand public, restent méconnues et il convient d'être

Références

■ Fiche Toxicologique n°220, édition 1988, INRS.

■ Badeen C. M. et al. *Thermal Hazard Study of Mixtures of Ammonium nitrate and SDIC*, CANMET CERL report 2004-34 (J), novembre 2004 (à paraître dans *Thermal Analysis and Calorimetry*).

■ D.P. Nugent et al. *National Oxidising Pool Chemical Storage. Fire Test Project*, National Fire Protection Research Foundation Research Report, août 1998.

■ Carpenter A.R. et Ogle R.A. *Toxic Gas Release Caused by Thermal Decomposition of a Bulk Powder Blend Containing Sodium Dichloroisocyanurate*, *Process Safety Progress* (vol. 22), n°2, 2003, 75-82.

extrêmement attentif à ce que les opérations industrielles – de la fabrication à la distribution – soient menées en prenant en compte les risques potentiels d'incendie, de dispersion de toxiques et, le cas échéant, d'explosion en présence de contaminants. Pour ce qui est de l'utilisation par un public spécialisé ou par le grand public, il est nécessaire de développer l'information et la prévention par l'ensemble des moyens appropriés : brochures, modes d'emploi détaillés... En conséquence, l'INERIS entend développer des propositions concrètes (essais en semi-grand sur chloroisocyanuriques, rédaction de guides...) servant une meilleure évaluation et gestion des risques associés à ces produits, en appui aux pouvoirs publics et aux secteurs industriels concernés. ●

■ Richez J.-P. *Produits pour piscines : attention aux mélanges incompatibles Travail et Sécurité n°617, avril 2002.*

■ Dosne R. *Nuage toxique dans la vallée, Face au risque n°336, octobre 1997.*

■ Paul J.-M., Hecquet G., Mieloszynski J.-L. *Les chloroisocyanuriques, Actualité chimique n°274, avril 2004.*

Liste des membres de la Commission Scientifique **RISQUES DU SOL ET SOUS-SOL**

(au 1^{er} janvier 2005)

JEAN-PIERRE MAGNAN

Président de la Commission Scientifique
Risques du Sol et sous-Sol
Directeur Technique (géotechnique)
Laboratoire Central des Ponts-et-Chaussées

GÉRARD VOUILLE

Vice-Président de la Commission Scientifique
Risques du Sol et sous-Sol
(À titre personnel)

ALBERT ARMANGUÉ

Chef du Département Gypse
BPB Placo

GILBERT CASTANIER

Chef de la Division Géologie Géotechnique
EDF Branche Energies

PIERRE COMBES

Directeur de Recherche
École Nationale Supérieure des Mines de Paris

MAX-ANDRÉ DELANNOY

Adjoint à l'Inspecteur Général
des Carrières de Paris
IGS - Mairie de Paris

YVES GUISE

Coordonnateur Technique National
Charbonnages de France

PHO HOANG TRONG

Directeur de Recherche
École et Observatoire des Sciences de la Terre
Université Louis Pasteur

LYESSE LALOUÏ

Directeur de Recherche
École Polytechnique
Fédérale de Lausanne (CH)

JEAN LAMBERTI

Directeur Environnement
RHODIA

PATRICK LEBON

Adjoint au Directeur Scientifique
ANDRA

HORMOZ MODARESSI

Chef du Service Aménagement
et Risques Naturels
BRGM

HENRI MOLLERON

Président-Directeur-Général
COLAS Environnement et Recyclage

JEAN SICARD

Département de Génie Civil
École Normale Supérieure de Cachan

MATHIEU VESCHKENS

Chef de la section Ressources Minérales
ISSEP (B)

INVITÉS PERMANENTS

BERNARD FEUGA

GEODERIS

JEAN-PIERRE JOSIEN

GEODERIS

RISQUES DU SOL ET SOUS-SOL

●● 72 Introduction

- 74 **Risques naturels « mouvements de terrain »**
74 Cas des versants rocheux (Gloria SENFAUTE, Yann GUNZBURGER, Alain THORAVAL)
76 Les cavités souterraines (Christophe DIDIER, Jean-Marc WATELET, Jean-Jacques TRITSCH)
78 Le vieillissement des massifs rocheux (Claudia SORGI, Christophe AUVRAY)
- 79 **Risques liés à l'après-mine**
79 Le recours à des expérimentations *in situ*
(Gloria SENFAUTE, Xavier DAUPLEY, Cyrille BALLAND)
81 Le développement d'outils de diagnostic (Farid LAOUAFA, Mountaka SOULEY)
82 Le risque d'émission de gaz de mine, de feux souterrains ou de feux de terrils
(Zbigniew POKRYSZKA)
83 La cartographie des aléas miniers
(Christophe DIDIER, Laurent CAUVIN, Xavier DAUPLEY)
- 84 **Stockage en souterrain**
84 La séquestration souterraine de gaz à effet de serre
(Katia BESNARD, Zbigniew POKRYSZKA, Jean-Marc BRIGNON)
85 Expérimentations dans les laboratoires souterrains de stockage
(Pascal BIGARRÉ, Franz LAHAIE, Cyrille BALLAND)
- 87 **Surveillance des risques du sol et du sous-sol**
87 Surveillance et auscultation d'un secteur sous-miné
(Lynda DRIAD, Pascal BIGARRÉ)

Une expertise pluridisciplinaire

L

INERIS est fortement impliqué dans la gestion des risques naturels de type mouvements de terrain et dans celle de l'après-mine ainsi que dans la problématique des techniques de stockage en souterrain, tant pour ce qui concerne la mise en dépôt, sur de très longues durées, de déchets toxiques ou radioactifs que le stockage d'hydrocarbures ou encore la séquestration de gaz à effet de serre au sein des terrains houillers.

Dans ces différents domaines, plusieurs champs d'expertise sont mis à disposition des pouvoirs publics, des collectivités territoriales et des partenaires industriels. Outre la prévention des risques de mouvements de terrain (affaissements, effondrements...), une expertise forte



Cavité souterraine abandonnée.

existe au sein de l'Institut en termes d'évaluation des risques liés aux écoulements de fluides (eau et surtout gaz) ainsi qu'en termes d'auscultation et de surveillance des massifs rocheux. Le développement croissant de ce dernier domaine a d'ailleurs conduit l'INERIS à créer en son sein, en 2004, un Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-Sol.

Il est nécessaire que l'expertise requise pour ces problématiques complexes et souvent pluridisciplinaires s'appuie sur une production de connaissances pointues. À cet effet, l'INERIS conduit des programmes de recherche ayant pour objectif le développement de méthodes et outils destinés à améliorer les capacités d'analyse et de gestion du risque. Ces programmes recourent fréquemment à des instrumentations sur site destinées à capitaliser des informations sur le comportement des ouvrages souterrains et des massifs rocheux. Cette instrumentation pourrait déboucher sur la mise en évidence de signaux faibles, possibles précurseurs d'évolutions dangereuses. Ils permettent également le développement de techniques et matériels innovants dans les domaines de l'investigation (recherche et localisation de vides), de l'auscultation (mesures de contraintes...) et de la surveillance (microsismique, tachéométrie). Une attention toute particulière est portée à l'élaboration d'ouvrages de synthèse à caractère méthodologique visant à valoriser l'expérience de l'Institut en la mettant à disposition des publics concernés.

Dans le domaine de l'appui aux pouvoirs publics, l'INERIS joue également un rôle majeur dans l'élaboration de Plans de Prévention des Risques (PPR), que ces risques soient d'origine naturelle (PPRN) ou minière (PPRM).



Effondrement d'un pan de la falaise de Valabres (Alpes-Maritimes).

L'ensemble de ces démarches est mené en étroite collaboration avec des partenaires universitaires tels que l'INPL (École des mines de Nancy et École Nationale Supérieure de géologie de Nancy) avec lequel il partage un laboratoire, le LAEGO. L'INERIS intervient aussi au sein d'une structure partenariale de recherche qu'il a contribué à créer : le Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'impact et la sécurité des Ouvrages souterrains (GISOS) associant l'INERIS, le BRGM, l'INPL et l'École des Mines de Paris ainsi qu'au travers de GEODERIS, Groupement d'Intérêt Public destiné à apporter un appui opérationnel aux DRIRE dans le domaine de l'après-mine. ●

L'INERIS JOUE ÉGALEMENT UN RÔLE MAJEUR DANS L'ÉLABORATION DE PLANS DE PRÉVENTION DES RISQUES (PPR), QUE CES RISQUES SOIENT D'ORIGINE NATURELLE (PPRN) OU MINIÈRE (PPRM).

Risques naturels

« mouvements de terrain »



INERIS possède une expérience reconnue dans le domaine de la prévention des risques naturels de type mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines ou de versants rocheux instables. Le travail de l'Institut dans ce domaine consiste à diagnostiquer les risques susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens potentiellement exposés mais également à identifier et proposer les solutions de maîtrise du risque les plus adaptées au contexte (confortement, surveillance, gestion de l'aménagement du territoire...). Dans ses missions d'expertise et de conseil, l'INERIS contribue à la mise au point méthodologique et la réalisation de Plans de

Prévention des Risques naturels prévisibles (PPRN).

Cette capacité d'expertise s'appuie sur des programmes de recherche et d'appui technique destinés à progresser dans la connaissance des mécanismes d'instabilité. Ces programmes fournissent aux experts de l'INERIS l'occasion de développer de nouvelles approches techniques en terme d'analyse et de traitement du risque. L'expertise de l'Institut s'appuie également sur :

- ⦿ des compétences en modélisation numérique, notamment au travers de l'utilisation de codes de calcul permettant la prise en compte de couplages hydro-mécaniques dans des milieux poreux ou fracturés ;
- ⦿ un recours très fréquent à des retours d'expérience ainsi qu'à des expérimentations sur site, en grandeur nature. Ce parti pris présente un double objectif : collecter des données quantitatives essentielles à une meilleure appréhension de la connaissance des phénomènes mis en jeu et valider les méthodes, les modèles et les moyens d'auscultation et de surveillance développés par ailleurs. ●

Cas des versants rocheux

GLORIA SENFAUTE, YANN GUNZBURGER, ALAIN THORAVAL

Dès lors qu'il s'agit de garantir la stabilité de fronts rocheux, l'expertise de l'Institut est également mise à la disposition des collectivités ou administrations territoriales (risques d'éboulements en secteurs urbanisés) ou des industriels (exploitants de carrières à ciel ouvert, par exemple).

Il s'agit d'un domaine particulièrement complexe situé à la croisée de différentes disciplines (géologie, mécanique, thermique, hydrogéologie...). Des travaux de

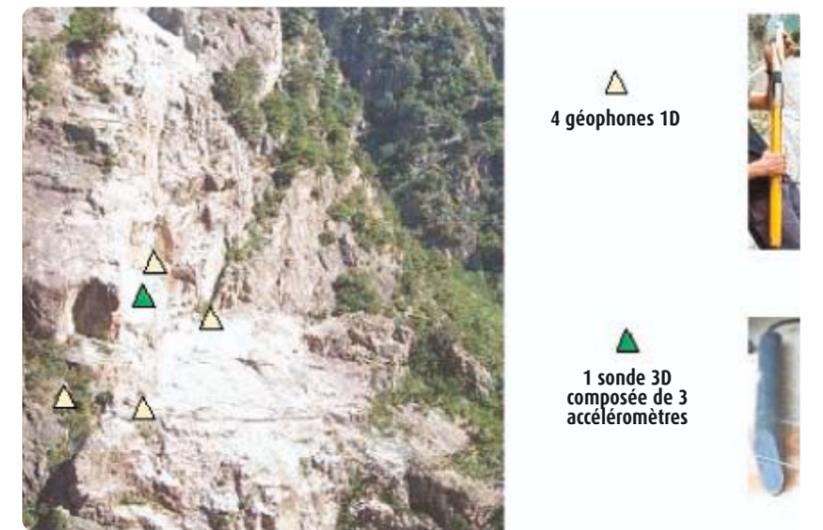
recherche, menés sur deux « sites expérimentaux » ont permis de progresser dans la compréhension des principaux mécanismes de mouvements rocheux, grâce notamment à deux thèses de doctorat, l'une soutenue fin 2004, l'autre en préparation.

Le site des Rochers de Valabres, situé dans la vallée de la Tinée (Alpes-Maritimes), est équipé d'un dispositif expérimental permettant une auscultation continue de la falaise (déplacements, variations thermiques...). Plusieurs campagnes de mesures tachéométriques ont également permis de mettre en évidence l'influence des variations journalières de la température ambiante sur le comportement du massif rocheux. Parallèlement, un dispositif d'écoute microsismique a été installé

sur le versant (Fig. 1), dans le but de détecter des événements précurseurs de très faible intensité mais pouvant laisser suspecter la préparation d'une instabilité de grande ampleur.

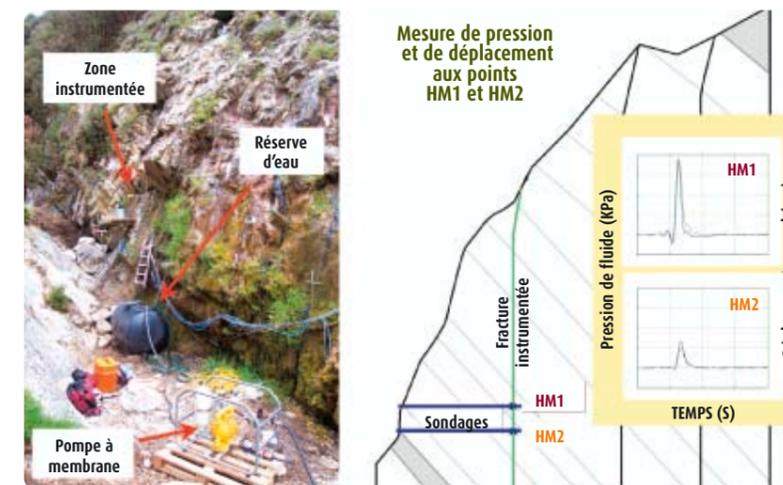
Les premiers résultats obtenus confirment l'intérêt de l'écoute microsismique en termes de compréhension et de prédiction des mécanismes à l'origine de l'éboulement des versants instables. Le travail de recherche se poursuit sur le comportement mécanique de la matrice rocheuse et des discontinuités, en collaboration avec l'Université de Nice-Sophia Antipolis (laboratoire Géosciences Azur), le LCPC et d'autres partenaires. Par ailleurs, une autre expérimentation *in situ*, celle du site de Coaraze (Alpes-Maritimes) s'intéresse, pour sa part, au rôle essentiel des circulations de

FIGURE 1.



Disposition du réseau des capteurs installés sur le site expérimental de Valabres.

FIGURE 2.



Expérimentation hydromécanique sur le site de Coaraze (06).

fluides (eaux souterraines, précipitations, gel/dégel...). Les expérimentations entreprises consistent à soumettre un petit massif calcaire fracturé, bien isolé et instrumenté, à des sollicitations hydrauliques dans le but de mesurer la réponse hydromécanique du massif (Fig. 2).

Une sonde amovible d'auscultation a été conçue et développée en collaboration avec le laboratoire Géosciences Azur. Elle a notamment permis la réalisation de mesures hautes fréquences de pression et

de déformation d'une très grande précision. Ces mesures ont mis en évidence que le couplage hydromécanique revêt une importance particulière dans le cas d'un massif fracturé. Les résultats expérimentaux obtenus *in situ* ont permis la mise au point d'un modèle rhéologique introduit dans un code de calcul. ●

Références

- Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Senfaute G., Piguet J.-P., Guglielmi Y. (2004) Field investigations, monitoring and modeling in the identification of rock fall causes. IX International symposium on Landslides. Rio de Janeiro, Brazil, pp. 557-563. 28th June to 2nd July 2004.

- Cappa F., Guglielmi Y., Fénart P., Merrien-Soukatchoff V. et Thoraval A., (2005) Hydromechanical interactions in a fractured carbonate reservoir inferred from hydraulic and mechanical measurements, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, n°42, pp 287-306.

Les cavités souterraines

CHRISTOPHE DIDIER,
JEAN-MARC WATELET,
JEAN-JACQUES TRITSCH

L'expérience et l'expertise acquises par l'INERIS au cours des dernières décennies en font aujourd'hui un organisme de référence en France dans le domaine de l'évaluation des risques liés à la présence de cavités souterraines en activité ou abandonnées. Dans ce domaine, l'Institut intervient dans le diagnostic de stabilité des ouvrages et

contribue à l'élaboration de nombreux PPRN mouvements de terrain liés aux « cavités souterraines », notamment dans des territoires à forts enjeux de surface (Fig. 1). Outre la démarche purement technique de hiérarchisation de l'aléa, les experts de l'INERIS sont souvent appelés à assister les services instructeurs lors de la mise en œuvre des phases de zonage réglementaire et de la rédaction du règlement. Tirant parti des nombreux retours d'expérience, les compétences de l'INERIS ont également donné lieu à différentes actions de valorisation et de communication : rédaction de guides méthodologiques, organisation de journées professionnelles de sensibilisation, réalisation d'un film destiné à l'information des populations exposées aux risques d'effondrement, etc. L'Institut est également impliqué dans l'évaluation des solutions techniques de mise en sécurité. Une recherche est en cours sur les possibilités de réutilisation de sous-produits issus de processus industriels pour le comblement de cavités souterraines. Dans ce cadre, et en partenariat avec Aluminium PECHINEY, EDF, SURSCHISTE et GTS, l'INERIS a participé à la conception et à la mise en œuvre d'un plot d'essai consistant à remblayer un secteur d'une ancienne carrière de pierre à ciment des Bouches-du-Rhône à l'aide d'un coulis à base de cendres volantes et d'une charge constituée par un déchet issu des résidus de lavage de la bauxite : la Bauxaline® (Photo 1).

FIGURE 1.



Exemple de cartographie des aléas en zone péri-urbaine.



PHOTO 1.

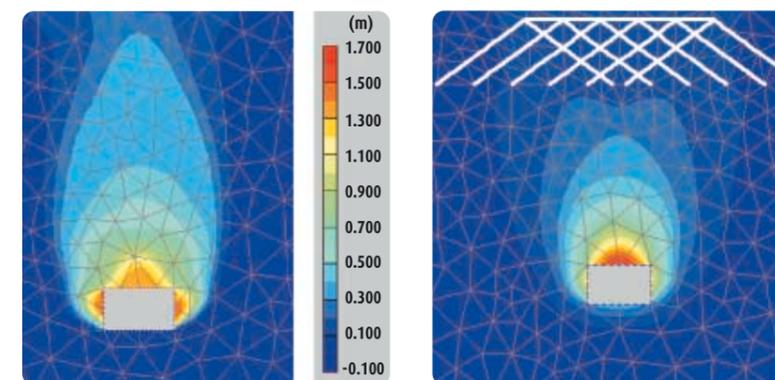
Différentes vues du plot de remblayage à l'aide d'un coulis à base de Bauxaline®.

Cette expérimentation a permis d'élaborer une méthodologie visant à définir pour quelles configurations de sites et quelles caractéristiques de matériau, le recours au comblement de cavités peut être envisagé avec des garanties satisfaisantes dans le long terme, tant en termes mécanique (stabilité des terrains) qu'environnemental (pas de pollution).

Par ailleurs, l'INERIS s'est fortement investi, au cours de ces deux dernières années, dans l'analyse des impacts induits par les mouvements de terrain sur le bâti et les infrastructures de surface. Une synthèse des solutions techniques les mieux adaptées à la nature du risque et aux caractéristiques des ouvrages exposés, existants ou futurs, a ainsi été réalisée.

Parallèlement, des techniques de mise en sécurité innovantes ont été explorées. On citera la mise en place de géomembranes ainsi que la technique (modifiée) des inclusions rigides qui, comme le montrent les résultats d'un calcul numérique 2D, semble pouvoir permettre une réduction sensible de l'impact en surface d'une remontée de fontis (Fig. 2).

FIGURE 2.



Déplacement induit par une remontée de fontis, sans et avec inclusions rigides.

Références

- Watelet J.-M. (2005) Évaluation technique de l'utilisation de résidus industriels comme matériaux de remblayage. Actes du séminaire de restitution INERIS-LCPC « Évaluation et gestion des risques liés aux cavités souterraines abandonnées ». 11 mars 2005, Paris.
- 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. Guide méthodologique. Rapport INERIS DRS-05-56408/R03.
- Abbass Fayad A. Étude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences induites en surface. Thèse de doctorat de l'INPL, spécialité : génie civil, hydrosystèmes, géotechnique. Présentée et soutenue le 18 juin 2004, 146 p. + annexes.

Le vieillissement des massifs rocheux

CLAUDIA SORGI, CHRISTOPHE AUVRAY

Les massifs rocheux sont composés de matériaux qui « vieillissent », au sens où leurs propriétés mécaniques ou physico-chimiques évoluent dans le temps et se dégradent progressivement. Pour progresser dans la compréhension des mécanismes à l'origine de ce phénomène, qui peut expliquer la ruine différée de certains ouvrages (cavités ou versants), l'INERIS a conduit un programme de recherche, en collaboration avec l'École nationale supérieure de géologie de Nancy et le CERMES (Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols).

Ce programme a notamment nécessité une importante campagne expérimentale en laboratoire (Fig. 1) s'appuyant sur des protocoles expérimentaux innovants (essais de fluage à hygrométrie contrôlée avec détection de l'endommagement par variations de volume). Ces essais ont notamment confirmé l'importance de l'hygrométrie ambiante sur le comportement instantané et, plus encore, différé des échantillons de roches prélevés en souterrain. Les campagnes expérimentales ont également clairement mis en évidence une augmentation de l'altération des propriétés du gypse depuis le cœur des piliers jusqu'à leur périphérie. À cette occasion, le recours à des appareillages performants et modernes (MEB Environnemental disponible à l'INERIS) a montré tout son intérêt et toutes ses promesses dans l'appréhension, à l'échelle microscopique, des modifications de la matrice rocheuse à l'origine des dégradations telles qu'on peut les observer à l'échelle macroscopique.

Par ailleurs, une ancienne carrière souterraine de craie abandonnée, située sur le territoire de la commune d'Estreux (Nord), a été instrumentée afin d'en faire un « laboratoire expérimental » destiné à l'étude du phénomène de vieillissement des roches. Divers dispositifs d'auscul-

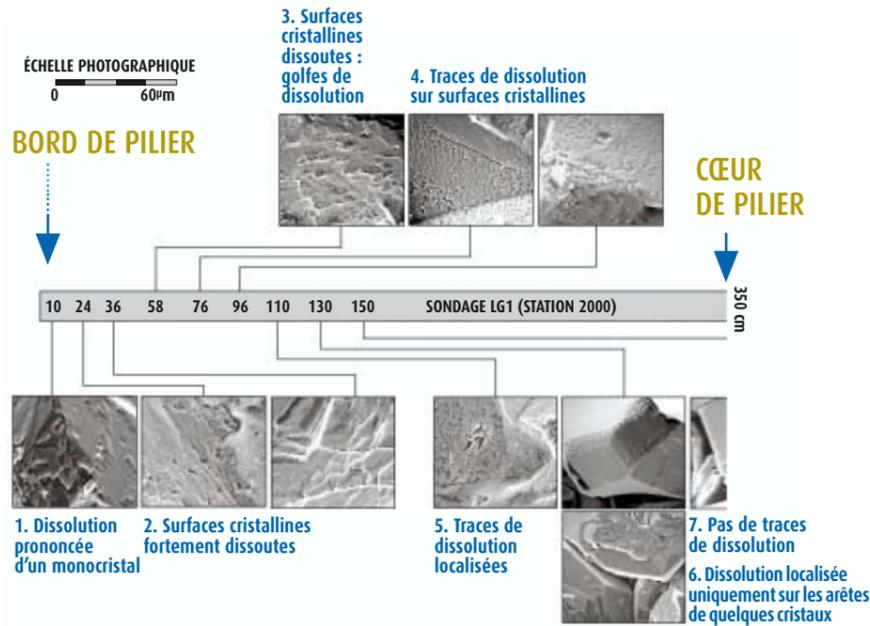


FIGURE 1.
Évolution de l'aspect des cristaux de gypse en fonction de la distance du bord d'un pilier résiduel.

tation du massif (déplacement, température, hygrométrie...) ont ainsi été mis en œuvre. Leur suivi sur une longue période permettra de constituer une base de données précieuse pour l'analyse du comportement à long terme de ce type de matériau. ●

Références

- Sorgi C. (2004) Contribution méthodologique et expérimentale à l'étude de la diminution de la résistance des massifs rocheux par vieillissement. Rapport final INERIS DRS-04-45866/R02, 2 novembre 2004.
- Priol G., de Gennaro V., Delage P., Sorgi C., Vicente J., Hernandis C. (2004) Influence des fluides sur le comportement différé de la craie. Actes des 22^{es} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 3-4 juin 2004, Marne-la-Vallée (CD-ROM).
- Auvray C., Homand F., Hoxha D., Didier C. (2004) Influence du temps et de l'hygrométrie sur le comportement du gypse. Revue Française de Géotechnique, n°106-107, pp. 41-51.
- Auvray C., Homand F., Sorgi C. (2004) The aging of gypsum in underground mines. Engineering Geology, vol. 74, pp. 183-196.

Risques liés à l'après-mine

D

urant plusieurs siècles, l'exploitation minière française a constitué une source de richesse et de développement pour le pays. Il aura suffi de quelques décennies pour que, sous l'effet conjugué de l'appauvrissement des ressources et de la concurrence internationale, cette activité voie progressivement la grande majorité des sites d'extraction se fermer.

La cessation de l'activité minière n'engendre pas nécessairement la disparition des risques et nuisances susceptibles d'affecter les terrains de surface situés dans l'emprise des anciennes exploitations. Ainsi, durant la période qui suit l'exploitation, communément appelée « après-mine », de nombreux désordres peuvent se développer, parfois dès l'arrêt des travaux mais également beaucoup plus tardivement.

Outre les phénomènes de mouvements de terrain (affaissements, effondrements) et les impacts sur les eaux souterraines et de surface, certains anciens sites miniers peuvent être affectés par des remontées

de gaz susceptibles de présenter des compositions dangereuses. De tels phénomènes peuvent avoir des conséquences importantes sur les personnes et les biens présents en surface et influencer sensiblement sur l'aménagement du territoire au sein des zones à risque.

S'appuyant sur une longue compétence minière, l'INERIS occupe une place centrale dans la démarche de prévention que les pouvoirs publics ont mise en place pour gérer les risques liés à l'après-mine. L'expertise de l'Institut se fonde sur des travaux de recherche variés, développés notamment dans le cadre du Groupement de Recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains (GISOS).

Ces travaux s'appuient notamment sur plusieurs expérimentations *in situ* permettant l'acquisition de données nécessaires à la compréhension des phénomènes ainsi qu'au développement d'outils de diagnostic et de surveillance relatifs à la stabilité des terrains de même qu'à l'émission de gaz de mine. L'INERIS joue également un rôle majeur dans l'établissement des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM), instaurés par la loi du 30 mars 1999, à la fois en terme méthodologique (élaboration d'un guide méthodologique pour la réalisation des PPRM) mais également en terme de réalisation (une dizaine de sites traités par année en moyenne). ●

Le recours à des expérimentations *in situ*

GLORIA SENFAUTE, XAVIER DAUPLY, CYRILLE BALLAND

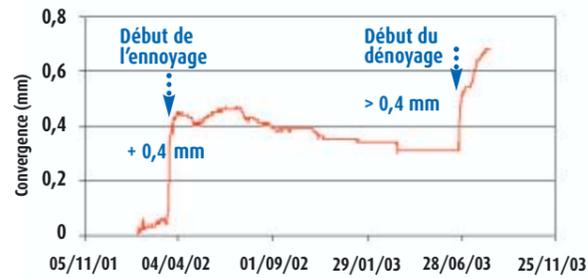
Les expérimentations sur site visent à renseigner, au mieux, l'évolution des caractéristiques des ouvrages et de leur environnement dès lors que ceux-ci sont soumis à des sollicitations pouvant compromettre à terme la stabilité du système.

Ainsi, pour étudier l'impact de l'ennoyage sur la tenue des travaux miniers et sur la qualité des eaux souterraines, un site pilote a été instrumenté sur le territoire de la commune de Tressange (Moselle), au sein d'une ancienne mine du bassin ferrifère lorrain. Deux piliers ont été isolés du reste des travaux par la réalisation de barrages étanches, ce qui a permis la mise en eau, durant 18 mois, du plot préalablement instrumenté.

L'expérimentation a confirmé que l'effet d'un ennoyage puis d'un dénoyage successifs conduit à des déformations des

➡ ➡ ➡ suite page 80

FIGURE 1A.



Mesures au cours de l'ennoyage et du dénoyage du site pilote de Tressange.
(A) évolution de la convergence
(B) activité microsismique

FIGURE 1B.

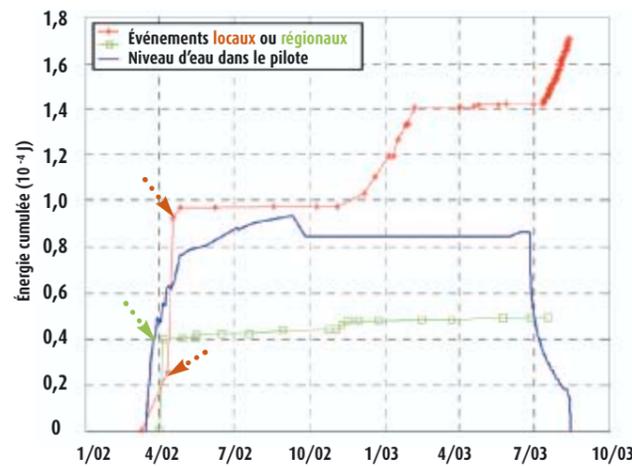


FIGURE 2A.

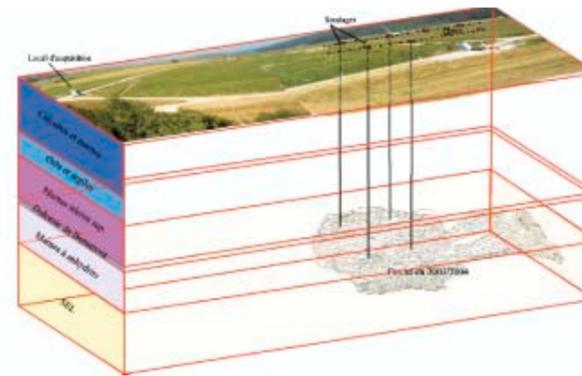
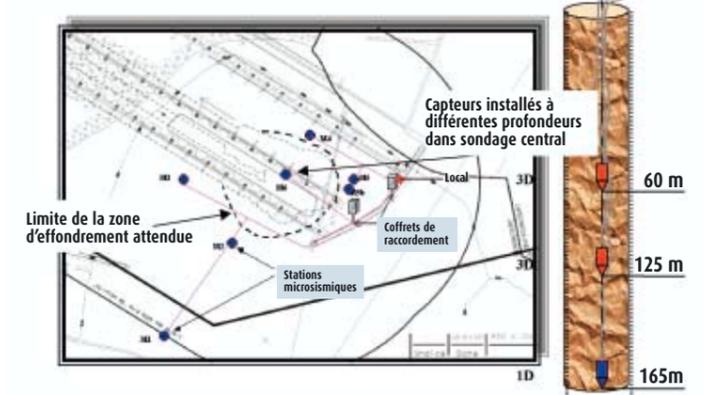


Schéma de la cavité saline du site expérimental de Cerville-Buissoncourt et coupe géologique.

FIGURE 2B.



Réseau des capteurs microsismiques installé autour de la cavité saline sur le site de Cerville-Buissoncourt.



ouvrages (piliers, toit). Les déformations observées se sont révélées d'amplitude très limitée (inférieure au mm), résultant en partie du faible niveau d'eau (6 m) possible pour l'expérience. Les signaux détectés par le réseau d'écoute microsismique tendent à confirmer que les principales manifestations d'instabilité, limitées ici à des écaillages, se développent préférentiellement au sein des intercalaires marneux, durant les phases transitoires d'ennoyage ou de dénoyage et dans les secteurs préalablement dégradés le plus fortement (Fig. 1).

Par ailleurs, un dispositif spécifique a été installé pour permettre un suivi de la composition gazeuse présente dans les travaux. Il a ainsi été mis en évidence, lors de l'ennoyage, un appauvrissement en O_2 et un enrichissement en CO_2 de l'atmosphère initiale. Le mécanisme probable pour expliquer ce phénomène est celui de l'oxydation de la pyrite présente dans le gisement ferrifère, couplée à une dissolution de la calcite par l'acide sulfurique produit. L'ensemble des résultats expé-

riementaux obtenus a permis de confirmer que l'ennoyage de vides miniers peut constituer un élément susceptible de modifier sensiblement la composition de l'atmosphère.

Parallèlement, un autre site expérimental a été instrumenté en 2004 (Fig. 2A et 2B). Il s'agit d'une cavité saline située à Cerville-Buissoncourt (Meurthe-et-Moselle). Cette cavité, dont les dimensions et la géométrie ont été précisées par des auscultations au sonar, résulte d'une technique d'exploitation (dissolution par pistes et sondages) qui la destine à un effondrement prochain.

Cette expérimentation, menée dans le cadre du GISOS et en étroite collaboration avec la société SOLVAY, a pour objectif principal d'améliorer la connaissance du comportement et de l'évolution des cavités salines. Elle doit également permettre de valider ou de développer des outils et méthodes destinés à surveiller l'évolution de la stabilité des cavités salines de dissolution. L'instrumentation regroupe des capteurs de différentes natures : géotechnique (inclinométrie, extensométrie, tachéométrie...), géophysique (microsismique, tomographie sismique...) et hydrochimique (saumure, gaz). ●

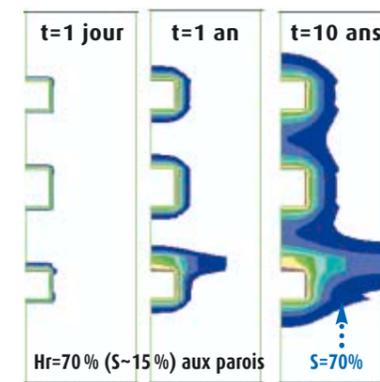
Références

- Ghoreychi M., Daupley X. (2004) Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel. *Revue Française de Géotechnique*, n°106-107, 1^{er} et 2^e trimestres 2004.
- Souley M., Thoraval A. (2004) Modélisation hydromécanique de l'ennoyage partiel d'un site expérimental dans une mine de fer lorraine. *Compte-rendu des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur (JNGG)*, Lille, 28-30 juin 2004, p. 553-562.
- Senfaute G., Wassermann J. (2004) Apport de la méthode microsismique à la compréhension de l'impact de l'ennoyage sur la stabilité des ouvrages miniers abandonnés. AGAP (Association pour la qualité en géophysique appliquée non pétrolière), Lyon, 28-30 Octobre 2004.
- Pokryszka Z., Grabowski D. (2003) On the surface noxious gas emissions from old iron mines. 30th international conference of Safety in Mines Research Institutes, South African Institute of Mining and Metallurgy.

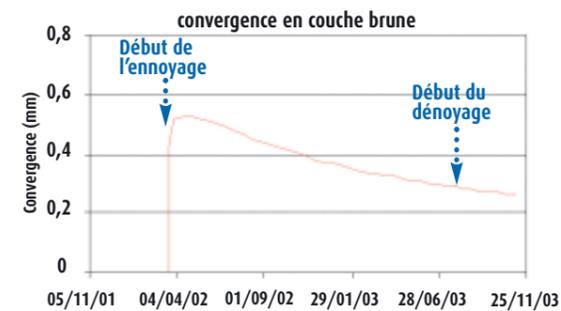
Le développement d'outils de diagnostic

FARID LAOUAFA, MOUNTAKA SOULEY

FIGURE 1.



Modélisation de l'évolution du degré de saturation autour des trois chambres et de la convergence en couche brune (Hr : humidité relative de l'air, S : degré de saturation).



Dès lors que les contextes géologique, hydrogéologique ou d'exploitation s'avèrent particulièrement complexes, le recours à des outils de modélisation, notamment numérique, devient indispensable. L'INERIS poursuit le développement d'outils dans les domaines de l'analyse numérique (méthode des éléments finis, différences finies, éléments distincts...), de la rhéologie (lois de comportement non linéaires) et des couplages thermo-hydro-mécaniques.

La fiabilité et la performance des modèles ainsi développés dépendent étroitement du soin porté à leur calage ainsi que de la qualité des données d'entrée. De fait, le recours aux informations collectées lors des expérimentations sur site est de toute première importance pour disposer de modèles validés. Ainsi, des travaux de modélisation ont été menés pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes physiques et physico-chimiques complexes mis en jeu lors de l'ennoyage du site pilote de Tressange. Après calibration, les modèles établis ont permis de reproduire de manière satisfaisante les déplacements mesurés lors de la phase d'ennoyage. Il est désormais possible de restituer l'interaction « eau-roche » en termes de saturation progressive du massif lors d'une phase d'ennoyage (Fig. 1). Ceci ouvre des perspectives intéressantes pour la prise en compte de l'effet de l'eau sur la stabilité des ouvrages dans d'autres contextes et configurations. ●

Référence

- Laouafa F., Ghoreychi M. (2005) An improved method for evaluation of behavior of abandoned room and pillar salt mines. *IACMAG*, Turin, Italie, 8 p.

Le risque d'émission de gaz de mine, de feux souterrains ou de feux de terrils

ZBIGNIEW POKRYSZKA



PHOTO 1. Aménagement préventif d'une galerie minière ouverte. La sortie de gaz de mine est visualisée à l'aide de fumigène.

Les mines souterraines arrêtées peuvent faire l'objet de remontées de gaz dangereuses en surface dès lors que des vides souterrains persistent, que l'atmosphère au sein du réservoir minier est sensiblement différente de l'air extérieur et qu'il existe des possibilités de migration de ce mélange gazeux vers la surface. Les principaux risques relatifs à ces émissions sont l'asphyxie, l'intoxication (y compris d'origine radioactive) et l'explosion. Ces risques sont particulièrement préoccupants dans le cas où une accumulation de ces gaz est possible au sein de volumes confinés (sous-sols de bâtiments, par exemple). Les feux souterrains constituent un autre phénomène dangereux se produisant dans les anciennes exploitations de combustibles solides. Outre le risque d'émission des gaz toxiques, ils peuvent favoriser la transmission du feu à la surface (zones boisées, par exemple). Pour accompagner la fermeture progressive des mines, l'INERIS a développé une méthodologie d'évaluation du risque d'émission gazeuse vers la surface. Cette méthodologie, élaborée initialement pour les anciennes exploitations de charbon, s'est progressivement adaptée et élargie à d'autres types d'exploitations également concernées par les problèmes liés

Références

■ Lagny C. et Pokryszka Z. (2004) Modeling of gas extraction from closed coal mines. 8th international symposium on environmental issues and waste management in energy and mineral production – SWEMP 2004, Kemer, Turkey, 17-20 may 2004.

■ Pokryszka Z., Grabowski D. (2004) Émissions gazeuses à partir des vides miniers dans le bassin ferrifère lorrain. *Revue Française de Géotechnique*, 2004, n° 106-107, pp. 31-39.

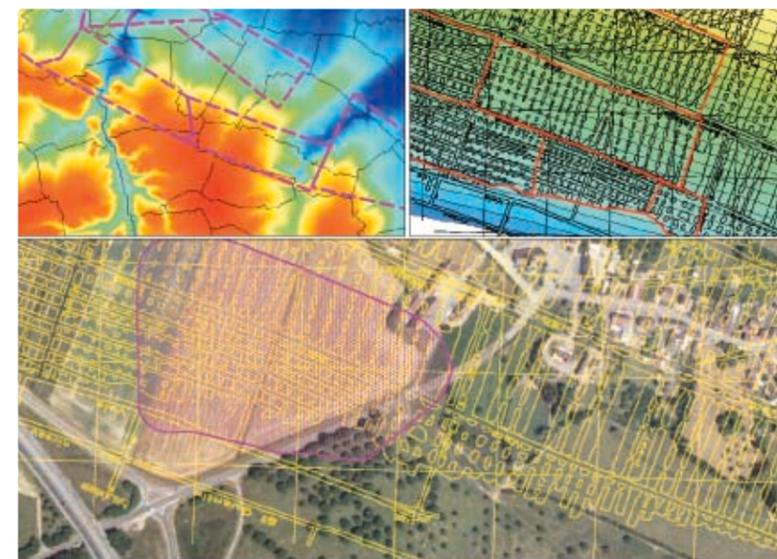
aux gaz de mine. L'expérience acquise a également permis d'importants progrès dans le domaine du développement et de l'amélioration des techniques de prévention (sondages de dégazage, traitement des orifices...) (Photo 1). De même, des développements significatifs ont permis de mettre au point des techniques aujourd'hui opérationnelles permettant de surveiller en continu des émissions gazeuses et des feux souterrains, le tout éprouvé et adapté aux conditions spécifiques d'anciens sites miniers. Cette méthodologie continue à s'enrichir, tirant parti des résultats des travaux de recherche menés sur cette thématique. À titre d'exemple, il a été possible de confirmer, par une expérimentation en laboratoire, que l'engorgement d'une mine de charbon contribue à réduire de manière considérable l'émission de gaz. Une charge hydraulique égale à la pression de méthane au sein du charbon limite ainsi la désorption de ce gaz à un niveau très faible. Dans ce cas, les phénomènes de transport par l'eau de gaz dissous et de diffusion prennent le relais de la désorption, avec une cinétique bien plus lente. Ce résultat a été pris en compte dans l'établissement des critères d'évaluation du risque. ●

La cartographie des aléas miniers

CHRISTOPHE DIDIER,
LAURENT CAUVIN, XAVIER DAUPLY

Afin d'afficher et de gérer au mieux les différents risques propres à l'après-mine, l'État s'est doté d'un outil réglementaire opérationnel et performant : le PPRM (Plan de Prévention des Risques Miniers). Établis sur les mêmes principes de base que les PPRN, ces plans 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 d'aménagement du territoire adaptées aux différentes contraintes liées à l'après-mine. Tirant bénéfice de la compétence scientifique et de l'expertise de l'Institut dans le domaine de l'après-mine et des PPR, le ministère chargé de l'Industrie s'appuie fortement sur l'INERIS pour le développement et la mise en œuvre de cette

FIGURE 1.



Évaluation de l'aléa affaissement en gisement penté à l'aide de MNT sous SIG.

démarche de prévention. Ainsi, outre la réalisation de nombreuses études d'aléas qui s'appuient sur les outils de diagnostic présentés plus haut (une dizaine par an en moyenne soit plus d'une trentaine depuis l'initiation de la démarche il y a trois ans), l'INERIS a été chargé de piloter la réalisation d'un guide méthodologique destiné à l'élaboration des PPRM. Ouvrage collectif élaboré sous la coordination scientifique et technique de l'INERIS, ce guide est conçu comme un document fonctionnel et pratique au sein duquel le lecteur peut obtenir les informations souhaitées sans devoir nécessairement s'appropriier l'intégralité de son contenu. La partie du document à caractère plus « réglementaire » (phase d'appréciation des enjeux et de définition du zonage réglementaire) a été rédigée sous la responsabilité du ministère chargé de l'Équipement. Les efforts et progrès réalisés pour la connaissance et la prévention du risque n'ont pas eu pour seul objet la compréhension des phénomènes à l'origine des nuisances, ils ont également porté sur les outils de restitution cartographiques. Ainsi, pour l'analyse des exploitations de fer fortement pentées de la région normande, une méthodologie de traitement systématique des données a été développée. Après géoréférencement des anciens plans miniers, un système d'information géographique (SIG) a été créé afin d'identifier les zones les plus prédisposées à la rupture en intégrant les principaux critères de stabilité (taux de défrètement, pente, profondeur).

Pour ce faire, deux modèles numériques de terrain (MNT) ont été mis au point : un pour la surface et un pour les travaux miniers. À partir de ces outils et d'une sectorisation des secteurs d'exploitation par zones homogènes, une identification automatisée des zones les plus prédisposées à un affaissement en surface est rendue possible (Fig. 1). Les secteurs identifiés sont ensuite reportés sur l'orthophotoplan de la surface en tenant compte de la dissymétrie des angles d'influence et de l'épaisseur variable du recouvrement. Grâce aux développements réalisés initialement, ce type d'application est maintenant réalisé de façon systématique. ●

Stockage en souterrain



Le recours au stockage en souterrain connaît, en France comme dans la plupart des pays industrialisés, un développement important. Ceci résulte notamment d'une préoccupation croissante de nos sociétés en termes de sécurité et de protection de l'environnement. Aujourd'hui, le stockage de produits pétroliers, notamment de gaz naturel, en cavités salines réalisées par lessivage, en aquifères ou en cavités minées, joue un rôle stratégique et économique majeur dans la politique énergétique de nombreux pays. Le développement des stockages en souterrain répond aussi aux exigences

croissantes en termes de préservation de l'environnement. Ainsi, le stockage en formation géologique profonde correspond à une option largement étudiée pour placer les déchets industriels toxiques ou radioactifs à l'abri de la biosphère. De même, la séquestration souterraine de gaz à effet de serre correspond à une voie de recherche largement explorée, dans une optique de développement durable. Si le stockage en souterrain ouvre des perspectives prometteuses en termes de maîtrise de l'énergie et de protection de l'environnement, il soulève également des questions importantes quant à la sécurité des personnes et aux impacts sur le milieu environnant. À la demande des pouvoirs publics et des organismes concernés, l'INERIS est engagé dans diverses thématiques de recherche visant à évaluer la faisabilité, l'efficacité ou la durabilité des stockages ou projets de stockages souterrains existant sur le territoire national. ●

La séquestration souterraine de gaz à effet de serre

KATIA BESNARD,
ZBIGNIEW POKRYSZKA,
JEAN-MARC BRIGNON

Pour donner suite aux accords de Kyoto sur le réchauffement de l'atmosphère, la séquestration géologique des gaz à effet de serre constitue l'une des solutions techniques les plus prometteuses. L'INERIS s'est investi dans cette réflexion stratégique au travers d'un programme de recherche visant à étudier la faisabilité de la séquestration du CO₂ au sein des gisements houillers. La structure interne du charbon permet en effet un piégeage (par adsorption) particulièrement efficace et permettant d'envisager le stockage de volumes de gaz très importants.

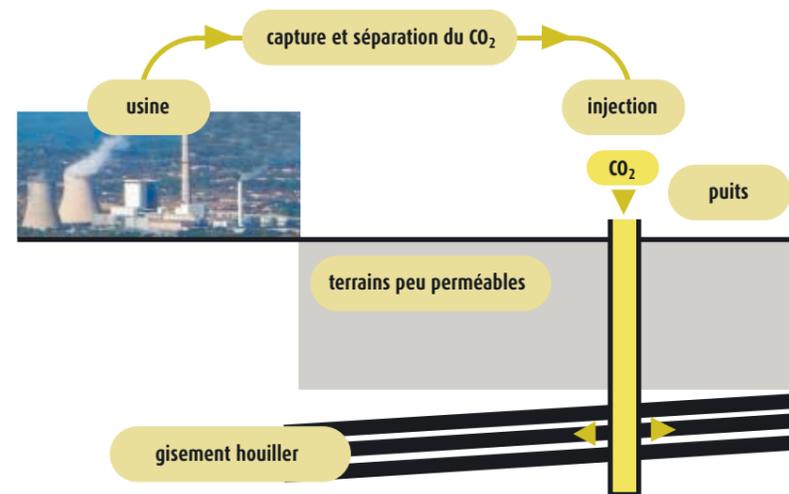


FIGURE 1. Schéma de principe de la récupération et du stockage de CO₂ dans les terrains houillers à l'échelle locale.

Le programme de recherche a pour objectif général de fournir les principaux éléments nécessaires à l'évaluation de la viabilité technico-économique de la récupération du dioxyde de carbone et de son stockage souterrain en phase gazeuse dans les gisements de charbon (anciennes mines et gisements houillers non exploités), ceci à l'échelle locale (bassin industriel) ou régionale, sur le territoire français. Il ressort d'une synthèse sur l'état des connaissances que les charbons français présentent des capacités d'adsorption importantes de gaz de l'ordre, en moyenne, de 20 à 30 m³ de méthane par tonne de charbon pur, pour une pression de gaz de 5 MPa. L'affinité du CO₂ avec le

charbon étant habituellement bien plus importante que celle du méthane, on peut estimer, en première approximation, des potentialités théoriques de stockage de CO₂ à environ 30 à 40 m³ de CO₂ par tonne de charbon. Une campagne spécifique de caractérisation en laboratoire à l'aide de matériels adaptés est en cours. Elle permettra de vérifier ces premières tendances encourageantes.

Parallèlement, le programme vise à constituer une base de données sur les sources des émissions industrielles de CO₂ à proximité des principaux bassins houillers. Cette base contribuera à constituer un outil renseignant sur le positionnement et les configurations respectives des sources

d'émission et des sites potentiels de stockage en France. L'approche croisée (phénoménologique et technico-économique) constitue une spécificité et un atout essentiel de l'INERIS dans la démarche d'analyse d'une problématique aussi complexe. ●

Référence

■ Besnard K., Pokryszka Z. et Lagny C. (2005) Methane and CO₂ sorption in French coals, International Recopol Workshop on CO₂ storage in Central European Countries, mars 2005, Szczryrk, Pologne.

Expérimentations dans les laboratoires souterrains de stockage

PASCAL BIGARRÉ, FRANZ LAHAIE,
CYRILLE BALLAND

Dans le cadre d'un accord de partenariat scientifique conclu entre l'INERIS et l'Andra, l'Institut a participé à plusieurs expérimentations *in situ* au sein du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. L'interprétation des données acquises, assurée à l'aide de modèles numériques et d'outils spécifiques de traitement de données, a pour objectif de caractériser l'endommagement du massif rocheux autour des ouvrages creusés. Cette zone endommagée peut, en effet, constituer une zone de transfert préférentiel, à très long terme, des radionucléides vers le milieu extérieur. L'INERIS a conçu et installé un dispositif d'auscultation par imagerie ultrasonique

tridimensionnelle permettant d'estimer le champ de vitesse des ondes au sein du massif rocheux environnant l'ouvrage souterrain (Fig. 1). Ce champ de vitesse est, en effet, très sensible à l'endommagement de la matrice rocheuse. Les mesures répétées à intervalles réguliers peuvent être analysées en terme d'évolution dynamique de l'endommagement du milieu ausculté au fur et à mesure que progresse un ouvrage souterrain.

● ○ ● suite page 86

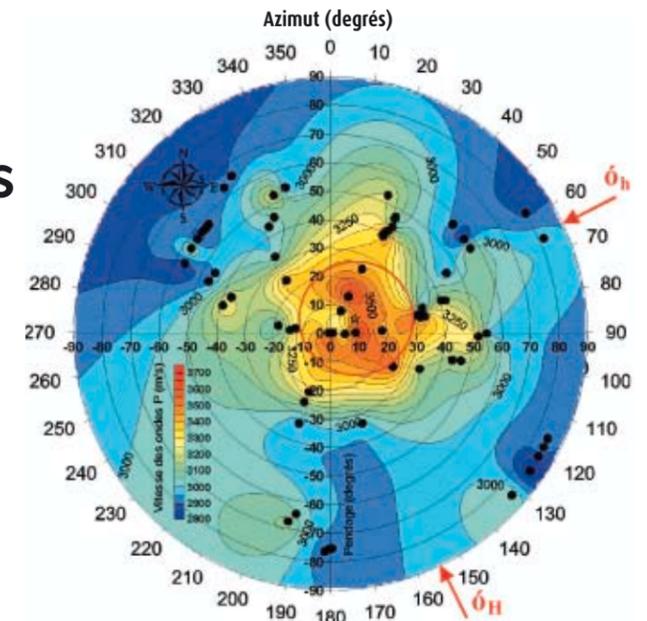


FIGURE 1. Exemple de stéréogramme du champ tridimensionnel de vitesse des ondes P mesuré *in situ*. Cette image met en évidence l'anisotropie physique de la matrice rocheuse, en termes d'amplitude et d'orientation. (Les vitesses élevées sont en rouge, les vitesses les plus faibles en bleu).

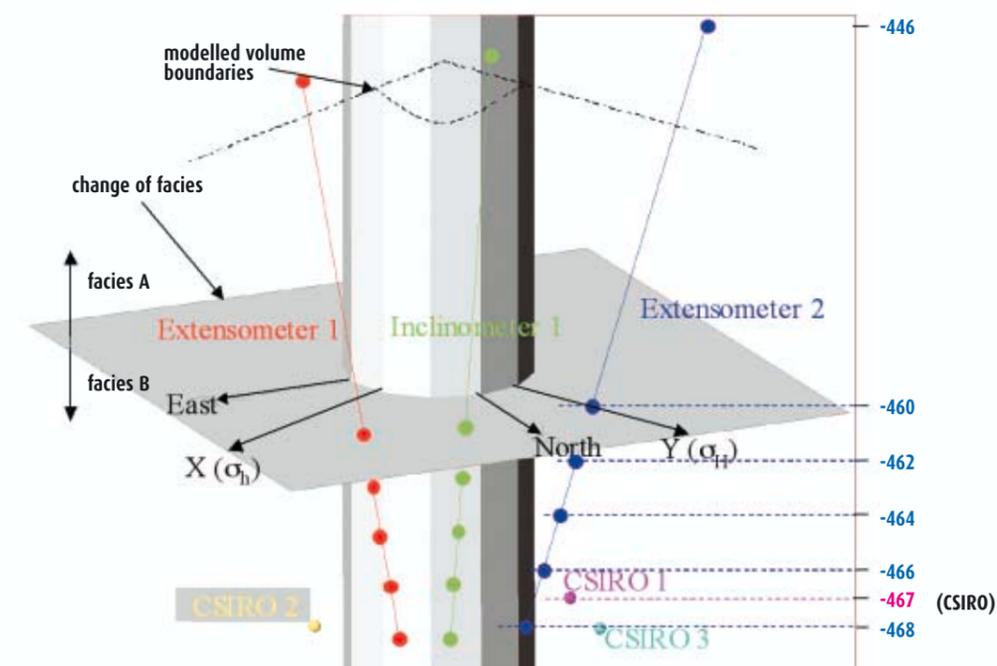


FIGURE 2.

Vue de synthèse d'un schéma prévisionnel de l'instrumentation géomécanique de l'expérimentation REP au laboratoire souterrain de recherche de l'Andra.



La connaissance de l'état des contraintes naturelles régnant dans le massif constitue une autre source d'information essentielle pour la caractérisation du site étudié. Dans ce domaine également, l'INERIS a développé un savoir-faire affirmé, s'appuyant notamment sur les techniques de

sur-carottage et de sous-carottage. Cette dernière consiste à interpréter, à partir d'une méthode d'inversion, un ensemble de mesures géomécaniques enregistrées lors de l'excavation d'un ouvrage souterrain pour en déduire l'état initial des contraintes régnant au sein du massif vierge. Afin de préparer la mise en œuvre d'une expérimentation de ce type lors du fonçage du puits principal, une étude préliminaire de simulation numérique a consisté à tester la robustesse et la sensibilité de cette technique puis à optimiser le schéma général de l'instrumentation à mettre en place (Fig. 2). Le logiciel SYTGEOmath®, développé par l'INERIS, a permis une analyse quantitative et comparative des différents schémas d'instrumentation envisageables. ●

Références

- Souley M., Su K., Ghoreychi M. et Armand G. (2003) Constitutive models for rock mass numerical implementation, verification and validation. Brummer et al. (eds), Swets & Zeitlinger B.V., Lisse, The Netherlands.
- Balland C. et Renaud V. (2005) Velocity field simulation and velocity survey design around the Meuse/Haute-Marne shaft excavation, Clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement, Tours, 14-18 mars.

- Renaud V., Lahaie F., Armand G., Verdel T. et Bigarré P. (2005) Conception, numerical prediction and optimization of geomechanical measurements related to a vertical Mine-by-Test at the Meuse/Haute-Marne URL, Clays in natural & engineered barriers for radioactive waste confinement, Tours, 14-18 mars.

Surveillance des risques du sol et du sous-sol



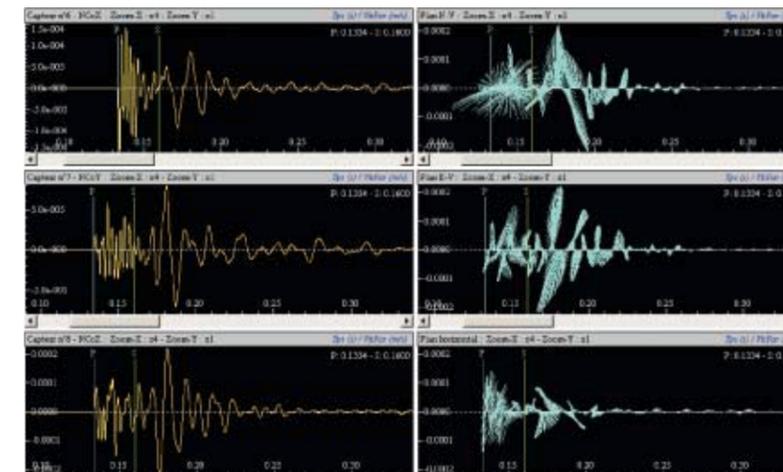
En 2004, l'INERIS a créé le Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol. Ce centre a pour objectifs de structurer et de renforcer, en les pérennisant, les moyens humains et outils technologiques disponibles et nécessaires à la constitution d'un pôle opérationnel dans le domaine de la surveillance des risques relatifs aux massifs rocheux et aux géostructures.

Ce projet, principalement orienté aujourd'hui sur la télésurveillance de zones à risques d'effondrement des terrains dans le bassin ferrifère lorrain, s'appuie sur les compétences et le savoir-faire que l'INERIS a développés dans ce domaine au cours de ces vingt dernières années. Parmi les thèmes d'action prioritaires, la technique de télésurveillance par des méthodes couplées microsismique et géotechnique vise à développer des systèmes « intelligents » de gestion automatique de vigilance et d'alarme tout en intégrant une forte capacité d'autodiagnostic. Par ailleurs, la mise en œuvre de protocoles de calibrage en grand de systèmes opérationnels sur site constitue un axe important et nécessaire pour la qualification et la validation métrologiques et le contrôle des données de mesure. ●

Surveillance et auscultation d'un secteur sous-miné

LYNDA DRIAD, PASCAL BIGARRÉ

FIGURE 1.



Dans le cadre d'un programme financé par le MinEfi et le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) de la région Lorraine, un travail de recherche en cours a pour objectif d'améliorer la connaissance et la compréhension des phénomènes physiques liés à la propagation des ondes dans l'environnement d'un ancien site minier sous surveillance. Un secteur d'exploitation d'une ancienne mine de fer située sous la commune de Nondkeil (Moselle) a été instrumenté par des capteurs géophysiques et géotechniques. Pour calibrer la chaîne de surveillance (sondes microsismiques

▶ ▶ ▶ [suite page 88](#)

Exemple de signaux enregistrés sur une sonde microsismique tri-directionnelle (gauche) et traitement automatique du signal pour détecter l'arrivée de l'onde S (droite).

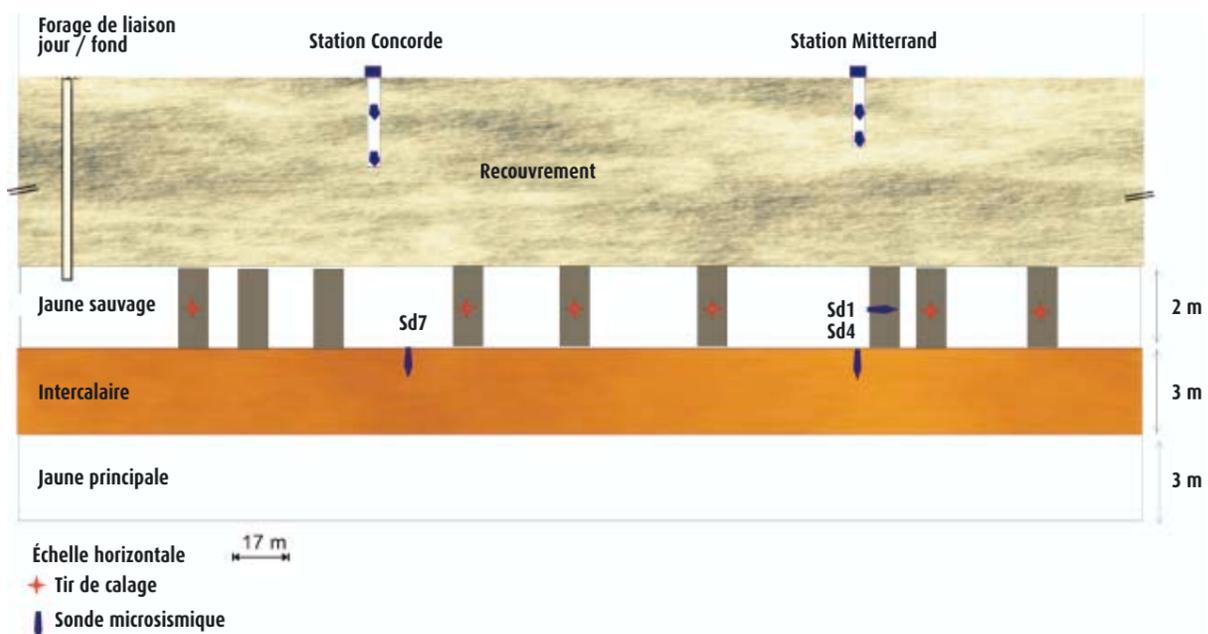


et stations de mesures de déformation), plusieurs tirs de faible charge d'explosif ont été réalisés au sein des anciens travaux. L'analyse approfondie des sismogrammes issus de ces tirs, en termes de vitesse de propagation, d'amplitude, de spectre et de polarisation a contribué à mieux appréhender les mécanismes complexes de propagation des ondes microsismiques dans le recouvrement, liés notamment à la présence de vides résultant des gale-

ries. Il est ainsi possible de caractériser la signature des signaux en différenciant, par exemple, ceux qui trouvent leur origine au sein des piliers (rupture des appuis) de ceux qui sont initiés au sein du recouvrement (chutes de toit). Cette analyse préliminaire permet une interprétation plus approfondie des signaux recueillis en phase de surveillance témoignant de micro-ruptures affectant diverses structures des ouvrages souterrains. ●

FIGURE 2.

Coupe verticale schématique du stot de Nondkeil en couche Jaune Sauvage (JS).



Références

■ Driad-Lebeau L., Lahaie F., Al Heib M., Josien J.-P., Bigarré P., Noirel J.-F. (2005) Seismic and geotechnical investigations following a rockburst in a complex French mining district. *International Journal of Coal Geology*, sous-presses.

■ Bennani M., Josien J.-P., Bigarré P. (2004). Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine, besoins, méthodes : apport de la microsismique. *Revue Française de Géotechnique*, n° 106-107, 2004, pp. 5-14. *Les techniques de l'Industrie Minière* n° 21, mars 2004.

■ Couffin S., Bigarré P., Bennani M., Josien J.-P. (2003) Permanent real time microseismic monitoring of abandoned mines for public safety. FMGM 2003. 6th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 15-18 September 2003, Oslo, Norway, pp. 437-444, Ed. Balkema.

PUBLICATIONS (2004-2005)

RISQUES CHRONIQUES

EFFETS DES POLLUTIONS SUR LE VIVANT

DUBOUDIN C., CIFFROY P., MAGAUD H.

Effects of data manipulation and statistical methods on species sensitivity distributions. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, vol. 23, n° 2, pp. 489-499.

BRION F., TYLER C.R., PALAZZI X., LAILLET B., PORCHER J.M., GARRIC J., FLAMMARION P.

Impacts of 17 β estradiol, including environmentally relevant concentrations, on reproduction after exposure during embryo-larval-, juvenile- and adult life stages in zebrafish (*Danio rerio*). *Aquatic Toxicology*, 2004, vol. 68, pp. 193-217.

MICHALLET-FERRIER P., AIT-AISSA S., BALAGUER P., DOMINIK J., HAFFNER G.D., PARDOS M.

Assessment of estrogen (ER) and aryl hydrocarbon receptor (AhR) mediated activities in organic sediment extracts of the Detroit river, using in vitro bioassays based on human MELN and teleost PLHC-1 cell lines. *Journal of Great Lakes Research*, 2004, vol. 30, n° 1, pp. 82-92.

ANNESI-MAESANO I., ACKERMANN U., BOUDET C., FILLEUL L., MEDINA S., SLAMA R., VIEGI G.

Effets des particules atmosphériques sur la santé. *Revue des études épidémiologiques*. *Environnement Risques & Santé*, 2004, vol. 3, n° 2, pp. 97-110.

DUBOUDIN C., CIFFROY P., MAGAUD H.

Acute-to-chronic species sensitivity distribution extrapolation. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2004, vol. 23, n° 7, pp. 1774-1785.

MOTTA A.C., DORMANS J.A., PELTRE G., LACROIX G., BOIS F.Y., STEERENBERG P.A.

Intratracheal instillation of cytoplasmic granules from phleum pratense pollen induces IgE and cell-mediated responses in the brown Norway rat. *International Archives of Allergy and Immunology*, 2004, vol. 135, n° 1, pp. 24-29.

BUISSON P., BACH V., ELABBASSI E.B., CHARDON K., DELANAUD S., CANARELLI J.P., LIBERT J.P.

Assessment of the efficiency of warming devices during neonatal surgery. *European Journal of Applied Physiology*, 2004, vol. 92, n° 6, pp. 694-697.

PILLON A., GOMEZ E., GAUTHIER P., ESCANDE A., BOUSSIOUX A.M., DUCHESNE M.J., PELEGRIN A., CASELLAS C., NICOLAS J.C., BALAGUER P.

Étude in vitro et in vivo de l'activité biologique de xéno-œstrogènes à l'aide de modèles cellulaires bioluminescents. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 2004, n° 4, pp. 93-101.

NASH J.P., KIME D.E., VAN DER VEN L.T.M., WESTER P.W., BRION F., MAACK G., STAHLSCHEMIDT-ALLNER P., TYLER C.R.

Long-term exposure to environmental concentrations of the pharmaceutical ethynylestradiol causes reproductive failure in fish. *Environmental Health Perspectives*, 2004, vol. 112, n° 17, pp. 1725-1733.

MAUSSET-BONNEFONT A.L., HIRBEC H., BONNEFONT X., PRIVAT A., VIGNON J., de SEZE R.

Acute exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields induces glial reactivity and biochemical modifications in the rat brain. *Neurobiology of Disease*, 2004, vol. 17, pp. 445-454.

LAUBIER L., LE MOIGNE M., FLAMMARION P., THYBAUD E., COSSA D.

The monitoring programme of the ecological and ecotoxicological consequences of the "Erika" oil spill. *Aquatic Living Resources*, 2004, vol. 17, n° 3, pp. 239-241.

MOTTA A.

Effets de polluants atmosphériques gazeux sur l'allergénicité du pollen de phleum pratense et sur la réponse allergique respiratoire. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, spécialité : toxicologie. Présentée et soutenue publiquement le 9 novembre 2004, 115 p.

PILLON A.

Ligands environnementaux des récepteurs des œstrogènes, développement d'outils de surveillance. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier 1. Présentée et soutenue publiquement le 19 mai 2004.

BESSET A., ESPA F., DAUVILLIERS Y., BILLIARD M., de SEZE R.

No effect on cognitive function from daily mobile phone use. *Bioelectromagnetics*, 2005, vol. 26, n° 2, pp. 102-108.

PILLON A., BOUSSIOUX A.M., ESCANDE A., AIT-AISSA S., GOMEZ E., FENET H., RUFF M., MORAS D., VIGNON F., DUCHESNE M.J., CASELLAS C., NICOLAS J.C., BALAGUER P.

Binding of estrogenic compounds by recombinant estrogen receptor alpha : application to environmental analysis. *Environmental Health Perspectives*, 2005, vol. 113, n° 3, pp. 278-284.

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

Copper-induced oxidative stress in three-spined stickleback : relationship with hepatic metal levels. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2005, vol. 19, pp. 177-183.

LEMAZURIER E., LECOMTE A., ROBIDEL F., BOIS F.Y.

Propylene glycol monomethyl ether. A 3-generation study of isomer B effects on reproductive and developmental parameters in rats. *Toxicology and Industrial Health*, 2005, vol. 21, pp. 33-40.

MENUET A., PELLEGRINI E., BRION F., GUEGUEN M.M., DUJARDIN T., ANGLADE I., PAKDEL F., KAH O.

Expression and estrogen-dependent regulation of the zebrafish brain aromatase gene. *Journal of Comparative Neurology*, 2005, vol. 485, n° 4, pp. 304-320.

BELGHAZI K., ELABBASSI E.B., TOURNEUX P., LIBERT J.P.

Assessment of whole body and regional evaporative heat loss coefficients in very premature infants using a thermal mannequin : influence of air velocity. *Medical Physics*, 2005, vol. 32, n° 3, pp. 752-758.

DEVILLER G., PALLUEL O., ALIAUME C., ASANTHI H., SANCHEZ W., FRANCO NAVA M.A., BLANCHETON J.P., CASELLAS C.

Impact assessment of various rearing systems on fish health using multibiomarkers response and metal accumulation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, vol. 61, pp. 89-97.

de SEZE R.

Effets des antennes de téléphonie mobile sur la santé. *Le Concours Médical*, 2005, tome 127, n° 14, pp. 782-784.

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.

ÉVALUATION DES RISQUES ET DÉCISION SANITAIRE

TISSOT S., VERRHIEST G., PICHARD A.

Seuils de toxicité aiguë en cas d'émissions atmosphériques accidentelles de substances chimiques dangereuses : méthodes de détermination et principaux résultats. *Environnement Risques & Santé*, 2004, vol. 3, n° 5, pp. 304-310.

MICALLEF S., BOIS F.

Application des modèles physiologiques à l'analyse de données de toxicocinétique. *Journal de la Société Française de Statistique*, 2004, tome 145, n° 3, pp. 15-32.

▶ ▶ ▶ suite page 90

HUBERT P.

Caractérisation de l'incertitude associée aux inférences dans l'évaluation de la mortalité attribuée à des facteurs de risque.
Journal de la Société Française de Statistique, 2004, tome 145, n° 3, pp. 33-46.

BROCHOT C.

Paramétrisation des modèles physiologiques toxicocinétiques.
Thèse de doctorat de l'Université Paris VI. Présentée et soutenue publiquement le 19 octobre 2004.

AMZAL B.

Optimisation bayésienne de décisions et de plans d'expériences par algorithmes particuliers.
Thèse de doctorat de l'Université Paris Dauphine. Présentée et soutenue publiquement le 6 décembre 2004.

NERRIERE E.

Distribution de l'exposition de la population urbaine à des polluants particuliers et gazeux génotoxiques et évaluation du risque de cancer. Étude Genotox ER.
Thèse de doctorat de l'Université Nancy I. Présentée et soutenue publiquement le 29 septembre 2004.

NERRIERE E., ZMIROU-NAVIER D., BLANCHARD O., MOMAS I., LADNER J., LE MOULLEC Y., PERSONNAZ M.B., LAMELOISE P., DELMAS V., TARGET A., DESQUEYROUX H.

Can we use fixed ambient air monitors to estimate population long-term exposure to air pollutants ? The case of spatial variability in the Genotox ER study.
Environmental Research, 2005, vol. 97, n° 1, pp. 32-42.

DIACK C., BOIS F.

Pharmacokinetic-pharmacodynamic models for categorical toxicity data.
Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2005, vol. 41, pp. 55-65.

BOIS F.Y., DIACK C.

Uncertainty analysis : the bayesian approach.
In : EDLER L., KITSOS C. (Eds.). Recent advances in quantitative methods in cancer and human health risk assessment. Chichester, England : John Wiley & Sons, 2005, pp. 255-266.

MICALLEF S., BROCHOT C., BOIS F.

L'analyse statistique bayésienne de données toxicocinétiques.
Environnement Risques & Santé, 2005, vol. 4, n° 1, pp. 21-34.

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.

QUALITÉ DE L'AIR

BESSAGNET B., HODZIC A., VAUTARD R., BEEKMANN M., CHEINET S., HONORE C., LIOUSSE C., ROUIL L.
Aerosol modeling with CHIMERE. Preliminary evaluation at the continental scale.
Atmospheric Environment, 2004, vol. 38, n° 18, pp. 2803-2817.

ROUIL L., CARDENAS G., MARCEL F.
Evaluation de la dispersion atmosphérique d'aérosols potentiellement contaminés lors de l'épidémie de légionellose de la région de Lens.
Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire, 2004, n° 36-37, pp. 182-184.

VARDOULAKIS S., GONZALEZ-FLESCA N., FISHER B.E.A., PERICLEOUS K.
Spatial variability of air pollution in the vicinity of a permanent monitoring station in central Paris.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n°15, pp. 2725-2736.

EMMENEGGER L., POULLEAU J., RAVENTOS C., BLANK F., GOULD R., KASSMAN H., PILAGE E., REYNAUD S., ROKKJAER J., WAEBER M.
Uncertainty budget and interlaboratory field tests in SO₂ and NO_x emission measurements.
Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, 2004, vol. 64, n° 11-12, pp. 495-500.

GEFFROY S.

Développement d'une méthodologie d'évaluation des émissions diffuses et de leur dispersion fondée sur une caractérisation quantitative par technique LIDAR.
Thèse de doctorat de l'Université Lyon I. Présentée et soutenue publiquement le 11 octobre 2004.

HODZIC A., CHEPFER H., VAUTARD R., CHAZETTE P., BEEKMANN M., BESSAGNET B., CHATENET B., CUESTA J., DROBINSKI P., GOLOUB P., HAEFFELIN M., MORILLE Y.

Comparison of aerosol chemistry transport model simulations with lidar and Sun photometer observations at a site near Paris.
Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 2004, vol. 109, n° D23, art. n° D23201.

HONORE C., ROUIL L., MALHERBE L., BESSAGNET B., VAUTARD R., POISSON N., COLOSIO J.
Le système PREV'AIR : cartographie et prévision de la qualité de l'air à grande échelle en Europe.
Environnement Risques & Santé, 2004, vol. 3, n° 3, pp. 156-164.

MESTAYER P.G., DURAND P., AUGUSTIN P., BASTIN S., BONNEFOND J.M., BENECH B., CAMPISTRON B., COPPALLE A., DELBARRE H., DOUSSET B., DROBINSKI P., DRUILHET A., FREJAFON E., GRIMMOND C. S. B., GROLEAU D., IRVINE M., KERGOMARD C., KERMADI S., LAGOUARDE J.-P., LEMONSU A., LOHOU F., LONG N., MASSON V., MOPPERT C., NOILHAN J., OFFERLE B., OKE T.R., PIGEON G., PUYGRENIER V., ROBERTS S., ROSANT J.M., SAÏD F., SALMOND J., TALBAUT M., VOOGT J.

The urban boundary-layer field campaign in Marseille (UBL/CLU-ESCOMPTE) : set-up and first results.
Boundary-Layer Meteorology, 2005, vol. 114, pp. 315-365.

COUSIN F., LIOUSSE C., CACHIER H., BESSAGNET B., GUILLAUME B., ROSSET R.
Aerosol modelling and validation during ESCOMPTE 2001.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, pp. 1539-1550.

KALTHOFF N., KOTTEMEIER C., THURAU F., CORSMIEER U., SAÏD F., FREJAFON E., PERRON P.E.
Mesoscale circulation systems and ozone concentrations during ESCOMPTE : a case study from IOP 2b.
Atmospheric Research, 2005, vol. 74, n° 1-4, pp. 355-380.

DELBARRE H., AUGUSTIN P., SAÏD F., CAMPISTRON B., BENECH B., LOHOU F., PUYGRENIER V., MOPPERT C., COUSIN F., FREVILLE P., FREJAFON E.
Ground-based remote sensing observation of the complex behaviour of the Marseille boundary layer during ESCOMPTE.
Atmospheric Research, 2005, vol. 74, n° 1-4, pp. 403-433.

MOUKHTAR S., BESSAGNET B., ROUIL L., SIMON V.
Monoterpene emissions from Beech (Fagus sylvatica) in a french forest and impact on secondary pollutants formation at regional scale.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 19, pp. 3535-3547.

VAUTARD R., BESSAGNET B., CHIN M., MENUT L.
On the contribution of natural Aeolian sources to particulate matter concentrations in Europe : testing hypotheses with a modelling approach.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 18, pp. 3291-3303.

GONZALEZ-FLESCA N., FREZIER A.

A new laboratory test chamber for the determination of diffusive sampler uptake rates.
Atmospheric Environment, 2005, vol. 39, n° 22, pp. 4049-4056.

FENNER K., SCHERINGER M., MACLEOD M., MATTHIES M., MCKONE T., STROEBE M., BEYER A., BONNELL M., LE GALL A.C., KLASMEIER J., MACKAY D., VAN DE MEENT D., PENNINGTON D., SCHARENBERG B., SUZUKI N., WANIA F.
Comparing estimates of persistence and long-range transport potential among multimedia models.
Environmental Science & Technology, 2005, vol. 39, n° 7, pp. 1932-1942.

MOUKHTAR S.

Impact des émissions naturelles sur les épisodes de pollution photochimique. Application à la région du Fossé Rhénan.
Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Toulouse, spécialité : sciences des procédés. Présentée et soutenue publiquement le 11 février 2005, 227 p. + annexes.

MANDIN C., KIRCHNER S.

Qualité de l'air dans les écoles, ventilation et santé
Pollution Atmosphérique, 2005, n° 185, pp. 59-68.

PAVAGEAU M.P., MORIN A., SEBY F., GUIMON C., KRUPP E., PECHEYRAN C., POULLEAU J., DONARD O.F.X.

Partitioning of metal species during an enriched fuel combustion experiment. Speciation in the gaseous and particulate phases.
Environmental Science & Technology, 2004, vol. 38, n° 7, pp. 2252-2263.

QUALITÉ DES EAUX

COQUERY M., LEPOP B., BECUE A., MORIN A.

Substances prioritaires de la directive cadre européenne sur l'eau : difficultés analytiques pour la surveillance du milieu et l'application des seuils de qualité.
Techniques, Sciences et Méthodes, 2004, n° 11, pp. 32-41.

TESSIER E.

Etude de la réactivité et du transfert du tributylétain et du mercure dans les environnements aquatiques.
Thèse de doctorat de l'Université de Pau. Présentée et soutenue publiquement le 16 décembre 2004.

COQUERY M., MORIN A., BECUE A., LEPOP B.

Priority substances of the European water framework directive : analytical challenges in monitoring water quality.
Trends in Analytical Chemistry, 2005, vol. 24, n° 2, pp. 117-127.

SITES ET SOLS POLLUÉS

BRUNEL C.

Dynamique des éléments traces métalliques (Pb, Zn et Cd) sur un petit bassin versant contaminé par des déchets miniers. Cas du bassin versant amont du Lez (Ariège, Pyrénées).
Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III, spécialité : géochimie de surface. Présentée et soutenue publiquement le 24 mars 2005, 276 p. + annexes.

RISQUES ACCIDENTELS

ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES

BROHEZ S., DELVOSALLE C., MARLAIR G.

A two-thermocouple probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires.
Fire Safety Journal, 2004, vol. 39, n° 5, pp. 399-411.

HUILIN L., YURONG H., WENTIE L., DING J., GIDASPROW D., BOUILLARD J.

Computer simulations of gas-solid flow in spouted beds using kinetic-frictional stress model of granular flow.
Chemical Engineering Science, 2004, vol. 59, pp. 865-878.

ZYSKOWSKI A., SOCHET I., MAVROT G., BAILLY P., RENARD J.

Study of the explosion process in a small scale experiment - structural loading.
Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2004, vol. 17, pp. 291-299.

YURONG H., HUILIN L., QIAOQUN S., LIDAN Y., YUNHUA Z., GIDASPOW D., BOUILLARD J.

Hydrodynamics of gas-solid flow around immersed tubes in bubbling fluidized beds.
Powder Technology, 2004, vol. 145, pp. 88-105.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SECURITE, BERGER N., DENOZIERE M., GILET J.C., GUIONNET D., ROMAT H.

Electricité statique. ED 874.
Paris : INRS, 2004, 108 p.

YURONG H., GUANGBO Z., BOUILLARD J., HUILIN L.

Numerical simulations of the effects of conical dimension on the hydrodynamic behaviour in spouted beds.
Canadian Journal of Chemical Engineering, 2004, vol. 82, n° 1, pp. 20-29.

BOZIER O.

Mécanismes de propagation des flammes dans les milieux hétérogènes gaz-particules solides.
Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers. Présentée et soutenue publiquement le 14 septembre 2004.

ÉVALUATION ET MAÎTRISE DES RISQUES

CHaineaux J., JAnes A.

Réglementation ATEX. Évaluation analytique des risques.
Techniques de l'Ingénieur, 2004, n° SE3250, 11 p.

DESCOURRIERE S.

Risques d'incendie de générateurs d'aérosols.
Techniques de l'Ingénieur, 2005, n° SE5025, 12 p.

SALVI O., GASTON D.

Risk assessment and risk decision-making process related to hazardous installation in France.
Journal of Risk Research, 2004, vol. 7, n°6, pp. 599-608.

ROUSSEAU A., GRUET P.

Analyse du risque de foudre et qualification des acteurs.
Revue de l'Électricité et de l'Électronique, 2004, n° 8, pp. 30-35.

RISQUES EN MILIEUX CONFINÉS

BENAÏSSA A., BARDON M.F., GAUTHIER J.E.D., ANSELMET F., RUFFIN E.

Recirculation of confined variable density turbulent jets.
Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2004, vol. 27, n° 24, pp. 279-294.

CARVEL R., MARLAIR G.

A history of fire incidents in tunnels.
In : BEARD A., CARVEL R. (Eds.). The handbook of tunnel fire safety. London : Thomas Telford, 2005, pp. 3-41.

CARVEL R., MARLAIR G.

A history of experimental tunnel fires.
In : BEARD A., CARVEL R. (Eds.). The handbook of tunnel fire safety. London : Thomas Telford, 2005, pp. 201-230.

RUFFIN E., CASSINI P.

Transport of hazardous goods.
In : BEARD A., CARVEL R. (Eds.). The handbook of tunnel fire safety. London : Thomas Telford, 2005, pp. 354-387.

ANALYSE D'ACCIDENTS

DECHY N., BOURDEAUX T., AYRAULT N., KORDEK M.A., LE COZE J.C.

First lessons of the Toulouse ammonium nitrate disaster, 21st september 2001, AZF plant, France.
Journal of Hazardous Materials, 2004, vol.111, pp. 131-138.

DECHY N.

The damage of the Toulouse disaster, 21 september 2001.
Loss Prevention Bulletin, 2004, n° 179, pp. 3-11

RISQUES DU SOL ET SOUS-SOL

APRÈS-MINE

MERAD M., VERDEL T., KOUNIALI S., ROY B.

Contribution de la méthode ELECTRE TRI à la hiérarchisation de zones à risque induit par la présence d'ouvrages miniers abandonnés. Application au bassin ferrifère lorrain.
Revue Française de Géotechnique, 2004, n° 106-107, pp. 111-120.

▶ ▶ ▶ [suite page 92](#)

MERAD M., VERDEL T., KOUNIALI S., ROY B.

Contribution de la méthode Electre - Tri à la hiérarchisation de zones à risque induit par la présence d'ouvrages miniers abandonnés. Application au bassin ferrifère lorrain. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 118-126.

DEGAS M., WOJTKOWIAK F., METZ M., BRANCHET M.

Exemple d'impacts de l'arrêt de l'exploitation minière et de l'exhaure dans le bassin houiller de Faulquemont (Lorraine). *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 127-135.

GHOUREYCHI M., DAUPLY X.

Devenir à long terme d'exploitation abandonnées de sel en France. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 92-101.

PAQUETTE Y., GUISE Y., LAVERSANNE J.

Exemple d'arrêt de travaux miniers : cas de la concession de Blanzey-Montceau de Charbonnages de France. *In : SOCIÉTÉ DE L'INDUSTRIE MINÉRALE. Réhabilitation des sites à l'usage des mineurs et des carriers. Paris : Société de l'industrie minière, 2004, pp. 257-318. (Mémento des mines et carrières).*

POKRYSZKA Z., GRABOWSKI D.

Émissions gazeuses à partir des vides miniers dans le bassin ferrifère lorrain. *Revue Française de Géotechnique*, 2004, n° 106-107, pp. 31-39.

GRABOWSKI D., POKRYSZKA Z.

Émissions gazeuses à partir des vides miniers dans le bassin ferrifère lorrain. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 58-64.

BENNANI M., JOSIEN J.P., BIGARRE P.

Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine, besoins, méthodes : apport de la microsismique. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 15-22.

BENNANI M., JOSIEN J.P., BIGARRE P.

Surveillance des risques d'effondrement dans l'après-mine, besoins, méthodes : apport de la microsismique. *Revue Française de Géotechnique*, 2004, n° 106-107, pp. 5-14.

THORAVAL A., WOJTKOWIAK F., METZ M.

Effets prévisibles en surface de galeries minières creusées à faible profondeur dans les grès vosgiens. Exemple du traitement de la galerie de Falck. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 136-146.

RISQUES NATURELS

«**MOUVEMENTS DE TERRAIN**»

AUVRAY C., HOMAND F., HOXHA D., DIDIER C.

Influence du temps et de l'hygrométrie sur le comportement du gypse. *Revue Française de Géotechnique*, 2004, n° 106-107, pp. 41-51.

AUVRAY C., HOMAND F., HOXHA D., DIDIER C.

Influence du temps et de l'hygrométrie sur le comportement du gypse. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, 2004, n° 21, pp. 65-74.

AUVRAY C., HOMAND F., SORGI C.

The aging of gypsum in underground mines. *Engineering Geology*, 2004, vol. 74, pp. 183-196.

DIDIER C.

Les mécanismes et phénomènes d'instabilité. *In : SOCIÉTÉ DE L'INDUSTRIE MINÉRALE. Réhabilitation des sites à l'usage des mineurs et des carriers. Paris : Société de l'industrie minière, 2004, pp. 157-187. (Mémento des mines et carrières).*

THORAVAL A., RENAUD V.

Hydro-mechanical upscaling of a fractured rockmass using a 3D numerical approach. *In : STEPHANSSON O., HUDSON J.A., JING L. (Eds.). Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems : fundamentals, modelling, experiments and applications. Boston : Elsevier, 2004, pp. 275-280.*

IDRIS J., AL HEIB M., VERDEL T.

Bases de données des accidents et incidents survenus dans les ouvrages souterrains. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 2004, n° 182, pp. 84-89.

GUNZBURGER Y.

Caractérisation et analyse des mouvements de versants rocheux complexes. *Thèse de doctorat de l'INPL. Présentée et soutenue publiquement le 17 décembre 2004.*

ABBASS FAYAD A.

Étude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences induites en surface. *Thèse de doctorat de l'INPL, spécialité : génie civil - hydrosystèmes - géotechnique. Présentée et soutenue publiquement le 18 juin 2004, 146 p. + annexes.*

SENAUTE G., AMITRANO D., LENHARD F., MOREL J.

Étude en laboratoire par méthodes acoustiques de l'endommagement des roches de craie et corrélation avec des résultats in situ. *Revue Française de Géotechnique*, 2005, n°110, pp. 9-18.

CAPPA F., GUGLIELMI Y., FENART P., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., THORAVAL A.

Hydromechanical interactions in a fractured carbonate reservoir inferred from hydraulic and mechanical measurements.

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005, vol. 42, pp. 287-306.

GUNZBURGER Y., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., GUGLIELMI Y.

Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability : case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2005, vol. 42, pp. 331-349.

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.

TUNNELS ET STOCKAGES SOUTERRAINS

MILLARD A., REJEB A., CHIJIMATSU M., JING L., DE JONGE J., KOHLMEIER M., NGUYEN T.S., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y.

Evaluation of THM coupling on the safety assessment of a nuclear fuel waste repository in a homogeneous hard rock. *In : STEPHANSSON O., HUDSON J.A., JING L. (Eds.). Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems : fundamentals, modelling, experiments and applications. Boston : Elsevier, 2004, pp. 211-216.*

NGUYEN T.S., CHIJIMATSU M., DE JONGE J., JING L., KOHLMEIER M., MILLARD A., REJEB A., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y.

Implications of coupled thermo-hydro-mechanical processes on the safety of a hypothetical nuclear fuel waste repository. *In : STEPHANSSON O., HUDSON J.A., JING L. (Eds.). Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems : fundamentals, modelling, experiments and applications. Boston : Elsevier, 2004, pp. 225-230.*

CHIJIMATSU M., JING L., MILLARD A., NGUYEN T.S., REJEB A., RUTQVIST J., SOULEY M., SUGITA Y.

Building confidence in the mathematical models by calibration with a T-H-M field experiment. *In : STEPHANSSON O., HUDSON J.A., JING L. (Eds.). Coupled thermo-hydro-mechanical-chemical processes in geo-systems : fundamentals, modelling, experiments and applications. Boston : Elsevier, 2004, pp.193-198.*

GUILLOUX A., KAZMIERCZAK J.B., KURDTS A., REGAL G., WONG H.

Stabilité et renforcement des fronts de taille des tunnels : une approche analytique en contraintes-déformations. *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, 2005, n° 188, pp. 98-108.



*maîtriser le risque
pour un développement durable* |

**Institut National de l'Environnement
Industriel et des Risques**

Parc Technologique Alata
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : 03 44 55 66 77

Fax : 03 44 55 66 99

E-mail : ineris@ineris.fr

Internet : <http://www.ineris.fr>