

# Rapport scientifique 2002/2003

# Rapport scientifique 2002/2003

# SOMMAIRE

**06 MISSIONS & STRATÉGIE D'ENSEMBLE**  
Les grandes orientations scientifiques

**08 LISTE DES MEMBRES DU CONSEIL SCIENTIFIQUE**

**09 INDICATEURS DE RECHERCHE 2002**



## 11 RISQUES CHRONIQUES

### 12 INTRODUCTION

### 14 RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- 14 Effets des téléphones cellulaires sur la mortalité des embryons de poulet (René DE SÈZE)
- 16 Métrologie des champs électromagnétiques (Dominique CHARPENTIER)

### 17 SOLS POLLUÉS

- 17 Méthodologie d'évaluation des risques écotoxicologiques appliquée aux sites et sols pollués (Jacques BUREAU)
- 19 Émission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : modélisation et mesures sur site (Corinne HULOT)
- 22 Étude du comportement du trichloroéthylène dans la zone non saturée du sol (Claire ROLLIN)

### 24 PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

- 24 Perturbateurs endocriniens dans l'environnement aquatique (Jean-Marc PORCHER)
- 27 Les perturbateurs endocriniens chez l'homme (Emmanuel LEMAZURIER)

### 28 ÉCOTOXICOLOGIE

- 28 Étude en mésocosmes des effets des polluants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Éric THYBAUD)
- 31 Biomarqueurs d'écotoxicité chez le poisson (Selim AÏT-AÏSSA)

### 33 TOXICOLOGIE EXPÉRIMENTALE

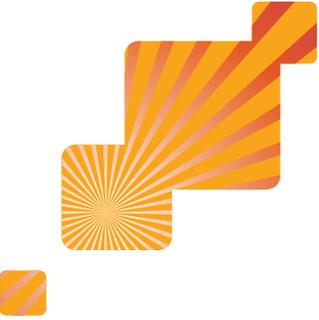
- 33 Asthme et pollution atmosphérique (Ghislaine LACROIX)
- 35 Les modèles toxicocinétiques physiologiques (Frédéric BOIS)

### 37 QUALITÉ DE L'AIR

- 38 Mesure des pesticides dans l'air ambiant (Fabrice MARLIÈRE)
- 40 La campagne de mesures « Escompte 2001 » (Émeric FRÉJAFON)
- 42 Modélisation des particules (Bertrand BESSAGNET)

### 44 ÉTUDES ÉCONOMIQUES

- 44 Étude de mesures économiques pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV et NH<sub>3</sub> (Sébastien SOLEILLE)



## 47 RISQUES ACCIDENTELS

---

### 48 INTRODUCTION

### 50 DANGERS LIÉS AUX PRODUITS ET DANGERS LIÉS AUX PROCÉDÉS

- 51 Classement des produits : les produits comburants (Marie-Astrid KORDEK)
- 52 Les Ammonitrates et autres engrais composés à base de Nitrate d'Ammonium (Marie-Astrid KORDEK)
- 53 Rôle de l'INERIS dans l'application de deux directives européennes relatives aux atmosphères explosibles (Jacques CHAINEAUX / Claire PETITFRÈRE)

### 54 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES D'ACCIDENTS

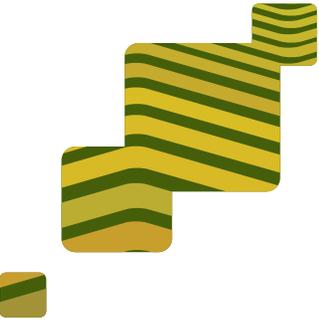
- 55 Analyse des conditions de dispersion d'un gaz liquéfié en champ proche en présence d'obstacles (Stéphane DUPLANTIER)
- 56 Le projet européen FLIE : Flashing Liquids in Industrial Environment (Stéphane DUPLANTIER)
- 58 Comportement d'une structure en béton soumise à une onde de pression interne (Guy MAVROTHALASSITIS / Frédéric MERCIER)

### 59 MAÎTRISE DES RISQUES

- 60 Éléments Importants Pour la Sécurité (EIPS) (Sébastien BOUCHET / Dominique CHARPENTIER)
- 61 Maîtrise Intégrée des Risques d'Accidents Majeurs : MIRIAM® / ATOS® (Franck PRATS / Emmanuel PLOT / Jean-Christophe LECOZE)

### 63 VERS UNE INTÉGRATION DE L'ENSEMBLE DES DISCIPLINES DANS L'ÉVALUATION DES RISQUES

- 65 Le projet européen ASSURANCE : Assessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments (David HOURTOLOU)
- 66 Le projet européen ARAMIS : Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of Seveso II directive (David HOURTOLOU / Olivier SALVI)
- 67 Le projet européen UPTUN : Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels (Emmanuel RUFFIN)



## 69 RISQUES DU SOL ET SOUS-SOL

---

### 70 INTRODUCTION

### 72 PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS MAJEURS

- 73 Stabilité des cavités souterraines : le cas des marnières (Jean-Jacques TRITSCH)
- 73 Réalisation d'études d'aléas dans le cadre de PPRN «Mouvements de terrain» (Jean-Marc WATELET)
- 74 Auscultation et surveillance d'un versant rocheux dans les Alpes-Maritimes (Yann GUNZBURGER)

### 75 GESTION DE L'APRÈS-MINE

- 76 Méthodologie de hiérarchisation des zones à risque d'effondrement (Romuald SALMON / Myriam MERAD)
- 77 Les SIG : un outil interactif d'analyse et de gestion des risques miniers résiduels «Mouvements de terrain» (Laurent CAUVIN)
- 78 L'apport de la modélisation numérique (Alain THORAVAL / Farid LAOUAFA)

### 79 AUSCULTATION ET SURVEILLANCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

- 80 Expérimentation en grand de surveillance des instabilités de falaises côtières (Gloria SENFAUTE)
- 81 Expérimentation de méthodes de surveillance des instabilités de carrières souterraines (Cyrille BALLAND)
- 82 Technique de tomographie appliquée au diagnostic des ouvrages souterrains (Franz LAHAIE)

### 83 ÉMANATIONS DE GAZ SOUTERRAIN

- 83 Évaluation et prévention des risques d'émissions de gaz liés aux mines de charbon (Candice LAGNY)
- 84 Émissions de gaz dans les anciennes mines de fer (David GRABOWSKI / Zbigniew POKRYSZKA)

## 86 GLOSSAIRE

# Les grandes orientations scientifiques

**L**a notoriété de l'INERIS, l'enrichissement de ses compétences et la pertinence de ses expertises sont étroitement liés à son activité de recherche appliquée. Financé en partie par le Budget de l'État (BCRD) et inscrit dans les orientations du ministère de la Recherche, cet effort s'intègre de manière croissante à la recherche communautaire dont le 5<sup>e</sup> Programme-Cadre de Recherche et de Développement Technologique (PCRD) s'est achevé en 2002. À ce titre, les comités d'évaluation de la Commission européenne ont retenu 28 des 50 projets présentés par l'INERIS au cours de ce programme et 21 ont à ce jour fait l'objet d'un financement.

Cette réussite résulte à la fois de la qualité des propositions évaluées en amont par les commissions scientifiques spécialisées de l'Institut et du développement de collaborations avec des organismes partenaires, condition mise en exergue par l'Union européenne pour accéder à ses financements. Dans le cadre des trois programmes européens dont il assure la coordination - ACUTEX, ARAMIS, METROPOLIS - l'INERIS est associé à de très nombreux instituts, universités et entreprises. Au total, l'INERIS coopère principalement, sous forme de relations bilatérales ou en réseaux, avec plus de 80 organismes de recherche publics ou universitaires dont 41 en Europe, aux États-Unis et dans le reste du monde.

**40 %**  
21 projets sur  
50 présentés  
dans le cadre  
du 5<sup>e</sup> PCRD  
ont reçu un  
financement

## Des axes de recherche définis par le contrat d'objectifs

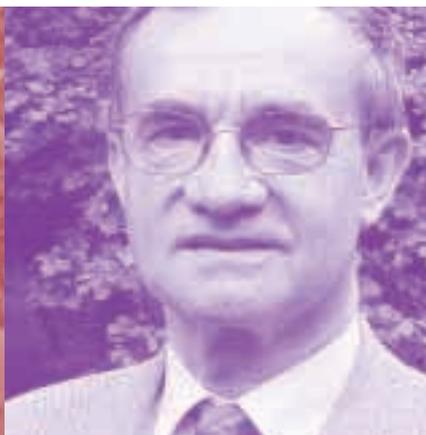
Le contrat d'objectifs 2001-2005 définit les axes de recherche correspondant aux trois domaines de risques qui structurent l'activité de l'Institut.

## Pour les risques chroniques dus aux pollutions et aux nuisances

- la métrologie de l'environnement, la modélisation des pollutions et de leurs transferts au sein des milieux, la métrologie des expositions des écosystèmes et des populations ;
- la toxicité des substances pour les écosystèmes et pour l'homme, à de faibles niveaux d'exposition ;
- la contribution aux connaissances scientifiques sur les risques émergents relatifs à la sécurité environnementale ;
- la modélisation intégrée en appui aux nouveaux instruments économiques de régulation des impacts environnementaux.



GEORGES LABROYE  
DIRECTEUR GÉNÉRAL



JEAN-FRANÇOIS RAFFOUX  
DIRECTEUR SCIENTIFIQUE

### Pour les risques liés aux accidents technologiques et industriels

- la phénoménologie et la quantification des conséquences des scénarios accidentels ;
- la sécurité des procédés ;
- l'intégration de la composante humaine et organisationnelle dans l'analyse des risques ;
- l'évolution des méthodes et outils d'analyse des risques.

### Pour les risques du sol et du sous-sol

- la mise au point d'outils de modélisation du comportement à long terme des ouvrages souterrains et des massifs rocheux ;
- le développement de nouvelles méthodes afin de caractériser, ausculter et surveiller des cavités souterraines pour maîtriser l'évolution de leur stabilité ;
- l'amélioration des connaissances en hydrogéologie et mécanique des fluides afin d'évaluer les risques liés aux émanations de gaz de mine en surface et aux impacts de l'exploitation minière sur les eaux.

Par ailleurs, l'INERIS apporte sa contribution aux travaux de recherche entrepris à l'échelle nationale et européenne en vue d'approfondir les connaissances sur les aspects sociaux de la perception des risques.

Au cours de l'année 2002, les Directions Opérationnelles ont procédé à une déclinaison du contrat d'objectifs dans des plans stratégiques qui précisent les recherches à entreprendre et les moyens à y affecter pour développer l'expertise attendue tant par les Pouvoirs Publics que par les industriels et les collectivités territoriales.

### Près de 40 doctorants en 2002

La présence de doctorants préparant des thèses sur des sujets qui leur sont confiés par l'INERIS traduit l'intérêt des universités et des écoles pour le potentiel technique et scientifique de l'Institut. Le nombre de doctorants est passé d'une quinzaine en 1998 à près de 40 en 2002. Réunis chaque année par la Direction scientifique, ils présentent lors d'un forum les avancements de leurs travaux et profitent de ces échanges multidisciplinaires pour confronter leurs approches, méthodes et outils scientifiques. Un résumé synthétique de chacune des thèses en cours ou achevées est accessible sur le site Internet de l'INERIS (en français et en anglais).

### Création d'un réseau de contributeurs internes à la veille scientifique

Afin de répondre à la demande du ministère de l'Écologie et du Développement Durable (MEDD) et de contribuer à son dispositif de veille, la Direction scientifique de l'INERIS a créé un réseau de contributeurs dans chaque direction opérationnelle.

À travers la littérature et les congrès, leur rôle est de suivre l'évolution des connaissances et de relever l'émergence de signaux sur des risques nouveaux, des substances chimiques mal connues, des avancées de l'état de l'art en matière de prévention des risques chroniques et accidentels.

Ces contributeurs sont réunis tous les deux mois en comité de veille. Leur travail donne lieu à la diffusion d'un bulletin en interne et auprès du ministère de tutelle. Le premier numéro de ce bulletin a été publié en novembre 2002. ●

# Liste des membres

## DU CONSEIL SCIENTIFIQUE

(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

### 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 Développement Durable  
- Environnement - Sécurité Produits  
ATOFINA

### PHILIPPE HUBERT

IRSN

### MICHEL JOUAN

INVS

### PIERRE JOULAIN

Directeur Adjoint  
Laboratoire de Combustion et Détonique  
ENSMA

### JEAN-PIERRE LIBERT

Professeur à la Faculté de Médecine  
Directeur de l'Unité de Recherches  
sur les Adaptations Physiologiques  
et Comportementales (EA 2088)  
Faculté de Médecine  
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

Professeur pour la gestion des risques  
chimiques à l'Université de Delft  
Directeur des Programmes de TNO  
pour les recherches de Défense  
Coordinateur de TNO pour les recherches  
des risques industriels  
TNO, TU Delft (NL)

### OTTO RENTZ

Professeur à l'université de Karlsruhe  
Directeur de l'Institut franco-allemand  
de recherche sur l'environnement  
Directeur de l'AEETC (Asia-Europe Environ-  
mental Technology Center), Pathumthani/  
Thaïlande (D)

### NIGEL RILEY

Health & Safety Executive (UK)

### CLAUDINE SCHMIDT LAINÉ

Directeur de recherche CNRS  
Directeur Scientifique CEMAGREF

### HENRI VIELLARD

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

### PHILIPPE URBAN

Chargé de Mission  
Direction Transport  
GAZ DE FRANCE

### DENIS ZMIROU

Directeur Scientifique AFSSE

---

## Invités permanents

---

### ALAIN DESROCHES

Président de la Commission Scientifique  
Risques Accidentels  
Expert en Sûreté de Fonctionnement  
Chargé de Mission Assurance Produit  
et Sécurité CNES

### JEAN-PIERRE MAGNAN

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

### PHILIPPE GARRIGUES

Président de la Commission Scientifique  
Risques Chroniques  
Directeur de Recherche CNRS  
Directeur du Laboratoire  
de Physico-Toxico-Chimie

# Indicateurs

## DE RECHERCHE 2002

**L**e développement de l'activité Recherche de l'INERIS s'inscrit dans les orientations de son contrat d'objectifs 2001-2005 définissant les grands axes scientifiques de l'Institut. L'effort de recherche que l'INERIS souhaite développer a pour objectif d'enrichir ses compétences de manière à répondre aux interrogations et aux besoins de la société et ainsi faire progresser sa capacité d'expertise. La Recherche & Développement de l'INERIS est financée d'une part, par le budget de l'État (BCRD) et s'inscrit dans les orientations du ministère de la Recherche et, d'autre part par la Communauté Européenne dans les Programmes-Cadre de Recherche et Développement Technologique (PCRDT).

---

Les travaux de recherche sont financés essentiellement par le BCRD (budget de l'État) et le PCRDT (budget de l'Union européenne) :

---

● Programmes BCRD en cours	<b>27</b>
● Autres programmes nationaux de recherche en cours	<b>6</b>
● Programmes européens en cours	<b>16</b>

---

Dans le cadre de ses programmes, l'INERIS s'associe à de nombreux organismes de recherche, des universités et des entreprises :

---

● Partenariats de recherche français	<b>43</b>
● Partenariats de recherche étrangers	<b>41</b>
● Participation à des associations scientifiques dont internationales	<b>64</b> <b>21</b>

---

**38** doctorants encadrés et financés par l'INERIS, participent aux programmes de recherche de l'Institut en 2002.

**7** thèses ont été soutenues en 2002.

---

L'ensemble des chercheurs et des doctorants publient leurs résultats dans des revues scientifiques nationales et internationales et les présentent dans le cadre de congrès et de colloques :

---

● Publications dans des revues à comité de lecture dont internationales	<b>38</b> <b>29</b>
● Communications et posters dans des congrès	<b>116</b>

---

# Liste des membres de la Commission Scientifique

## RISQUES CHRONIQUES

(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

### PHILIPPE GARRIGUES

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

### JEAN-MARIE MUR

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

### 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  
Centre Saint-Laurent  
Environnement Canada - Région du  
Québec (CA)

### JACQUES DESARNAUTS

Directeur Hygiène Sécurité Environnement  
Produits  
ATOFINA

### 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 de Rennes 1

### PATRICK LÉVY

Directeur Product-Stewardship  
Médecin - Conseil  
RHODIA

### 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  
Laboratoire Écotoxicité Biodiversité  
Santé Environnement (EBSE),  
Université de Metz (UFR Sci F.A.)

### ROBERT VAUTARD

Laboratoire de Météorologie Dynamique  
École Polytechnique

# RISQUES CHRONIQUES

## 12 INTRODUCTION

## 14 RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- 14 Effets des téléphones cellulaires sur la mortalité des embryons de poulet (René DE SÈZE)
- 16 Métrologie des champs électromagnétiques (Dominique CHARPENTIER)

## 17 SOLS POLLUÉS

- 17 Méthodologie d'évaluation des risques écotoxicologiques appliquée aux sites et sols pollués (Jacques BUREAU)
- 19 Émission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : modélisation et mesures sur site (Corinne HULOT)
- 22 Étude du comportement du trichloroéthylène dans la zone non saturée du sol (Claire ROLLIN)

## 24 PERTURBATEURS ENDOCRINIENS

- 24 Perturbateurs endocriniens dans l'environnement aquatique (Jean-Marc PORCHER)
- 27 Les perturbateurs endocriniens chez l'homme (Emmanuel LEMAZURIER)

## 28 ÉCOTOXICOLOGIE

- 28 Étude en mésocosmes des effets des polluants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques (Éric THYBAUD)
- 31 Biomarqueurs d'écotoxicité chez le poisson (Selim AÏT-AÏSSA)

## 33 TOXICOLOGIE EXPÉRIMENTALE

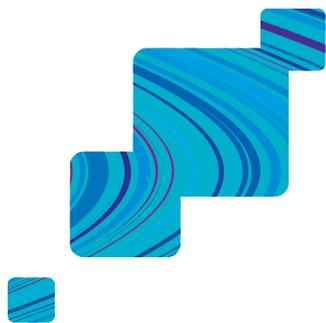
- 33 Asthme et pollution atmosphérique (Ghislaine LACROIX)
- 35 Les modèles toxicocinétiques physiologiques (Frédéric BOIS)

## 37 QUALITÉ DE L'AIR

- 38 Mesure des pesticides dans l'air ambiant (Fabrice MARLIÈRE)
- 40 La campagne de mesures «Escompte 2001» (Émeric FRÉJAFON)
- 42 Modélisation des particules (Bertrand BESSAGNET)

## 44 ÉTUDES ÉCONOMIQUES

- 44 Étude de mesures économiques pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV et NH<sub>3</sub> (Sébastien SOLEILLE)



# De l'évaluation de l'impact des substances chimiques aux rayonnements électromagnétiques

La principale mission de l'INERIS dans le domaine des risques chroniques concerne l'évaluation et la modélisation 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. Cette mission a été étendue récemment à la connaissance des effets des rayonnements électromagnétiques sur la santé humaine.

Pour développer son activité de recherche dans ce domaine, l'INERIS a établi des collaborations et des partenariats nombreux avec des équipes universitaires et des établissements publics de recherche nationaux et européens.

Le 6<sup>e</sup> programme-cadre de Recherche et de Développement Technologique donne une place de premier rang au domaine des risques chroniques et met en évidence la nécessité de fonder la politique de l'environnement européen sur de meilleures analyses scientifiques et économiques. Il met également en exergue la communication aux décideurs comme au public d'informations pertinentes, transparentes, actualisées et faciles à comprendre. Ceci s'est traduit par l'édition en début 2003 d'un guide consacré aux impacts sanitaires des installations classées.

ÉDITION EN 2003 D'UN GUIDE  
SUR LES IMPACTS SANITAIRES  
DES INSTALLATIONS CLASSÉES

## >Vers un système unifié de gestion des substances chimiques

L'élément le plus important de la nouvelle politique est le livre blanc «Stratégie pour la future politique dans le domaine des substances chimiques» qui propose la mise en place d'un système unifié de gestion des substances chimiques : le système REACH. Pour l'INERIS, l'une des conséquences du livre blanc devrait être une amélioration de la précision de l'évaluation des risques liés aux installations classées et aux sites industriels. À côté du livre blanc, le livre vert de l'Union européenne sur la politique *intégrée* des



Les questions d'environnement ne se posent plus simplement en termes de protection des milieux mais aussi en termes d'impact sur la santé.

# act des aux effets des agnétiques

produits est également un élément stratégique pour le développement de l'activité dans le domaine des risques chroniques. En effet, cette politique intégrée s'applique à tous les produits pour obtenir une meilleure qualité environnementale par le biais d'une plus grande transparence de l'information et des outils économiques de régulation. Elle appelle à des recherches en vue du développement d'outils économiques d'aide à la gestion des risques qui pourront remettre d'actualité les analyses de cycle de vie.

## > Collaborer avec l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale

L'activité scientifique dans le domaine des risques chroniques est également orientée par le volet « substances chimique » de la directive Cadre sur l'eau. Ce texte conduit les états de l'Union à intégrer, dans leur législation, le contrôle des concentrations en substances toxiques dans les eaux de surface conti-



**La question des pesticides dans les différents milieux représente une préoccupation sociale grandissante.**

nentales, estuariennes, marines ainsi que dans les eaux souterraines, en vue d'établir des normes de qualité environnementale basées sur des considérations écotoxicologiques. Une telle double approche écologique et chimique n'a pas vraiment été explorée. L'INERIS est particulièrement bien placé pour

engager des recherches sur ce thème. Enfin, un événement important de l'année 2002, qui aura des répercussions sur le plan stratégique de l'INERIS dans ce domaine, est la création de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale avec laquelle l'Institut doit mettre en place une convention. Cette convention aura pour but de préciser les modalités du concours de l'expertise de l'Institut aux missions de l'Agence, mais également de définir les moyens de renforcer les connaissances scientifiques dans certains axes thématiques importants. ●

**LES RISQUES CHRONIQUES OCCUPENT  
UNE PLACE DE 1<sup>ER</sup> RANG DANS  
LE 6<sup>E</sup> PCRDT. L'EUROPE SOUHAITE  
DISPOSER DE MEILLEURES ANALYSES  
POUR DÉVELOPPER SA POLITIQUE  
ENVIRONNEMENTALE**

# Rayonnements électromagnétiques



L'augmentation de la « pollution électromagnétique », liée en particulier au développement de la téléphonie mobile, suscite des interrogations, voire des inquiétudes quant à ses possibles effets sur la santé humaine.

L'INERIS a constitué une équipe de chercheurs sur ce sujet. Cette équipe est chargée de :

- fournir un appui aux pouvoirs publics pour contribuer à l'amélioration de l'information et de la communication ;
- développer des méthodes de mesure ou d'évaluation normalisées ;
- conduire des travaux de recherche

**DES ÉTUDES POUR RÉPONDRE AUX INQUIÉTUDES LIÉES AU DÉVELOPPEMENT DE LA TÉLÉPHONIE MOBILE**

pour recueillir des preuves objectives d'effet ou d'absence d'effet des rayonnements électro-

magnétiques concernés. Ces travaux ont trait notamment à l'étude sur modèle animal de l'effet des radiofréquences sur le système nerveux central et, plus précisément, sur la liaison neurotransmetteur-récepteur. Les résultats seront replacés dans le cadre plus vaste du projet européen RAMP.

Ils concernent également l'étude de l'influence des radiofréquences sur l'échauffement et les maux de tête ainsi que sur les performances de mémoire et d'apprentissage (projet COMOBIO).

L'activité de recherche comporte enfin, comme il est souvent de règle dans les domaines où règne la controverse en raison des difficultés d'expérimentation, la duplication d'études conduisant à des résultats inquiétants afin d'accroître la force de la preuve si besoin est. ●

## Effets des téléphones cellulaires sur la mortalité des embryons de poulet

René DE SÈZE

Avec un taux de mortalité de 60 à 70 % (au lieu de 10 % de mortalité spontanée), les travaux du Pr Madeleine Bastide\* ont montré une augmentation importante de la mortalité d'embryons de poulet exposés pendant l'incubation à un téléphone mobile en émission. L'étude conduite par l'INERIS a consisté à répliquer cette expérience et à tenter d'en définir les paramètres déterminants, dans deux laboratoires indépendants : le laboratoire de Florence Batellier à l'INRA de Tours et le laboratoire de Jocelyne Leal, à l'Hôpital Ramon y Cajal, à Madrid.

Les pannes de téléphone ont été fréquentes en raison des conditions d'incubation des œufs. La dosimétrie des systèmes d'expo-

sition a été effectuée à Supelec, l'École Supérieure d'Électricité. Elle s'est révélée difficile pour la mesure des champs de très basse fréquence et de très faible intensité. Un système de contrôle et d'acquisition des paramètres de l'étude de réplication dans les deux laboratoires de Madrid et de Tours a été mis au point. Une cartographie a également été réalisée dans les laboratoires de Supelec afin de pouvoir attribuer un niveau de champ selon la position des œufs par rapport au téléphone. Les chambres d'incubation mises au point selon le protocole décrit par le Pr Bastide n'ont pas fourni les résultats indiqués. En

**UNE ÉTUDE A ÉTÉ CONDUITE DANS DEUX LABORATOIRES INDÉPENDANTS À TOURS ET À MADRID**

## L'ÉTUDE CONDUITE PAR L'INERIS N'A PAS PERMIS DE CONFIRMER LES RÉSULTATS RELATIFS À LA MORTALITÉ DES EMBRYONS DE POULET

dehors de toute exposition aux rayonnements électromagnétiques, la mortalité moyenne a été de 43 à 53 % avec une importante variabilité qui semble aléatoire, le facteur en cause n'ayant pas été identifié. Une légère amélioration a été obtenue vers la fin de l'étude avec un taux de 35 à 45 % pour les quatre dernières séries, la variabilité apparaissant mieux contrôlée pour les œufs disposés près de la porte que pour ceux situés au fond de la chambre d'incubation. Ces résultats ne satisfont pas le critère de validation des chambres retenu dans le protocole de réplication qui était une mortalité inférieure à 20 %. Seul l'emplacement proche de la porte dans la chambre d'incubation de l'INRA a conduit une fois à une mortalité proche de 20 % au 19<sup>e</sup> jour. Les paramètres qui ont abouti à ce résultat n'ont pas été identifiés, ce qui n'en permet pas la reproduction.

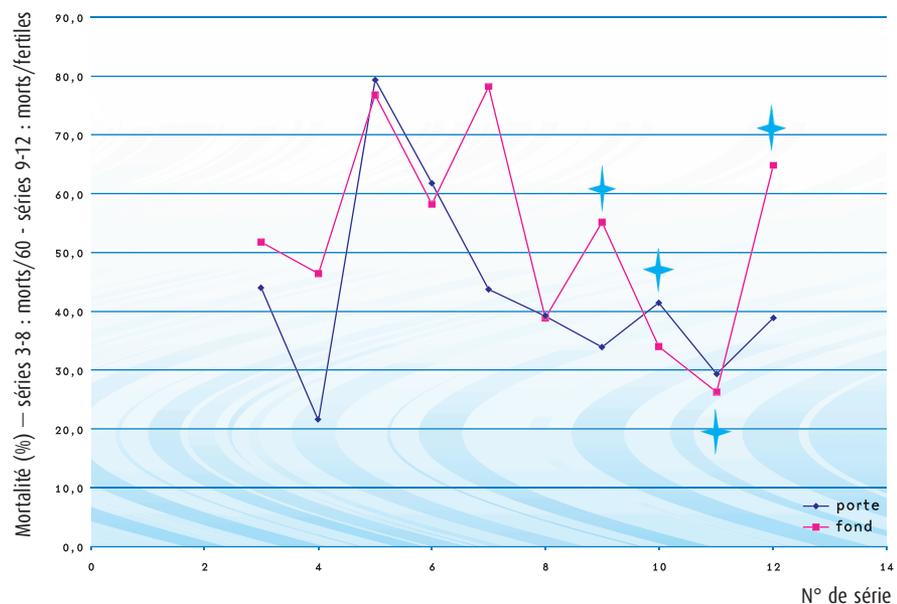
À Madrid, il n'a jamais été possible d'obtenir une mortalité inférieure à 60-70 % en dépit de multiples tentatives d'amélioration conformes aux recommandations du Pr Bastide.

Malgré cela, afin de rentabiliser les efforts accomplis pour améliorer les chambres d'incubation, un avenant au protocole initial a été établi, permettant de réaliser des expériences d'exposition afin d'évaluer si un effet significatif apparaissait intéressant à étudier.

Deux séries réalisées à Tours avec exposition ont montré une augmentation importante de la mortalité – de l'ordre de 60 % – chez les exposés par rapport aux témoins. En revanche, il n'a pas été observé de différence significative sur toutes les séries effectuées à Madrid (12 à ce jour). Cependant, l'augmentation observée à Tours chez les exposés est similaire à celle observée plusieurs fois en dehors de toute exposition, au fond de la chambre par rapport à l'emplacement proche de la porte. De plus, il existait une différence de température lors de la deuxième série, de 0,5 °C supé-

rieure pour les exposés. Il conviendra de vérifier si cette différence peut constituer un biais dans le résultat observé et dans quel sens. En effet, alors que la majorité des séries a été incubée à une température de 37,8-38 °C, la température des exposés dans cette série a été longtemps supérieure à 38,5 °C, un niveau difficilement supportable pour les œufs en incubation.

### MORTALITÉ DES SÉRIES D'ŒUFS INCUBÉS



Pour éviter des biais dans les résultats, une analyse statistique multiparamétrique doit être réalisée, prenant en compte au minimum deux facteurs : d'une part la position dans la chambre (fond ou porte), d'autre part l'exposition. De plus, afin de maîtriser le dispositif expérimental, il apparaît indispensable de démontrer une stabilité de la mortalité aux deux emplacements choisis, sur plusieurs séries consécutives. À défaut, il faudrait étudier si la mortalité est augmentée plusieurs fois de suite lorsque l'exposition a lieu près de la porte. ●

\* Toxicologic study of electromagnetic radiation emitted by television and video display screens and cellular telephones on chickens and mice. Bastide M., Youbicier-Simo B.J., Lebecq J.C., Giaimis J. - Indoor Built Environ, 10, 291-298 (2001).



# Métrologie des champs électromagnétiques

Dominique CHARPENTIER

Devant l'inquiétude du public sur les éventuels risques liés aux rayonnements électromagnétiques, il est nécessaire d'étudier les caractéristiques de ces émissions et leurs effets sur les êtres vivants. Le programme de recherche relatif à la métrologie des champs permet de mieux déterminer les zones potentiellement à risque (proximité de machines industrielles rayonnantes) et de fournir au public des données fiables et objectives d'exposition aux champs (proximité des stations de base de radiotéléphones). Dans sa première phase, cette étude a abordé les thèmes suivants :

- les seuils de risque définis dans la recommandation européenne 99/519/CE ;
- la métrologie des champs électromagnétiques (description des matériels, sources d'erreurs et calcul d'incertitude) ;
- la méthodologie de qualification d'un site, source d'émission électromagnétique (cas d'une station de base).

Les différents facteurs d'incertitude de mesure ont été analysés dans le but d'évaluer la conformité d'un site à la recommandation européenne sur l'exposition du public aux rayonnements électromagnétiques (99/519/CE). Deux groupes de facteurs influencent la mesure : les facteurs environnementaux et les facteurs instrumentaux. Parmi les premiers, on note : le type d'antenne d'émission, les réflexions des ondes sur le sol, la hauteur

## LA CARACTÉRISATION DE 15 STATIONS DE BASE A MONTRÉ QUE LE CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE DES ANTENNES DE RADIOTÉLÉPHONIE EST INFÉRIEUR À LA RECOMMANDATION EUROPÉENNE 99/519/CE

de l'antenne de mesure par rapport au sol, la polarisation de l'onde, la multiplicité des sources d'émission ainsi que la modulation et le débit des communications. Les facteurs instrumentaux concernent la linéarité des appareils de mesures leur étalonnage et la température.

### > Application du calcul d'incertitude

L'analyse a mis en évidence la complémentarité des matériels de mesure. Les sondes de mesure de champ sont peu sensibles et très peu sélectives ; elles captent toutes les émissions radiofréquences, mais permettent des mesures à proximité des antennes d'émission. De leur côté, les analyseurs de spectre sont plus précis et plus sélectifs, mais les antennes de réception qui leur sont associées ne permettent pas de mesurer facilement à proximité des antennes d'émission. L'incertitude totale de mesure peut être estimée à 6,9 dB (+/-121 %) avec une sonde de mesure de champ et de 5,6 dB (+/-90 %) avec un analyseur de spectre.

Ainsi en appliquant le calcul d'incertitude à la caractérisation d'une station de radiotéléphonie pour laquelle le champ électrique mesuré avec une sonde est de 0,4 V/m, l'amplitude calculée du champ est comprise entre 0,18 V/m et 0,88 V/m (intervalle de confiance de 95 %). Les résultats sont comparables avec un analyseur de spectre. En tenant compte de tous les facteurs influents, l'amplitude du champ varie donc dans un rapport de 4,9, ce qui peut paraître énorme en métrologie.

Le calcul d'incertitude permet de mieux estimer le facteur de sécurité de l'exposition aux rayonnements. La caractérisation de 15 stations de base réalisée en 2001 et 2002 a montré que le champ à proximité des antennes de radiotéléphonie, en tenant compte des incertitudes de mesure, est très nettement inférieur à la recommandation européenne 99/519/CE (inférieur à 1V/m pour une limite réglementaire de 41 V/m à 900 MHz).

Le programme s'oriente maintenant vers l'évaluation des incertitudes des dispositifs expérimentaux d'exposition des animaux soumis à des rayonnements électromagnétiques. ●

# Sols pollués

La gestion des sols pollués s'appuie sur une démarche d'évaluation des risques dont les principes et la mise en œuvre sont décrits dans les guides méthodologiques publiés sous l'égide du ministère de l'Écologie et du Développement durable. Les parties relatives aux risques pour la santé humaine et aux risques pour les écosystèmes ont été rédigées par l'INERIS. La pratique de la méthode conduit à la mise en évidence de domaines dans lesquels il existe un déficit de connaissances,

**DES RECHERCHES POUR  
PROGRESSER DANS  
L'ÉVALUATION DES RISQUES  
LIÉS AUX SOLS POLLUÉS**

ce qui justifie le lancement de programmes de recherche dont l'objectif est d'améliorer la pertinence des évaluations de risques.

Dans ce but, l'INERIS et l'ADEME se sont associés pour réaliser, avec le concours de plusieurs laboratoires universitaires, une étude sur les transferts des polluants organiques du sol vers les végétaux comestibles (projet SACARTOM). Ce phénomène souvent déterminant pour le niveau de risque est en effet traité de manière très empirique et génère de

fortes incertitudes. Il en va de même pour le transfert des substances volatiles du sol vers l'air extérieur ou vers l'intérieur de bâtiments. Les modèles existants sont peu validés et les résultats peuvent être très variables selon le modèle et les valeurs de paramètres utilisés.

Parallèlement, l'INERIS a mis en place le programme TRANSPOL qui associe des organismes de recherche et des bureaux d'études pratiquant la modélisation des transferts des polluants du sol vers les eaux souterraines en vue de définir des règles de bon usage des modèles. Ce programme a mis en évidence des domaines dans lesquels des travaux de recherche pourraient réduire les incertitudes. C'est le cas par exemple du transfert d'hydrocarbures denses dans la zone non saturée du sol. La méthodologie d'évaluation des risques pour les écosystèmes est moins avancée que celle qui concerne la santé humaine. Les phénomènes à prendre en compte sont beaucoup plus complexes. L'INERIS a rédigé un projet de guide qui est mis en application à titre expérimental sur des sites pollués. ●

## Méthodologie d'évaluation des risques écotoxicologiques appliquée aux sites et sols pollués

Jacques BUREAU

Les sites et sols pollués constituent une source de dissémination importante de polluants dans l'environnement. Une circulaire du ministère de l'Écologie et du Développement durable définit depuis décembre 1999\* une approche d'évaluation basée sur le risque. En appui à cette circulaire, l'INERIS a contribué en collaboration avec d'autres

partenaires à l'élaboration d'une méthodologie spécifique d'évaluation des risques encourus par les écosystèmes et à la rédaction d'un projet de guide.

Au cours de la rédaction d'une version préliminaire de ce guide, il est apparu nécessaire d'expérimenter, en condition

●●● suite page 18



réelle, son applicabilité en regard des principes généraux de précaution, de proportionnalité, de spécificité et de transparence définis dans les textes réglementaires.

Le volet danger de l'EDR-Écosystèmes se décline selon trois approches complémentaires : par substance, par matrice et l'approche de type écologique.

**L'approche par substance** ne nécessitait pas de validation particulière puisqu'elle est employée par ailleurs dans le cadre de l'évaluation des substances nouvelles et existantes au niveau européen.

**L'approche par matrice**, fondée sur le recours aux essais écotoxicologiques en laboratoire, a en revanche fait l'objet d'un travail principalement bibliographique. Ce travail a permis d'effectuer le recensement des méthodes d'essais applicables aux matrices eau, sol et

sédiments. La mise à jour de cette liste d'essais disponibles a été réalisée selon un certain nombre de critères techniques, en privilégiant *a priori* les méthodes normalisées.

**L'approche de type écologique**, plus complexe et moins expérimentée, a nécessité le recours à des expérimentations sur deux sites potentiellement pollués présentant des caractéristiques de pollution différentes (organique et inorganique).

### > Méthodologies d'inventaire du couvert végétal et des invertébrés

Sur ces deux sites, l'application de la méthodologie proposée a révélé que la multiplicité des cibles biologiques potentiellement affectées par une pollution des sols nécessitait qu'une attention particulière soit portée sur les modèles conceptuels d'exposition et de transfert, puisqu'ils conditionnent *in fine* le déroulement de l'étude.

Faute de pouvoir cerner les impacts potentiels sur toutes les composantes biologiques présentes dans un écosystème,

les travaux expérimentaux ont été principalement orientés sur les biocénoses végétales et animales du sol. Une méthodologie d'inventaire du couvert végétal, mettant en évidence les effets délétères d'une pollution des sols sur les plantes, a ainsi pu être mise au point et validée. Parallèlement, une méthodologie similaire a été testée pour les invertébrés inféodés aux couches superficielles du sol. D'autres travaux demeurent cependant nécessaires pour les organismes biologiques terrestres qui ne sont en contact qu'épisodiquement avec les sources de pollution (principalement les vertébrés).

La prise en considération du volet exposition de l'EDR-Écosystèmes, à travers ces deux études de cas, a révélé que les modèles de dissémination et de transfert de polluants utilisés pour les autres composantes de l'EDR (sanitaire et ressources en eau) ne pouvaient être appliqués à la composante «écosystèmes» qu'après une prise en compte de la spécificité des cibles biologiques concernées, notamment en regard des processus de contact et de la biodisponibilité des substances en jeu.

D'autres travaux, principalement orientés vers les écosystèmes aquatiques, devront être menés de manière à compléter la panoplie d'outils requis pour mener à bien une EDR-Écosystèmes. ●

\* Circulaire du 10 décembre 1999 relative aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation.

UN PROJET DE GUIDE  
MÉTHODOLOGIQUE QUI  
RÉVÈLE LA NÉCESSITÉ  
D'UNE EXPÉRIMENTATION  
EN CONDITION RÉELLE

## 3 APPROCHES COMPLÉMENTAIRES POUR L'ÉLABORATION D'UNE MÉTHODOLOGIE SPÉCIFIQUE D'ÉVALUATION DE RISQUES ENCOURUS PAR LES ÉCOSYSTÈMES

# Émission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : modélisation et mesures sur site

Corinne HULOT

LA DIFFÉRENCE  
CONSTATÉE ENTRE  
LES RÉSULTATS  
EXPÉRIMENTAUX  
ET LES RÉSULTATS  
DE LA MODÉLISA-  
TION CONDUISENT  
À POURSUIVRE  
LES TRAVAUX DANS  
CETTE DOUBLE  
APPROCHE

Des évaluations des risques pour la santé réalisées sur des sites pollués ont mis en évidence le rôle majeur de la voie d'exposition par inhalation dans le cas de scénarios industriels ou résidentiels avec émission de substances volatiles du sol vers les bâtiments.

Dans ce cas, les concentrations dans l'air ambiant peuvent être évaluées par la métrologie et/ou la modélisation. Les mesures analytiques constituent la meilleure estimation de l'exposition au moment présent avant toute modélisation par simulation. Toutefois, pour la planification de futurs aménagements (notamment ceux de mise en sécurité du site), la prévision des effets à long terme par la simulation numérique peut s'avérer nécessaire pour s'affranchir de la variabilité des concentrations dans l'air ambiant dues au transfert depuis l'air du sol.

Quelques modèles de transfert de vapeurs du sol vers un bâtiment ont été développés depuis plusieurs années, principalement pour des programmes de recherche gouvernementaux, afin de répondre à un besoin conjoncturel précis. Ces modèles font appel à des hypothèses plus ou moins simplificatrices et proposent diverses approches relatives aux phénomènes de transport pris en compte, et aux paramètres nécessaires, comme les caractéristiques du bâtiment ou les caractéristiques physico-chimiques du sol. Dans certains cas, les modèles peuvent conduire à des évaluations de concentrations dans un bâtiment qui diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Aucun de ces modèles ne peut être considéré comme vraiment validé par rapport à des données expérimentales.

LES MESURES ANALYTIQUES CONSTITUENT LA MEILLEURE ESTIMATION AU MOMENT PRÉSENT

## Les modèles d'émission soumis à l'épreuve des tests

Le programme conduit par l'INERIS consiste principalement en une confrontation des résultats de différents modèles d'émission dans les bâtiments à des mesures de terrain sur des sites contaminés ou en pilote. Il vise à améliorer la sélection et l'utilisation des modèles, et l'exploitation de leurs résultats avec leurs incertitudes.

La démarche comprend trois étapes :

- L'analyse des différents modèles de transfert d'émission de substances volatiles du sol vers un bâtiment (modèles conceptuels, équations, études comparatives et données de validation expérimentales disponibles).

●●● suite page 20



● Des expérimentations sur d'anciens sites contaminés ou un site test, permettant une approche quantitative de l'émission de polluants volatils.

● La comparaison des prévisions des modèles avec les résultats expérimentaux et leur interprétation.

Ce projet est intégré à un programme de recherche sur la modélisation des transferts de polluants entre le sol et l'atmosphère, soutenu financièrement par le ministère de l'Écologie et du Développement durable et l'ADEME.

### > Première application sur un ancien site industriel

Le premier site de mesure est un ancien terrain industriel situé en zone urbaine. Des investigations antérieures ont mis en évidence une pollution principalement due à des solvants chlorés (trichloroéthylène, tétrachloroéthylène) dans les sols, l'air du sol, et les eaux souterraines. La zone d'étude correspond à un ancien atelier construit sur une dalle en béton, entouré d'une friche (ancienne zone bâtie), de zones d'accès goudronnées ou bétonnées et, au-delà, des bâtiments.

Les investigations complémentaires visaient à caractériser :

● les transferts entre les différents milieux (sol, air du sol, flux à la surface du sol, air ambiant) ;

● les paramètres principaux d'entrée des modèles (profondeur de la source, caractéristiques du sol et de la dalle de fondation, taux de ventilation et autres caractéristiques du bâtiment).

### > Deux types de dispositifs utilisés pour réaliser les mesures

Les mesures du flux à la surface du sol ont été réalisées au moyen de deux dispositifs développés par l'INERIS : la chambre à accumulation et re-circulation externe, et la chambre dynamique à balayage (Pokryszka & al. 1995 et 1999).

La chambre à accumulation et re-circulation externe est une chambre carrée (0,50 m x 0,50 m) reliée à un analyseur. Placée à la surface du sol avec une étanchéité latérale, elle accumule les gaz émis par le sol. Un dispositif envoie l'air de la chambre vers l'analyseur (dans le cas présent, un capteur FID), et le réinjecte ensuite dans la chambre. Le suivi de la vitesse d'enrichissement en gaz du mélange re-circulé permet de déduire le flux local de gaz au point considéré. Cette méthode se caractérise par son aspect direct (simple lecture sur site), par sa maniabilité et sa rapidité de mise en œuvre (quelques minutes par point). Le flux de contaminant gazeux est exprimé en flux global relatif équivalent au PCE (calibrage de l'analyseur FID (détecteur à ionisation de flamme) avec un gaz étalon PCE\*).

La chambre dynamique à balayage est une chambre (2,5 m x 1 m x 0,15 m) reliée à un émetteur de gaz inerte et à une sortie équipée de points de prélèvement. Elle recueille les gaz émis

## 3 ÉTAPES DANS LA DÉMARCHE MISE EN PLACE PAR L'INERIS POUR AMÉLIORER LA SÉLECTION ET L'UTILISATION DES MODÈLES

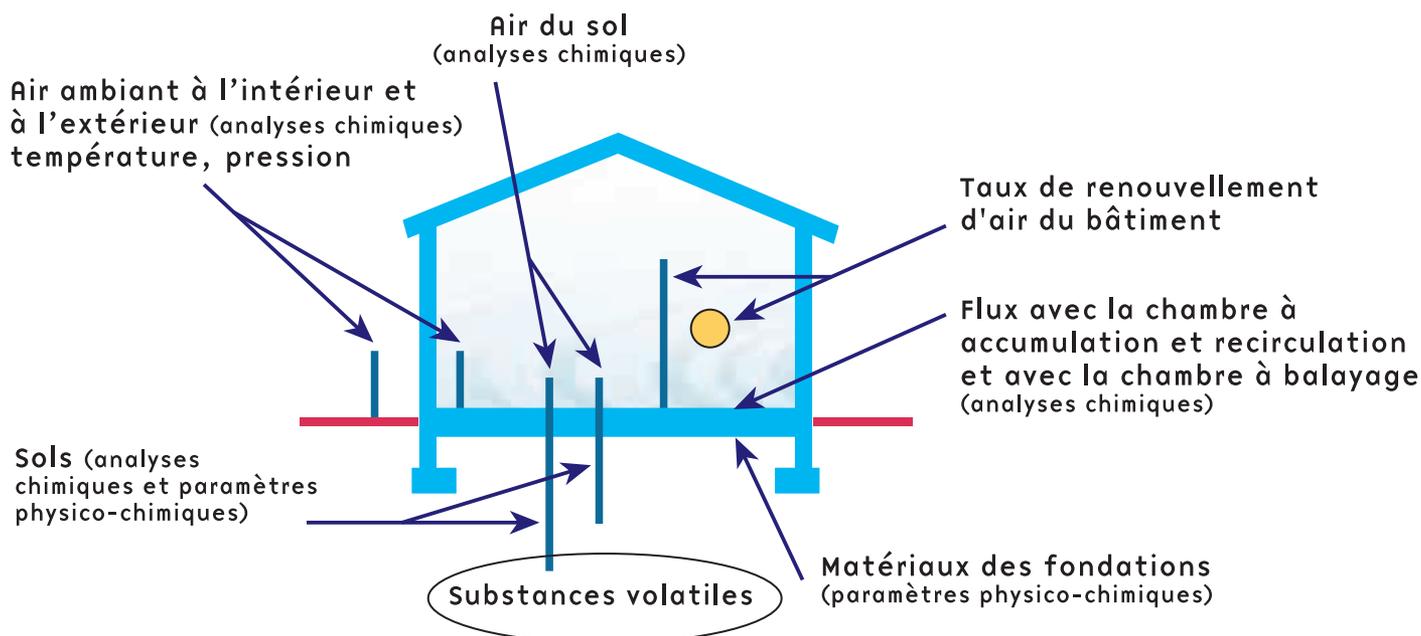
par le sol au sein d'un flux contrôlé de gaz vecteur inerte. Le mélange ainsi obtenu est analysé en sortie après stabilisation du régime, via un prélèvement sur supports adéquats réalisé au moyen d'une pompe aspirante. À partir des paramètres mesurés (teneurs, débit d'air sortant), on peut déduire le débit des vapeurs émises sortant de la chambre et donc le débit dégagé au travers de la surface couverte. Cette approche permet une quantification précise des différentes substances émises. La dimension de la chambre et les types de mesure conduisent à un maniement relativement lourd de cette méthode et à une fréquence de mesures relativement faible (1 à 3 points de mesure par jour), qui est fonction également des limites de détection analytiques désirées.

La mesure du taux de renouvellement d'air dans le bâtiment a été effectuée avec un gaz traceur ( $SF_6$ ) puis « tracée » par chromatographie en plusieurs endroits et hauteurs. On en déduit ensuite le taux de renouvellement.

### > Les mesures révèlent d'importantes variations

Les prélèvements de sol, d'air du sol et d'air ambiant ont donné lieu à neuf sondages positionnés dans les zones reconnues comme polluées lors des investigations antérieures et dans une zone témoin. Chaque sondage a été équipé en puits à gaz au moyen notamment d'un tube en PEHD (polyéthylène haute densité) crépiné à la profondeur voulue de prélèvement de gaz du sol. Des prélèvements d'air du sol et d'air à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment ont été effectués sur les supports adéquats (charbon actif et carbotrap) en fonction des analyses et seuils de détection envisagés.

La différence de pression entre le sol et l'air ambiant a été relevée à l'aide d'un appareil de mesure différentielle avec une limite de détection et une précision de l'ordre d'un Pascal. D'autres paramètres nécessaires aux modèles de transfert ont également été mesurés, tels que la perméabilité du sol et de la dalle de fondation, la teneur en matière organique, et la granulométrie du sol.



Compte tenu de la variabilité saisonnière potentielle des émissions de vapeurs, plusieurs campagnes de mesure ont été réalisées en avril, juillet, septembre et novembre 2002.

Les teneurs dans l'air du sol et l'air ambiant et les flux ont présenté d'importantes variations temporelles. Ces variations peuvent notamment être liées aux conditions météorologiques et à la présence de travaux d'excavation à proximité du bâtiment. Des simulations ont été conduites sur la base des équations de Johnson & Ettinger (Johnson & Ettinger, 1991 ; équations pour une source infinie) et de VOLASOIL (Waitz et al, 1996, adapté, au cas d'un bâtiment sur dalle sans vide sanitaire).

Les résultats des premières simulations pour le trichloroéthylène et le tétrachloroéthylène conduisent aux observations suivantes :

- Pour les modélisations à partir des concentrations observées dans le sol, des différences de 1 à 2 ordres de grandeurs entre mesures et calculs ont été observées, aussi bien sur les teneurs dans l'air ambiant que sur les flux (chambre à accumulation), en fonction des campagnes, des modèles considérés et de la substance.

- Pour les modélisations à partir des concentrations observées dans l'air du sol, les différences peuvent également atteindre 1 à 2 ordres de grandeur pour l'air ambiant.

- Les prédictions du modèle basé sur les équations de VOLASOIL apparaissent plus conservatrices que celles issues du modèle Johnson & Ettinger.

### >Poursuivre les mesures sur d'autres sites avec d'autres contaminants

L'interprétation précise de ces premiers résultats est actuellement limitée, des incertitudes résiduelles majeures ayant été mises en évidence sur certains paramètres d'entrée déterminants de la modélisation des phénomènes de diffusion et de convection (différence de pression, perméabilité).

En conclusion, le travail réalisé révèle des différences de 1 à

2 ordres de grandeur entre mesures et prédictions des modèles disponibles, sur les flux à la surface du sol aussi bien que sur les teneurs dans l'air ambiant du bâtiment. Les prochaines simulations consistant à utiliser d'autres valeurs observées sur site pourront éventuellement mettre en évidence la sensibilité de certains paramètres.

La variabilité temporelle des teneurs observées sur site et l'impact des incertitudes résiduelles liées à certains paramètres d'entrée de la modélisation montrent la difficulté et l'importance d'une instrumentation de terrain affinée.

La poursuite de ce travail sur d'autres sites présentant des caractéristiques diverses quant aux contaminants (types de sols, types de bâtiments présents, avec des instrumentations conséquentes et des campagnes de mesures à différentes époques) sera nécessaire pour documenter la validation des modèles d'émission de substances volatiles du sol vers les bâtiments. ●

\* Tétrachloroéthylène.

### Publications

■ Hulot C., Gay G., Hazebrouck B., Pokryszka Z. (2002) - Émission de polluants gazeux dans les bâtiments à partir d'un sol pollué : modélisation et mesures sur site. *1<sup>re</sup> rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués : bilan et perspectives*. Paris 12-13 décembre 2002.

■ Hulot C., Hazebrouck B., Gay G., Malherbe L., Pokryszka Z. (2003) Vapor emissions from contaminated Soils into buildings: comparison between predictions from transport models and field measurements. *ConSoil 2003*, 12-16 May 2003, Gent Belgium.



# Étude du comportement du trichloroéthylène dans la zone non saturée du sol

Claire ROLLIN

Les solvants chlorés figurent parmi les polluants les plus fréquemment rencontrés dans les sols et les eaux souterraines contaminés. Parmi ces solvants, le trichloroéthylène (TCE) est un polluant de type «DNAPL» (dense non aqueous phase liquid). Son utilisation pour le dégraissage des surfaces métalliques a conduit à contaminer de nombreux sites industriels. Dans les milieux poreux, le TCE peut être rencontré sous différentes formes : phase pure, phase gazeuse, dissous dans l'eau ou adsorbé sur une matrice solide. Chaque forme correspond à un risque de pollution pour des sols et les aquifères, à court et long termes.

L'étude entreprise par l'INERIS vise à comprendre et quantifier les processus de vola-

L'INERIS S'EST DOTÉ D'UN OUTIL EXPÉRIMENTAL QUI PERMETTRA DE PROGRESSER DANS LA VALIDATION DES MODÈLES DE TRANSFERT DE POLLUANTS DANS LES SOLS VERS LES EAUX SOUTERRAINES

LE TRICHLOROÉTHYLÈNE EST À L'ORIGINE DE LA CONTAMINATION DE NOMBREUX SITES INDUSTRIELS. L'ÉTUDE DE L'INERIS VISE À COMPRENDRE ET QUANTIFIER CERTAINS PHÉNOMÈNES LIÉS AU TCE EN MILIEU POREUX

tilisation et de dissolution d'un DNAPL injecté dans un milieu poreux homogène, sans tenir compte dans un premier temps des phénomènes d'adsorption.

Les objectifs de cette étude sont :

- de dimensionner, à l'aide de résultats de simulations numériques, un système d'expérimentation en 2D permettant de suivre la migration du TCE dans un sable saturé en eau de manière variable ;

- de comparer les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par simulation numérique lors de l'injection de TCE dans une colonne.

Les expériences d'injection sont réalisées à l'aide d'une colonne en verre. Ses dimensions optimales, sélectionnées à partir de résultats de simulations numériques, sont de 0,2 m de diamètre et 1 m de longueur. La colonne est progressivement remplie avec de l'eau. Du sable est ajouté par fractions de 800 g. La colonne est frappée plusieurs fois avec un marteau afin de permettre l'optimisation de la distribution des grains de sable et d'éviter des effets compressifs entre chaque niveau de sable. Une fois que la colonne est complètement remplie d'eau et de sable, elle est vidangée de son eau par sa base. Le drainage est arrêté quand le niveau d'eau est d'environ 0,2 m. Ainsi, la zone saturée est située entre 0 et 0,2 m, la frange capillaire entre 0,2 m et 0,5 m approximativement et la zone non saturée entre 0,5 m et 1 m. Les caractéristiques principales du sable (conductivité hydraulique, porosité efficace, pression capillaire et perméabilité relative) ont été déterminées expérimentalement.

## >Deux types d'expériences

La colonne est équipée de trois indicateurs de pression et d'une sonde de température. Afin de permettre le prélèvement du gaz et de l'eau avec des seringues, 18 trous ont été réalisés dans la colonne. Le prélèvement par seringue est réalisé à 5 centimètres à l'intérieur du sable. Les échantillons, mélangés avec 1 ml de méthanol (piège pour TCE pur, volatil et dissous), sont analysés à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse équipé d'une colonne capillaire et d'un détecteur à ionisation de flamme (FID).

Deux types d'expériences ont été menés. Une première expérience à l'aide de TCE pur a mis en jeu des prélèvements d'eau. Une seconde expérience a été réalisée avec du TCE coloré, sans échantillonnage, mais avec prises de photographies. Les échantillons prélevés pendant la première série d'expériences ont été collectés avec des seringues Hamilton (gaz : 100 µl et eau : 250 µl) et mélangés avec

## ON OBSERVE UN RETARD DANS LA MIGRATION VERTICALE ET LATÉRALE DES VAPEURS DE TCE POUR LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX PAR RAPPORT AUX RÉSULTATS OBTENUS PAR SIMULATION NUMÉRIQUE

du méthanol afin de dissoudre et piéger le TCE. Ces mélanges sont ensuite analysés comme indiqué plus haut. Une étude numérique a été menée avec un logiciel tridimensionnel et multiphasique appelé SIMUSCOPP (SIMULATION des Sites CONTaminés par des Produits Pétroliers). Il permet de simuler des flux dans la zone saturée et la zone non saturée et d'évaluer le transfert de masse entre chaque phase durant le transport.

D'après les expériences, et à l'opposé des résultats numériques, il n'est pas possible d'observer un état d'équilibre un jour après l'injection de TCE, mais plutôt après une semaine. Cette observation a été vérifiée par l'expérience

recourant au TCE coloré. La comparaison entre les résultats des expériences standards et les résultats obtenus par les simulations numériques, en ce qui concerne les vapeurs de TCE, montrent un certain retard dans la migration verticale et latérale des vapeurs pour les résultats expérimentaux. En ce qui concerne l'eau, les concentrations mesurées sont supérieures à celles obtenues par les simulations numériques. ●

### Publications

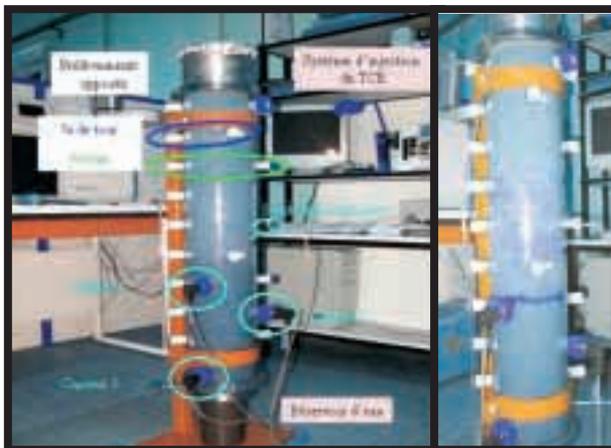
■ Emonet A., *Études expérimentales et numériques de la migration d'un polluant organique dans un milieu poreux homogène à saturation variable en eau.*

*Thèse de doctorat, Nancy, 18 juin 2003*

■ Emonet A., *Étude de la migration du trichloroéthylène dans une colonne de sable.*

*Première rencontre nationale de la recherche sur les sites et sols pollués, 12-13 décembre 2002*

Dispositif expérimental (à droite) et de la propagation du solvant coloré (TCE + rouge soudan IV) 24 heures après l'injection de TCE.



# Perturbateurs endocriniens

**P**armi les effets néfastes susceptibles d'être provoqués par les substances chimiques présentes dans l'environnement, ceux qui concernent la perturbation des fonctions de reproduction font l'objet d'une attention particulière depuis plusieurs années en raison de la menace qu'ils représentent pour la survie des espèces vivantes.

L'INERIS a mis en place deux équipes de recherche qui travaillent de manière concertée sur ce thème. La première s'intéresse aux problèmes de reproduction chez l'homme, qu'elle étudie par voie expérimentale sur modèle animal. Un programme visant à caractériser les effets de toxiques pour la reproduction reconnus tels que les éthers de glycol administrés sur plusieurs générations est en voie d'achèvement.

Un second programme a pour objectif l'étude des mécanismes d'action de

substances chimiques naturelles ou synthétiques, également toxiques pour la reproduction, mais en raison de leur capacité d'interaction avec le système endocrinien. La seconde équipe étudie ces mêmes phénomènes de perturbation endocrinienne sur les espèces animales vivant en milieu aquatique avec pour objectif la mise en place d'outils de caractérisation du potentiel perturbateur des substances chimiques et de méthodes de détection précoce des effets pour l'individu ou les populations. Les résultats de ces travaux permettent à l'INERIS de contribuer efficacement au développement de méthodes et d'outils d'évaluation des risques liés à ces substances à l'échelle européenne et internationale (OCDE). ●

DEUX ÉQUIPES DE  
L'INERIS TRAVAILLENT  
EN CONCERTATION  
SUR LES PERTURBATEURS  
ENDOCRINIENS CHEZ  
L'HOMME ET L'ANIMAL

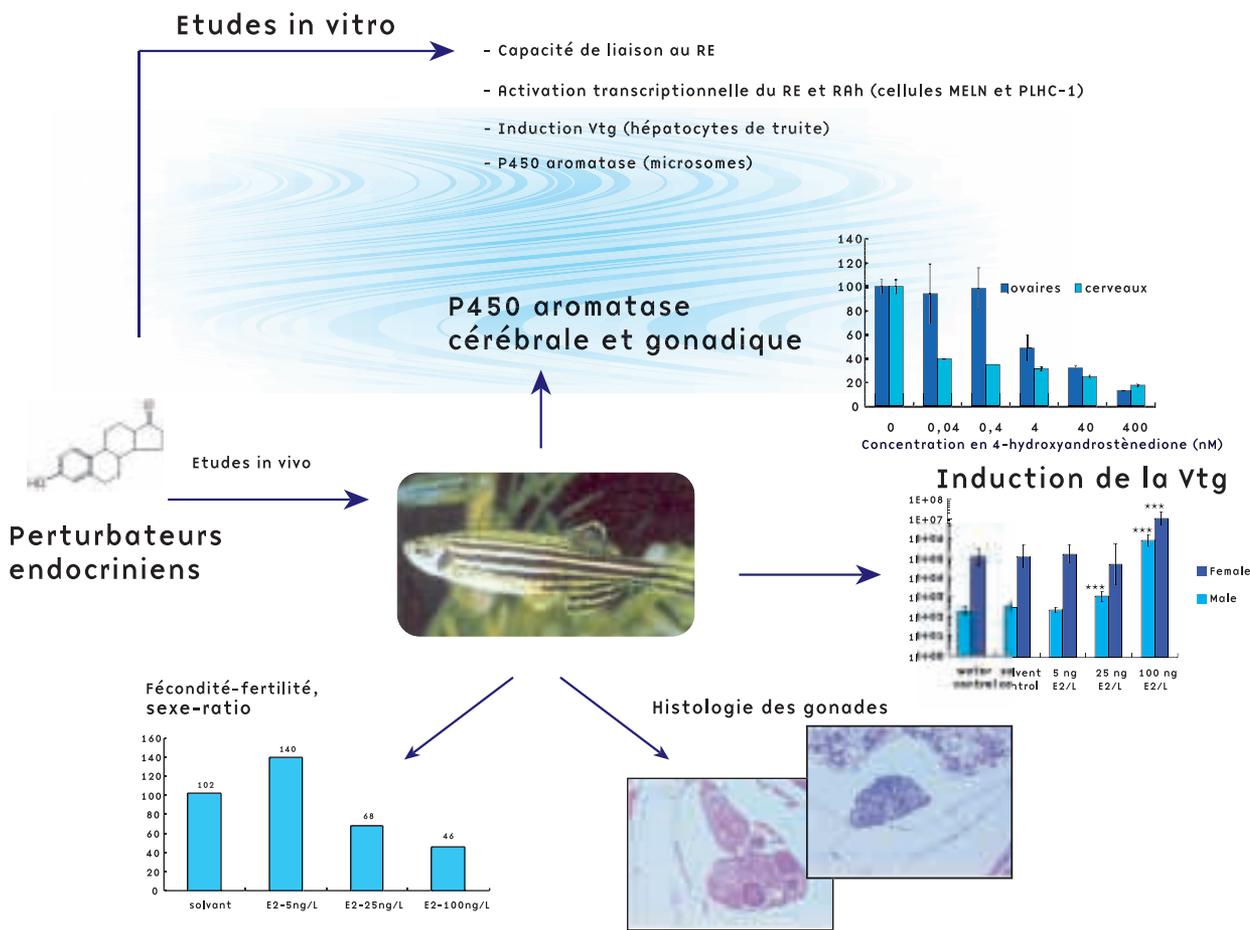
## Perturbateurs endocriniens dans l'environnement aquatique

Jean-Marc PORCHER

**L**a présence dans l'environnement aquatique des perturbateurs endocriniens (PE), c'est-à-dire de substances d'origine naturelle ou anthropique capables d'interférer avec le système endocrinien des vertébrés, est une préoccupation majeure depuis quelques années. Les PE peuvent potentiellement agir depuis la synthèse des hormones endogènes jusqu'à la réponse des cellules cibles et, par conséquent, perturber l'homéostasie, le développement, la reproduction des organismes. Les réponses biologiques induites sont complexes et vont de l'altération de l'expression de gènes sous contrôle des hormones (effets à l'échelle moléculaire) à l'altération des sexe-ratio des populations exposées (effets à l'échelle des populations).

Dans l'environnement aquatique, les composés les plus souvent incriminés sont ceux mimant l'ac-

LA PRÉSENCE DE PERTURBATEURS  
ENDOCRINIENS DANS LE  
MILIEU AQUATIQUE EST UNE  
PRÉOCCUPATION MAJEURE  
DEPUIS QUELQUES ANNÉES



### Schéma de l'étude des effets biologiques *in vitro* et *in vivo* d'un PE.

tion des hormones stéroïdes œstrogènes (œstrogènes mimétiques). Les études menées sur les populations de poissons de rivière suggèrent un lien entre la contamination du milieu par ces substances et les altérations du développement et de la reproduction.

Face aux risques que présentent ces substances pour la reproduction des organismes et/ou leur descendance, la stratégie de recherche s'oriente autour de plusieurs axes complémentaires.

### > Développement d'outils de diagnostic et étude de la stéroïdogénèse d'enzymes

Le premier axe concerne le développement et l'utilisation d'outils biologiques qui permettent de fonder un diagnostic sur le danger des substances, seules ou en mélanges, vis-à-vis du système endocrinien des poissons. Ainsi, à l'aide de modèles cellulaires (e.g. cellules MELN développées par l'unité INSERM 439), il est possible de caractériser l'affinité des xénobiotiques pour les récepteurs aux œstrogènes (RE) et de déterminer le potentiel œstrogénique d'échantillons environnementaux de sédiments (1) et d'eaux de surface de rivières françaises (2). Chez les poissons, l'exposition à des molécules

agonistes des RE se traduit par une altération de la synthèse de protéines sous contrôle hormonal. Par exemple, une induction de l'expression de la vitellogénine (Vtg), normalement absente chez les mâles et les juvéniles, témoigne de l'exposition présente ou passée de ces poissons à un ou plusieurs polluants œstrogènes mimétiques. Dans ce domaine, l'INERIS a développé plusieurs méthodes immuno-enzymatiques de mesure de la Vtg chez différentes espèces de poisson (3-5). Ces outils permettent la conduite d'études *in vitro* sur culture primaire d'hépatocytes de truite ou *in vivo* chez des poissons exposés en conditions contrôlées à des toxiques (6) ou prélevés *in situ* afin de diagnostiquer l'impact environnemental de ces substances sur les populations autochtones (7).

Plus récemment, nos recherches se sont orientées vers l'étude de l'expression de certaines enzymes de la stéroïdogénèse (enzymes responsables de la biosynthèse des hormones stéroïdiennes) et ce, afin de mieux considérer les multiples modes d'actions des PE. En particulier, nous nous intéressons à l'expression de la P450 aromatase qui est

●●● suite page 26



responsable de la synthèse de l'œstradiol et dont l'expression semble prépondérante pour la différenciation gonadique chez les truites femelles.

### >Le poisson zèbre comme modèle biologique

L'ensemble de ces mesures réalisées aux plans biochimique et cellulaire rend compte de la présence et du mode d'action de molécules PE et sont autant de signaux d'alarme précoces dans la réponse biologique. Cependant, la pertinence de ces mesures en terme d'effets avérés sur la reproduction est moins bien démontrée. Aussi est-il indispensable de mesurer l'impact de ces molécules à l'aide de variables plus intégratives d'effets tels que l'histologie des gonades, la fécondité, la fertilité, le sexe ratio.

La réalisation de ces études exige de disposer d'un modèle biologique dont l'élevage et la reproduction sont relativement aisés. Notre choix s'est porté sur le poisson zèbre (*Danio rerio*) qui répond à ces exigences. Il permet d'étudier l'impact d'une exposition à des PE à différents degrés de complexité biologique (ex. induction de vitellogénine et étude sur la fertilité des mâles), soit en exposant les organismes à des stades de développement particuliers (8), soit en étudiant les effets sur plusieurs générations (9). ●

## LES ÉTUDES MENÉES SUR LES POISSONS DE RIVIÈRES SUGGÈRENT UN LIEN ENTRE LA CONTAMINATION DU MILIEU PAR LES PERTURBATEURS ENDOCRINIENS ET LES ALTÉRATIONS DU DÉVELOPPEMENT ET DE LA REPRODUCTION

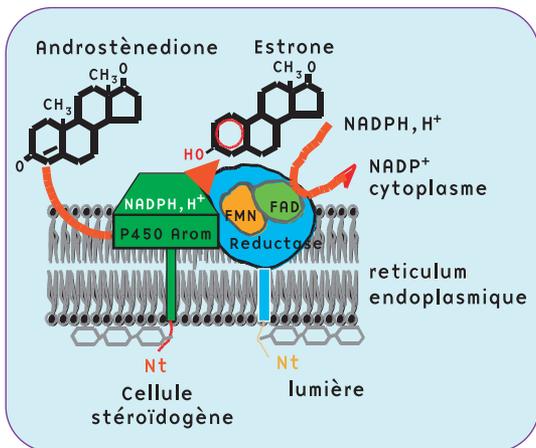
### Publications

- (1) Michallet-Ferrier P., Aït-Aïssa S., Dominik J., Haffner G.D., Balaguer P. and Pardos M. Assessment of estrogen (ER) and aryl hydrocarbon receptor (AhR) mediated activities in organic sediment extracts of the Detroit River, using MELN and PLHC-1 *in vitro* assays. *Journal of Great Lakes Research* Soumis.
- (2) Aït-Aïssa S., Flammarion, P., Balaguer, P., Siret, C., Noury, P., Brion, F. and Porcher, J. M. (2002) *In vitro* estrogenic and dioxin-like activities in French river waters : correlation with *in vivo* biomarkers induction in inhabiting fishes. *SETAC-EUROPE*, Vienne, Mai 2002.
- (3) Brion F., Rogerieux F., Noury P., Migeon B., Flammarion P., Thybaud E., Porcher J.M. (2000) Two step purification of vitellogenin from three teleost fish species : rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*), gudgeon (*Gobio gobio*) and chub (*Leuciscus cephalus*). *Journal of Chromatography B*, 737, 3-12.
- (4) Nilsen, B.M., Berg, K., Eidem, J.K., Kristiansen, S.I., Nilsen, M.V., Brion, F., Porcher, J.M., Kordes, C., Gutzeit, H.O., Denslow, N.D., Goksøyr, A. (2002). Development of Quantitative Vitellogenin ELISAs for test fish species used in endocrine disrupting screening. *Environmental Sciences*, 9, 2 & 3, MY, Tokyo.
- (5) Brion F., Nilsen B.M., Eidem J.K., Goksøyr A., Porcher J.M. (2002) Development and validation of an ELISA to measure vitellogenin in the zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 28, 1699-1708.
- (6) Brion F., Porcher J.M., Bazzon M., Gondelle F., Cornu L., Gillet C., Garric J., Flammarion P., Thybaud E. (1999) Vitellogenin induction in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after long term water exposure to 4-Nonylphenol and 17β-estradiol. *Conférence Internationale sur les perturbateurs endocriniens*, 7-8 Octobre 1999, Nantes, France.
- (7) Flammarion P., Brion F., Palazzi X., Babut M., Garric J., Migeon B., Noury P., Thybaud E., Tyler C.R. (2000). Estrogenic effects on chub (*Leuciscus cephalus*): induction of vitellogenin and effects on the testicular structure. *Ecotoxicology*, 9, 127-135.
- (8) Brion F., Triffault G., Palazzi X., Garric J., Laillet B., Porcher J.M., Thybaud E., Tyler C.R., Flammarion, P. (en révision) Biological effects of exposure of various life stages of zebrafish to environmental concentrations of 17β-estradiol. *Aquatic Toxicology*.
- (9) Nash J.P., Brion F., Tyler, C.R. and Kime, D.E. (en préparation) : Effects of ethinyloestradiol over multigenérations in the the zebrafish (*Danio rerio*). *Environmental Science and Technology*.

# Les perturbateurs endocriniens chez l'homme

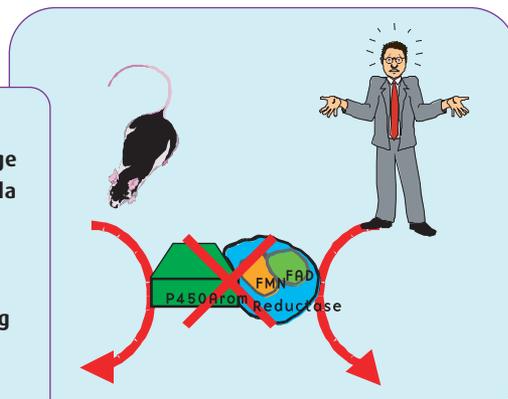
Emmanuel LEMAZURIER

## 1 > Le complexe aromatase



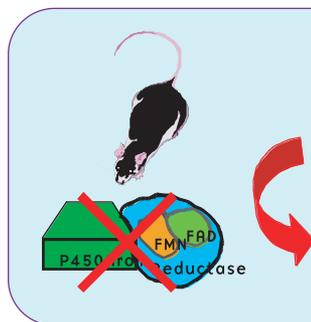
## 2 > Les déficiences en aromatase

Diminution de la fertilité avec l'âge  
Perturbation de la spermatogénèse entre 4-5 mois et 1 an.  
Cellules de Leydig hyperplasiques/hypertrophiées



Macroorchidisme et consistance testiculaire normale (Morishima et al., 1995)  
Petits testicules, oligospermie et spermatozoïdes immobiles (Carani et al., 1997)

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



Il a été démontré que la fonction de reproduction pouvait être perturbée par un ensemble de substances chimiques naturelles ou issues des activités humaines, présentes dans l'environnement. Ces perturbations entraînent chez l'homme adulte une diminution du nombre de spermatozoïdes ou l'apparition de cancers testiculaires. Plus récemment, une série de publications a suggéré que l'exposition *in utero* à ces substances conduit à une augmentation des hypospadias, à des dysfonctionnements de la différenciation sexuelle, à des avortements spontanés ou à des mort-nés, à une diminution du poids des fœtus, des leucémies infantiles et des changements du sexe-ratio.

### > Deux catégories de perturbateurs ont été étudiées

L'étude de ce problème capital de santé humaine nous a conduits à nous intéresser plus particulièrement aux perturbateurs endocriniens (PE) que l'on peut classer en deux grandes catégories selon leur mode d'action.

1. Via les récepteurs (androgènes, œstrogènes, récepteurs des hydrocarbures aromatiques). La liaison à ces récepteurs peut entraîner un effet agoniste (hormono-mimétique) ou antagoniste

### > Quantifier le pouvoir hormono-mimétique pur d'un PE

2. Interaction avec un axe endocrinien comme, par exemple, l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique en régulant les activités enzymatiques constituant cet axe. Dans notre programme, les effets de l'exposition *in utero* à des xénobiotiques sur le développement et la reproduction sont mesurés sur des souris de type sauvage. Les résultats sont comparés à ceux observés chez des souris déficientes en œstrogènes par délétion du gène de l'aromatase (aromatase knock out: ArKO). Cette délétion a pour conséquences, entre autres, de provoquer une accumulation de graisse chez l'animal, de diminuer la fertilité avec l'âge chez les mâles et de provoquer chez les femelles des atrophies

de l'utérus et une ambiguïté sexuelle au niveau de l'ovaire. Le phénotype des souris ArKO exposés sera comparé avec celui d'animaux non exposés. Ces souris seront utilisées pour quantifier le pouvoir hormono-mimétique pur d'un PE. Ce programme contribuera à cerner les mécanismes fins, génique et protéique, sous-jacents de l'effet toxique de certains PE appelés œstrogéno-mimétiques ou – et surtout – anti-androgènes. De plus, les effets précoces des PE sur le développement seront renseignés. Les données recueillies apporteront des informations sur les risques aux niveaux actuels d'exposition et fourniront des réponses en terme de prédiction des effets grâce à l'étude de la relation dose-réponse. ●

L'INERIS est l'organisme sur lequel s'appuie le ministère de l'Écologie et du Développement durable pour l'évaluation des risques des substances chimiques nouvelles et existantes vis-à-vis des écosystèmes, dans le cadre des directives européennes et des conventions internationales concernées.

Cette activité d'appui prend diverses formes comme la rédaction ou l'examen de dossiers, la conception et la validation de méthodes d'essai, la contribution à l'évolution des guides techniques d'évaluation... Elle s'étend à l'évaluation des risques écotoxicologiques liés à des milieux ou à des matières susceptibles de contenir des substances toxiques pour la faune ou la flore : eau, sols, sédiments,

UNE ÉVALUATION DES  
RISQUES LIÉS À DES  
MILIEUX OU À DES  
MATIÈRES SUSCEPTIBLES  
DE CONTENIR DES  
SUBSTANCES TOXIQUES

déchets... Concernant ces derniers, l'INERIS a proposé une méthode pour l'évaluation des propriétés écotoxiques intrinsèques d'un déchet sur la base d'une batterie d'essais.

La recherche en écotoxicologie s'articule autour de plusieurs axes : les perturbateurs endocriniens, les biomarqueurs et les études en mésocosmes.

Les biomarqueurs sont des variations de caractéristiques biochimiques ou physiologiques chez des organismes exposés à des polluants présents dans le milieu. Ils sont complémentaires des analyses chimiques et apportent de nombreuses informations sur les interactions entre le milieu pollué et les espèces concernées. Le mésocosme est un outil qui permet d'étudier en conditions semi-naturelles l'effet d'un contaminant sur un écosystème simplifié mais présentant néanmoins un certain réalisme écologique. ●

## Étude en mésocosmes des effets des polluants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques

Éric THYBAUD

Les milieux aquatiques continentaux sont des écosystèmes particulièrement exposés aux perturbations d'origine anthropique et notamment aux pollutions par de nombreux produits chimiques de synthèse. À ce jour, l'impact de beaucoup de ces polluants sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques reste inconnu. Pour apporter des éléments de réponse à cette problématique, les études en mésocosmes (c'est-à-dire condition semi-naturelle), s'avèrent particulièrement pertinentes.

L'originalité et l'intérêt des mésocosmes tiennent essentiellement au fait qu'ils combinent un certain réalisme écologique par la présence des principaux éléments constitutifs des écosystèmes naturels (sédiments, bactéries, champignons, périphyton, phytoplancton, macrophytes, invertébrés, poissons, etc.), et qu'ils permettent le contrôle des paramètres abiotiques (nature des sédiments, des concentrations en polluants, etc.) et biotiques (nombre et type d'espèces, etc.). Les mésocosmes offrent



**Vue d'ensemble des 12 mésocosmes aquatiques de l'INERIS. Dans chacun des mésocosmes un écosystème aquatique d'eau douce est reconstitué.**

en particulier la possibilité d'étudier les effets des polluants à l'échelle de l'organisme (biomarqueurs), de la population, de la communauté, et du fonctionnement de l'écosystème (flux d'énergie et de matière). À l'opposé, les bioessais monospécifiques réalisés dans les conditions simplifiées du laboratoire permettent

plus particulièrement d'évaluer les effets directs des substances chimiques. Les mésocosmes représentent donc un dispositif intermédiaire tout à fait pertinent entre les bioessais de laboratoires et les études de terrain pour appréhender les relations de causalité directe et/ou indirecte entre la présence de certains polluants, les variations

de paramètres individuels chez certaines espèces, les manifestations écotoxicologiques au sein des populations et des communautés et la structure des écosystèmes (biodiversité, nature des sédiments, etc.).

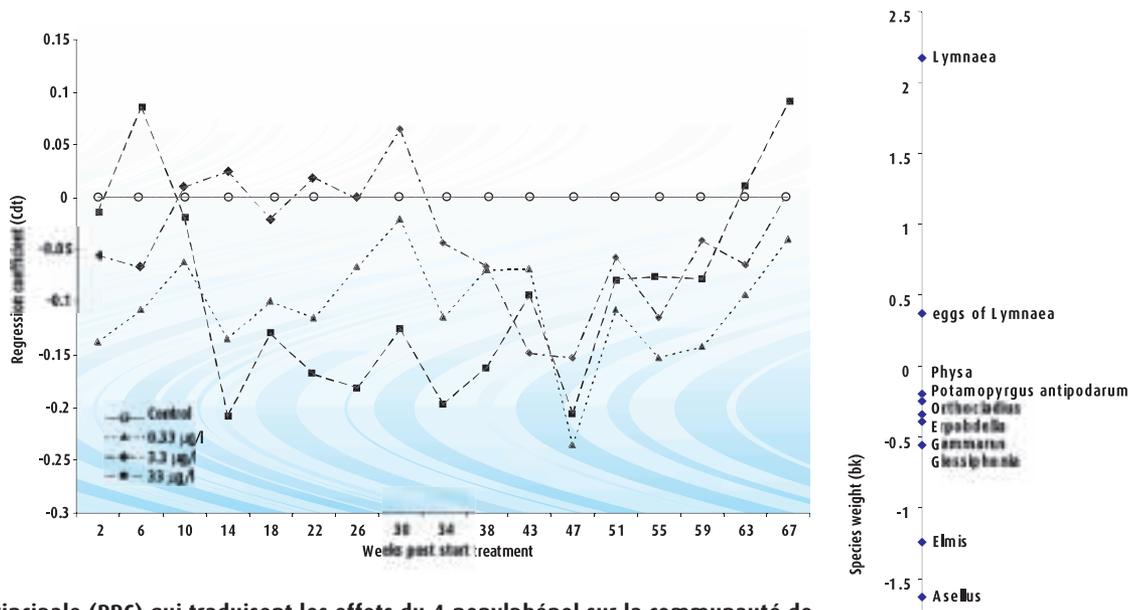
**MODÉLISER LES EFFETS DES POLLUANTS SUR LE FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES CONTRIBUE À LA PRÉDICTION DES RISQUES ÉCOLOGIQUES LIÉS AUX ACTIVITÉS HUMAINES**

**L'ORIGINALITÉ ET L'INTÉRÊT DES MÉSOCOSMES TIENNENT ESSENTIELLEMENT AU FAIT QU'ILS COMBINENT UN CERTAIN RÉALISME ÉCOLOGIQUE**

### **> Étudier les effets des polluants sur le milieu aquatique**

L'INERIS s'est équipé d'un ensemble de mésocosmes constitués de bassins de 20 m de long, 1 m de large, 30 à 70 cm de profondeur, alimentés en continu d'eau au débit de 0,8 m<sup>3</sup>/h. Ces canaux contiennent des sédiments, des roches, des macrophytes, des producteurs primaires, des consommateurs primaires, des consommateurs secondaires (épinoches) et des détritivores (photo ci-dessus). Nos objectifs de recherche sont d'étudier les effets à long terme des substances chimiques sur les populations et les communautés et de développer des modèles permettant d'appréhender les effets des polluants sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Modéliser les effets des polluants sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques

●●● *suite page 30*



**Courbes de réponse principale (PCR) qui traduisent les effets du 4-nonylphénol sur la communauté de macro-invertébrés. 58,8 % de la variance totale peuvent être attribués à la date d'échantillon (axe x). 19,1 % de toute la variance peuvent être attribués au traitement. De cette variance, 22,51 % sont montrés par l'axe vertical. Le poids des espèces (species weight = bk) correspond à l'affinité du taxon avec la PRC (une valeur positive signifie que l'espèce est affectée par le 4-NP).**



contribue à la prédiction des risques écologiques liés aux activités humaines. Un programme de recherche a été entrepris pour étudier les effets d'un perturbateur endocrinien, le 4-nonylphénol (4-NP), sur l'écosystème aquatique. Pendant, 16 mois, 6 canaux lotiques ont été contaminés en continu par du 4-NP (2 réplicats par concentration), tandis que 2 autres servaient de contrôle. Trois concentrations de 4-NP ont été testées : 0,33 - 3,3 et 33 µg/l. Les effets du 4-NP sur la structure de la communauté ont été évalués en étudiant la dynamique des producteurs primaires et des invertébrés. La physico-chimie de

l'eau (oxygène dissous, pH, conductivité, température, chlorure, nitrate et orthophosphate) a été suivie pour détecter tout changement dans le fonctionnement global de l'écosystème. Les résultats expérimentaux montrent essentiellement un effet positif du 4-nonylphénol sur le périphyton, un effet négatif sur les gastéropodes (principalement *Lymnaea peregra*) (figure ci-dessus) et aucun effet sur la physico-chimie de l'eau, les détritivores, le zooplancton, les Hirudinae et les poissons. Par ailleurs, nous avons développé un modèle de l'écosystème lotique basé sur les groupes fonctionnels définis selon

des interactions trophiques entre les espèces. Les effets du 4-nonylphénol sur les divers groupes fonctionnels ont été étudiés par l'analyse des boucles. Cette méthode qualitative permet de prédire des effets directs et indirects d'une perturbation sur les variables du système. Les prédictions ont été réalisées selon l'hypothèse que tous les groupes fonctionnels sont directement affectés négativement par le 4-nonylphénol et conduisent à des effets indirects négatifs, positifs ou indéterminés sur les autres groupes fonctionnels. Cette approche nous a permis de suggérer que les dynamiques du périphyton et des gastéropodes étaient respectivement plus affectées par les effets indirects positifs et les effets négatifs directs et indirects du 4-nonylphénol. Ce travail montre en particulier l'importance du réseau d'interaction pour la propagation des perturbations. À l'heure actuelle, les travaux se poursuivent par l'étude de l'impact du cuivre sur la structure et le fonctionnement d'écosystèmes lotiques. ●

## DÉVELOPPER DES MODÈLES POUR APPRÉHENDER LES EFFETS DES POLLUANTS SUR L'ÉCOSYSTÈME AQUATIQUE

# Biomarqueurs d'écotoxicité chez le poisson

Selim AÏT-AÏSSA

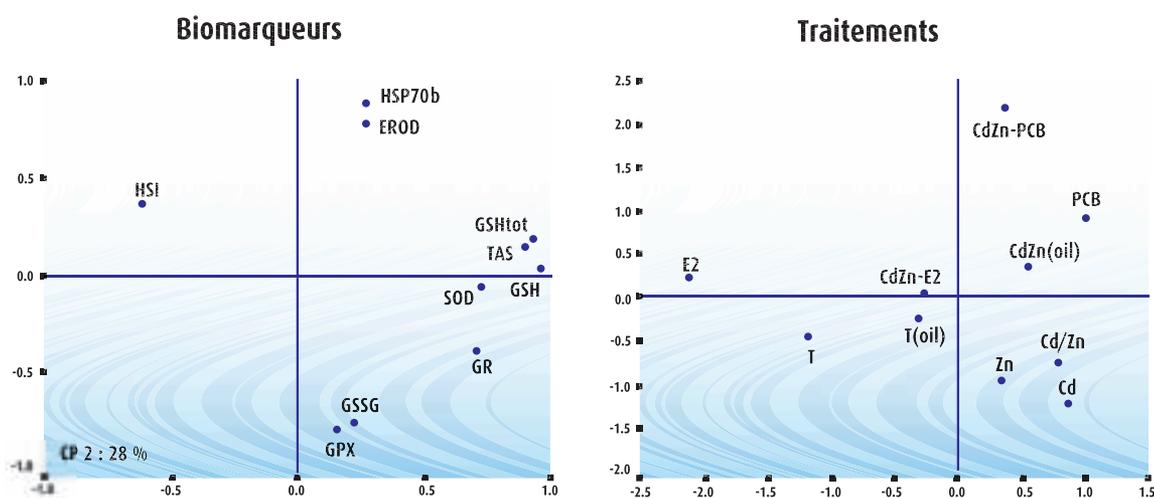
## DEPUIS 2000, L'INERIS DÉVELOPPE UN PROGRAMME DE RECHERCHE CHEZ DEUX POISSONS MODÈLES

Les biomarqueurs renseignent sur la présence de composés biodisponibles, le degré de contamination, les effets biologiques et les éventuelles interactions entre polluants. Plus sensibles que les indices biocénétiques, ils servent de signaux d'alerte précoces d'exposition et/ou d'effet des polluants sur les organismes aquatiques.

Actuellement, il n'existe pas de biomarqueur unique qui puisse rendre compte de la présence de l'ensemble des polluants et de leurs effets. Il est donc nécessaire de définir une batterie de biomarqueurs complémentaires qui reflétera au mieux la grande diversité des polluants et les effets qu'ils sont susceptibles de générer. Le programme de recherche développé à l'INERIS depuis 2000 vise à répondre à cet objectif chez deux poissons modèles, la truite arc-en-ciel (*Onchorhynchus mykiss*) et l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*). Une batterie de dosages biochimiques a été mise en place dans l'optique d'évaluer l'impact des polluants sur différentes fonctions biologiques comme les systèmes enzymatiques et non enzymatiques de défense contre le stress oxydant, le métabolisme des xénobiotiques (P450), l'homéostasie protéique intracellulaire (molécules chaperones HSP70 et HSP60) ou la vitellogénèse. D'autres marqueurs sont en cours de validation et visent

LES BIOMARQUEURS SERVENT DE SIGNAUX D'ALERTE PRÉCOCES D'EXPOSITION ET/OU D'EFFETS DES POLLUANTS SUR LES ORGANISMES AQUATIQUES

●●● suite page 32



Analyse en composantes principales de réponses biochimiques de truites exposées à différents types et combinaisons de polluants ● HSP : Protéine de stress ● HSI : Index hépatosomatique ● EROD : Activité 7-éthoxirésorufine-o-dééthylase ● GSH : Glutathion réduit ● GSSG : Glutathion oxydé ● GSHtot : Glutathion total ● SOD : Superoxyde dismutase ● TAS : Statut total en antioxydant ● GR : Glutathion réductase ● GPx : Glutathion peroxydase.



à déterminer la présence de polluants métalliques (méthallothionéines) ou génotoxiques.

Une première évaluation de la batterie a été réalisée chez des truites exposées pendant 21 jours à différents polluants (cadmium, zinc, PCB77 et œstradiol) administrés seuls ou en association.

Des profils spécifiques de réponse des biomarqueurs sont observés en fonction du type d'exposition. La figure de la page 31 illustre la variabilité des réponses des biomarqueurs en fonction des traitements sur le premier plan factoriel d'une analyse multivariée. Ce résultat montre que la combinaison de différents biomarqueurs est nécessaire pour discriminer les effets sur les poissons exposés à différents types de traitements, et

**LES RÉPONSES DE  
BIOMARQUEURS  
VARIANT EN FONCTION  
DES TRAITEMENTS**

appuie le choix d'une telle batterie pour évaluer le niveau d'exposition des poissons ou d'effet des polluants dans un contexte environnemental.

Des travaux complémentaires sont menés chez l'épinoche afin de répondre aux trois objectifs suivants :

- l'évaluation de la variabilité naturelle des biomarqueurs en conditions naturelles en tenant compte de facteurs biotiques (sexe, âge...) et abiotiques (pH, température...) ;
- la caractérisation des réponses biochimiques au cuivre en fonction de la concentration et du temps d'exposition et mise en relation avec la biodisponibilité de ce métal (bioaccumulation, spéciation) ;
- l'évaluation du potentiel prédictif des mesures vis-à-vis de la dynamique des populations en mésocosmes. ●

## Publications

■ Aït-Aïssa S., Palluel O., Ausseil O., Porcher J-M. (2001) Biochemical biomarkers in the liver of juvenile rainbow trout exposed to metals and organic compounds, alone and in combination. *Biomarkers of Environmental Contamination, Povoá de Varzim, Portugal*, 24-26 Septembre 2001.

■ Aït-Aïssa S., Ausseil O., Palluel O., Vindimian E., Ganier-Laplace J., Porcher J-M. Biochemical responses in juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after single and combined exposure to low doses of cadmium, zinc, PCB77 and 17β-estradiol. *Biomarkers*, sous presse.

**IL EST NÉCESSAIRE  
DE DÉFINIR  
UNE BATTERIE DE  
BIOMARQUEURS  
COMPLÉMENTAIRES  
POUR REFLÉTER  
LA DIVERSITÉ  
DES POLLUANTS  
ET LEURS EFFETS**

# Toxicologie expérimentale

L'évaluation des risques pour la santé repose sur la connaissance des effets toxiques provoqués par les substances chimiques et plus particulièrement sur la relation dose-réponse.

La toxicologie expérimentale constitue une des principales sources de données dans ce domaine. Disposant d'une unité d'expérimentation animale conforme aux Bonnes Pratiques de Laboratoire et maîtrisant les techniques d'exposition par inhalation, l'INERIS s'est fait une spécialité de la toxicologie pulmonaire sous ses diverses formes. Cette activité consacrée depuis de

nombreuses années à l'étude des interactions entre les particules de diverses natures et le système pulmonaire, s'oriente actuellement vers la compréhension des mécanismes complexes de la relation entre la pollution atmosphérique et l'asthme, en particulier chez l'enfant.

Parallèlement et pour mieux valoriser ses travaux expérimentaux, l'INERIS a mis en place une équipe chargée du développement d'outils transversaux d'analyse des relations dose-réponse en toxicologie sur la base de modèles toxicocinétiques physiologiques. ●



## Asthme et pollution atmosphérique

Ghislaine LACROIX

L'asthme est la maladie respiratoire la plus fréquente dans le monde et la première maladie chronique rencontrée chez l'enfant. Cette pathologie constitue de ce fait un problème majeur de santé publique. Depuis une vingtaine d'années, la prévalence de la maladie asthmatique est en constante augmentation dans la plupart des pays industrialisés où elle augmente d'environ 50 % tous les dix ans.

Il s'agit d'une maladie respiratoire plurifactorielle dans laquelle les facteurs génétiques jouent un rôle important. Mais une augmentation aussi rapide de la prévalence de la maladie asthmatique et des allergies respiratoires (rhume des foies) ne peut être liée qu'à des modifications de l'environnement et/ou des modes de vie. Parmi les facteurs environnementaux, la pollution de l'air semble jouer un rôle important. Des études épidémiologiques réalisées lors

de pics de pollution atmosphérique ont révélé une augmentation du nombre de consultations et des admissions hospitalières pour des difficultés respiratoires et des crises d'asthme. Actuellement, le rôle de la pollution atmosphérique dans le développement de l'asthme allergique reste à élucider et il est difficile d'établir d'une façon précise la relation existant entre l'asthme et la pollution.

Durant trois ans, une étude a été menée par l'INERIS, en collaboration avec l'Institut Pasteur de Paris, pour déterminer, à l'aide de souris rendues allergiques, si la pollution de l'air est à l'origine de l'exacerbation des crises d'asthme

●●● suite page 34

**L'INERIS A COLLABORÉ  
AVEC L'INSTITUT PASTEUR  
DE PARIS POUR DÉTERMINER  
L'ORIGINE DE LA POLLUTION  
DE L'AIR DANS L'EXACERBATION  
DES CRISES D'ASTHME**



observées lors des pics. Le choix s'est porté sur le dioxyde d'azote, polluant primaire gazeux oxydant, retrouvé aussi bien dans l'environnement extérieur (véhicules à moteur) qu'intérieur (cuisinières à gaz, chauffage).

Les souris allergiques ont été exposées durant trois heures au NO<sub>2</sub> à une concentration de 5 ou 20 ppm. Ces doses sont supérieures à celles rencontrées dans l'environnement mais cela compense la faible durée d'exposition et le fait que, chez les rongeurs, les quantités effectives arrivant aux poumons sont plus faibles que chez l'homme en activité. Le rôle du NO<sub>2</sub> dans le développement des principales composantes de la maladie asthmatique (hyperréactivité bronchique et inflammation éosinophilique) est présenté dans le tableau ci-contre. ●

		5 ppm NO <sub>2</sub>		20 ppm NO <sub>2</sub>	
		Après 24 h	Après 72 h	Après 24 h	Après 72 h
hyperréactivité bronchique		↘	→	↗	→
Inflammation	Perméabilité vasculaire	→	→	↗	→
	Neutrophiles	→	→	↗	→
	Mucus	-	-	↘	↘
Allergie	Éosinophiles	→	↘	→	→
	IL-5	↘	→	↗	→
	IgE	→	→	→	→

**Effets d'une exposition de 3 heures au NO<sub>2</sub> sur différents paramètres de la réaction inflammatoire et allergique (comparaison par rapport à des souris allergiques exposées à l'air non pollué).**

**Les résultats montrent qu'une exposition à court terme au NO<sub>2</sub> peut exacerber ou inhiber la réponse asthmatique chez la souris allergique selon la concentration de ce polluant. Des facteurs exogènes comme les polluants peuvent donc interférer avec la pathogénèse et par conséquent compliquer l'étude des mécanismes à l'origine de l'induction de l'asthme expérimental.**

# 50 %

DEPUIS UNE VINGTAINÉ D'ANNÉES,  
LA PRÉVALENCE DE LA MALADIE  
ASTHMATIQUE EST EN CONSTANTE  
AUGMENTATION DANS LA PLUPART  
DES PAYS INDUSTRIALISÉS OÙ  
ELLE AUGMENTE D'ENVIRON 50 %  
TOUS LES DIX ANS

## Publications

- Proust B. Etude des mécanismes de l'immunopathogénèse de l'asthme et évaluation du rôle d'un polluant atmosphérique, le dioxyde d'azote, dans un modèle murin allergique. *Thèse de doctorat, Université Paris XI, Faculté de Pharmacie de Châtenay-Malabry*, soutenue le 27 septembre 2002.
- Proust B., Ruffié C., Lefort J., Vargaftig BB. Bronchopulmonary hyperreactivity and lung eosinophil sequestration but not their migration to the alveolar compartment are independent from interleukin-5 in allergic mice. *Eur Cytokine Netw*, 2002, 13 (3), 340-349.
- Proust B., Lacroix G., Robidel F., Marlière M., Lecomte A., Vargaftig BB. Interference of a short-term exposure to nitrogen dioxide with allergic airways responses to allergenic challenges in BALB/c mice. *Mediators Inflamm*, 2002, 11(4), 251-60.
- Proust B., Nahori M.A., Ruffié C., Lefort J., Vargaftig BB. Persistence of bronchopulmonary hyperreactivity and eosinophilic lung inflammation after anti-IL-5 or -IL-13 in allergic BALB/c and IL-4R<sub>1</sub> knockout mice. *Clin Exp Allergy*, 2003, 33 (1), 119-131.

# Les modèles toxicocinétiques physiologiques

Frédéric BOIS

**P**aracelse avait déjà bien compris que la dose fait le poison. Mais qu'est-ce que la «dose» reçue lors d'une exposition? Traditionnellement, celle-ci est définie comme la quantité ingérée ou comme le produit d'une concentration inhalée par le temps d'exposition. Il s'agit là de mesures simples de la «dose d'exposition». Mais peut-on inférer la dose d'exposition produisant un effet toxique chez l'homme à partir de celle observée chez l'animal?

D'importantes différences existent entre les animaux de laboratoire et l'Homme, ou même entre individus d'ethnies, sexes ou âges différents. On sait par ailleurs que les effets toxiques sont plutôt liés à la quantité de toxique retenu dans le corps (lorsqu'il y a excrétion par exhalation, par exemple) ou bien à la quantité de métabolites produits lors de réactions enzymatiques (si ces métabolites sont cause de la toxicité du produit administré). En conséquence, pour une même dose d'exposition, la «dose interne» directement responsable de la toxicité ne sera pas obligatoirement proportionnelle à la dose d'exposition et ne sera certainement pas la même selon les espèces ou les personnes.

## L'INERIS A DÉVELOPPÉ DES MODÈLES PBPK HUMAINS

**MESURER OU ÉVALUER LA DOSE INTERNE (AU NIVEAU CELLULAIRE PAR EXEMPLE) EST DEvenu UNE ACTIVITÉ IMPORTANTE EN TOXICOLOGIE CAR C'EST L'UN DES PREMIERS PAS DE L'ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES**

Une contamination ponctuelle forte peut se traduire par une augmentation relativement faible d'un métabolite toxique, ne serait-ce que par saturation des enzymes responsables. À l'inverse, une voie métabolique de détoxification absente chez l'enfant peut le rendre particulièrement susceptible à cette contamination. Mesurer ou évaluer la dose interne (au niveau cellulaire, par exemple) est donc devenu une activité importante en toxicologie car c'est l'un des premiers pas de l'évaluation des risques sanitaires. Pour cela, on dispose d'outils d'analyse, les biomarqueurs, et d'outils de synthèse, les modèles mathématiques toxicocinétiques. La toxicocinétique décrit les phénomènes d'absorption, transport, métabolisme et d'élimination des produits chimiques dans le corps. Elle bénéficie de techniques de modélisation avancées, développées en grande partie en soutien au développement et à l'utilisation des médicaments. Les exemples d'application abondent.

## >L'intérêt des modèles toxicocinétiques dits «physiologiques»

Les modèles toxicocinétiques dits «physiologiques» (modèles PBPK) sont en principe plus satisfaisants car ils peuvent décrire de façon plus détaillée les mécanismes connus de l'absorption, de la distribution, du métabolisme et de l'excrétion des substances chimiques. Ils regroupent en «compartiments» les tissus et organes du corps ayant des caractéristiques cinétiques identiques (par exemple, même perfusion sanguine par unité de masse et même affinité pour la substance considérée). Les échanges entre compartiments sont régis par les flux sanguins, lymphatiques ou autres transports et diffusions identifiables physiologiquement.

●●● suite page 36



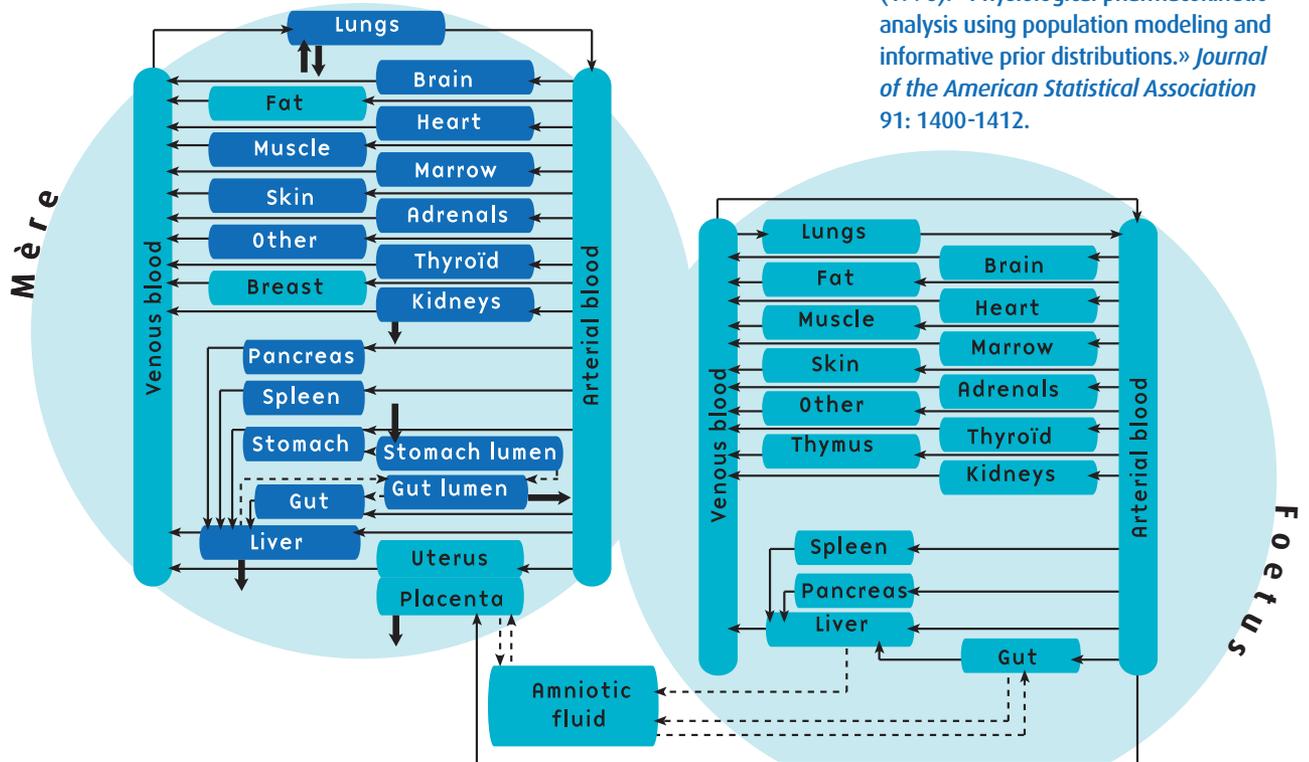
Ces modèles peuvent avoir différents niveaux de complexité, selon les buts poursuivis par la modélisation et les caractéristiques de la substance étudiée (certains ne tiennent pas compte des diffusions, par exemple). Ils créent une description paramétrique de l'organisme et facilitent ainsi les transpositions interspèces. Il suffit pour cela, en première approximation, de mettre à l'échelle de l'organisme étudié (rongeur, primate, humain, etc.) les volumes des compartiments, les flux sanguins, et autres paramètres physiologiques sans changer les valeurs des paramètres spécifiques de la substance étudiée. Ces modèles ont une structure complexe et utilisent de nombreux paramètres, mais ces paramètres ont une signification biologique directe (par exemple, le volume du foie). De nombreuses informations sont dispo-

nibles a priori dans la littérature scientifique sur les valeurs de tels paramètres. Il n'est donc pas nécessaire, en première approximation, de les ajuster à des données de toxicocinétique. Nous avons cependant montré récemment qu'il était avantageux de développer et calibrer / ajuster des modèles PBPK à l'aide de concepts et d'outils bayésiens dans le cadre de modèles statistiques multiniveaux («modèles de populations», décrivant la hiérarchie des variabilités et les incertitudes pour un problème donné). Il est également possible dans le même contexte de développer un cadre rigoureux pour l'optimisation de plans d'expérimentations. L'INERIS a développé des modèles PBPK humains calibrés pour le trichloroéthylène, le tétrachloroéthylène, le benzène, la dioxine, ou de façon générique pour la grossesse (figure ci-dessous). ●

### Publications

- Bernillon P. et Bois F.Y. (2000). «Statistical issues in toxicokinetic modeling: a Bayesian perspective.» *Environmental Health Perspectives* 108 (suppl. 5): 883-893.
- Bois F.Y. (2000). «Statistical Analysis of Fisher et al. PBPK model of trichloroethylene kinetics.» *Environmental Health Perspectives* 108 (suppl. 2): 275-282.
- Bois F.Y. (2003). «Toxicokinetic modelling of 2,3,7,8-tétrachloro-p-dioxin blood concentration after ingestion by women.» *Environnement, Risque et Santé* 2: 45-53.
- Bois F.Y., Gelman A., Jiang J., Maszle D., Zeise L. et Alexeef G. (1996a). «Population toxicokinetics of tetrachloroethylene.» *Archives of Toxicology* 70: 347-355.
- Bois F.Y., Jackson E., Pekari K. et Smith M. (1996b). «Population toxicokinetics of benzene.» *Environmental Health Perspectives* 104 (suppl. 6): 1405-1411.
- Bois F.Y., Smith T., Gelman A., Chang H.-Y. et Smith A. (1999). «Optimal design for a study of butadiene toxicokinetics in humans.» *Toxicological Sciences* 49: 213-224.
- Gelman A., Bois F.Y. et Jiang J. (1996). «Physiological pharmacokinetic analysis using population modeling and informative prior distributions.» *Journal of the American Statistical Association* 91: 1400-1412.

**Schéma d'un modèle pharmacocinétique physiologique décrivant la grossesse. Le corps de la mère et celui du fœtus sont subdivisés en compartiments correspondant à des organes ou tissus. En bleu clair : organes ou tissus dont le volume change durant la grossesse. Les flèches indiquent la direction du transport des substances chimiques de compartiment à compartiment. Les flèches épaisses correspondent à des voies d'entrée et de sortie du produit.**



## CRÉATION D'UN OUTIL DE MODÉLISATION DE LA FORMATION ET DU TRANSPORT DES POLLUANTS ATMOSPHÉRIQUES À L'ÉCHELLE DE L'EUROPE

L'INERIS est très présent dans le domaine de la qualité de l'air, en particulier par sa contribution au Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air. Ses activités couvrent les composantes essentielles de l'évaluation de la qualité de l'air que sont la métrologie et la modélisation.

En matière de métrologie, l'INERIS constitue la 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 comme le DOAS.

Pour les polluants qui, en raison de leur nature ou de leur concentration dans l'air, ne peuvent faire l'objet d'une mesure en continu, l'INERIS développe et valide des méthodes adaptées puis les propose aux instances de normalisation. Ceci vaut

aussi bien pour les polluants réglementés ou en voie de l'être comme le benzène, le mercure, les hydrocarbures aromatiques polycycliques... que pour les polluants non réglementés mais potentiellement préoccupants comme les pesticides.

Parallèlement, l'INERIS a investi dans les techniques de mesure à longue distance grâce à l'acquisition en 1999 d'un LIDAR mobile opérationnel. L'expérience accumulée depuis cette date lui donne une vision unique des possibilités et des limites de cette technique. Elle a permis à l'INERIS d'apporter une contribution significative au succès de l'opération ESCOMPTE en fournissant des profils verticaux de concentration en ozone et en assurant la coordination et le contrôle qualité de tous les moyens de mesure des concentrations en polluants gazeux.

En matière de modélisation, l'INERIS apporte un soutien technique et scienti-

fique aux associations agréées de surveillance de la qualité de l'air pour la mise en place et l'exploitation de modèles explicatifs ou prédictifs de la qualité de l'air.

En dehors de cette activité d'appui, la modélisation constitue un axe de recherche important pour l'INERIS. Dans ce domaine, l'Institut a conçu, avec l'Association pour la surveillance de la qualité de l'air en Alsace, un programme destiné à améliorer les connaissances sur la prise en compte des émissions de substances organiques volatiles naturelles par la végétation dans les mécanismes de chimie atmosphérique. Une collaboration avec le Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS a par ailleurs conduit à la création d'un outil de modélisation de la formation et du transport des polluants atmosphériques à l'échelle de l'Europe. Les sorties du modèle sont disponibles sur Internet <http://prevair.ineris.fr>. Elles pourront être utilisées à diverses fins comme les négociations sur la répartition des réductions d'émissions en Europe.

Avec ce même laboratoire, une nouvelle action a été lancée sur le thème de la pollution par les particules. Cette pollution devient de plus en plus préoccupante en raison des effets sanitaires qui lui sont attribués. Le domaine de la pollution particulaire est d'une extrême complexité : il est abordé par l'INERIS à la fois sous l'angle de la métrologie (adaptation de la technique LIDAR à la mesure quantitative) et sous l'angle de la modélisation avec pour objectif l'introduction d'un module «particules» dans le modèle de qualité de l'air déjà développé à l'échelle de l'Europe. ●



# Mesure des pesticides dans l'air ambiant

Fabrice MARLIÈRE

MESURER LES PESTICIDES  
DANS L'AIR AMBIANT  
POUR TENTER D'EXPLIQUER  
LES CONCENTRATIONS  
DANS LES EAUX DE PLUIE

Les pesticides sont utilisés de façon intensive en agriculture. La France constitue le plus important marché européen de pesticides avec 31 % du volume des ventes et le plus important utilisateur avec en moyenne 4,4 kg/ha (soit environ 100 000 tonnes/an).

De nombreuses études ont porté sur la présence de composés phytosanitaires dans le milieu aquatique (rivières, eaux souterraines,...) et se sont peu à peu orientées vers les eaux pluviales. Des concentrations non négligeables ayant été constatées dans différentes régions de France, l'intérêt se reporte maintenant vers les mesures dans l'air ambiant afin d'expliquer les niveaux des concentrations observées dans les eaux de pluie. Dans le cadre de son action au sein du

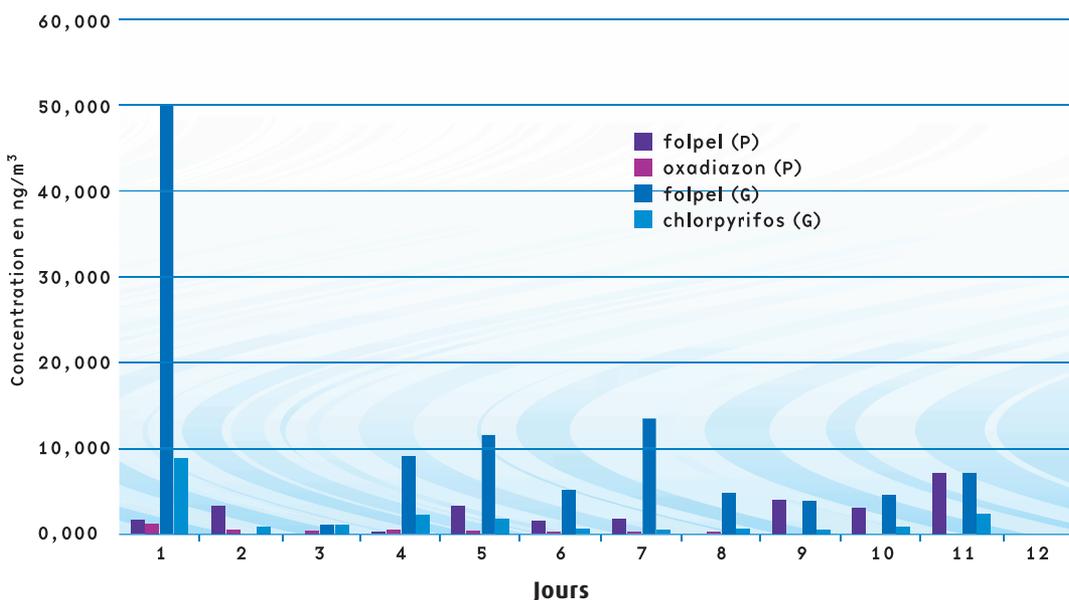
Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, l'INERIS a proposé de valider une méthodologie de mesure des pesticides dans l'air ambiant s'appuyant sur les données d'une revue bibliographique reprenant l'état de l'art en matière de techniques de prélèvement. D'une manière générale, il ressort que :

- le prélèvement d'air se fait le plus souvent à l'aide d'un préleveur grand volume à des débits assez élevés (jusqu'à 60 m<sup>3</sup>/h) ;
- la phase particulaire du produit phytosanitaire prélevé est retenue par un filtre en fibre de verre ou de quartz ;
- la phase gazeuse est piégée par une mousse de polyuréthane ou une résine (XAD-2, Tenax).

Le prélèvement peut toutefois se faire à des débits plus faibles (de quelques l/min à quelques l/h).

Sur cette base, l'INERIS a proposé de valider une méthodologie qui utilise des préleveurs (voir photos ci-contre) actuel-

Exemple de résultats de mesures sur le terrain



# 4,4 KG

## DE PESTICIDES UTILISÉS PAR HECTARE EN MOYENNE, EN FRANCE

lement en service dans les réseaux (DIGITEL DA80, PARTISOL), demandant peu de modifications, et communs aux mesures des HAP, avec un filtre en quartz et une mousse polyuréthane.

Une première phase de validation a consisté à réaliser des campagnes de mesure sur sites, à différentes époques de l'année, au cours de périodes de traitement mais aussi de pré et post-traitement, au voisinage de différents types de cultures et à des distances variables des sites traités (milieu proche, milieu rural et milieu urbain). Les données recueillies varient de quelques dixièmes de  $\text{ng}/\text{m}^3$  à une centaine de  $\text{ng}/\text{m}^3$ . Elles permettent de refléter les différents niveaux de concentration des composés recherchés en fonction des caractéristiques de chaque campagne, ainsi que leur répartition entre les phases particulaire et gazeuse (voir figure p. 38). Ce jeu de données constitue la base de travaux actuels qui ont pour finalité de

préciser la fiabilité de la méthodologie proposée pour des composés phytosanitaires aux caractéristiques physico-chimiques très variables (notamment en terme de volatilité).

En effet, les phénomènes de «blow-on», adsorption de substances gazeuses sur le filtre lui-même ou sur des particules se déposant sur le filtre, et de perte de substances du système de piégeage du gaz, entraînent une surestimation de la fraction particulaire. D'autre part, la transmission de petites particules à travers le filtre et la désorption de composés sur le filtre (blow-off) qui faussent la fraction gazeuse, sont des artefacts de prélèvement reconnus. Enfin, il est indispensable de vérifier l'efficacité des mousses pour le prélèvement de quantités variables de phytosanitaires. Pour ce faire, des essais en laboratoire sont menés afin de déterminer les limites d'utilisation de la méthodologie proposée. ●



**Appareil de prélèvement  
«haut débit».**



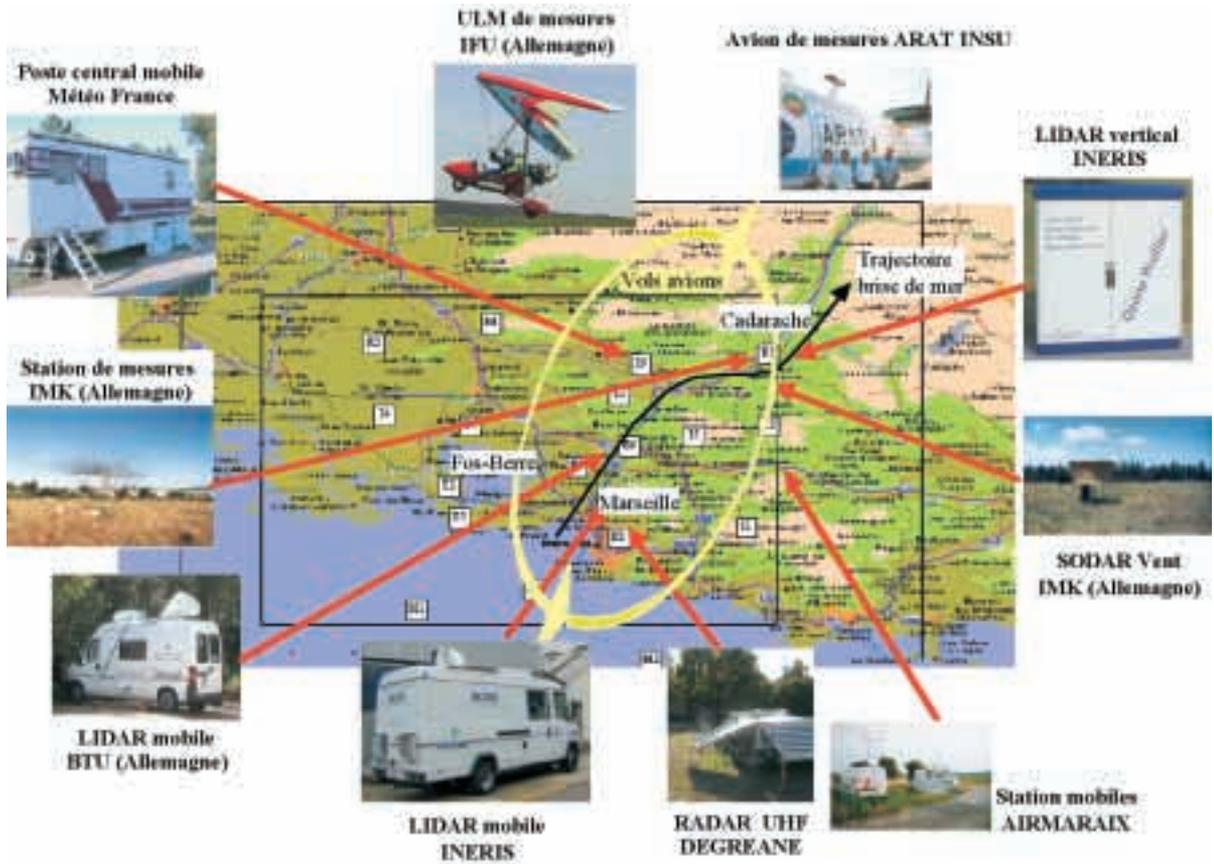
**Appareil de prélèvement  
«bas débit».**

**L'INERIS A PROPOSÉ  
DE VALIDER UNE MÉTHODE  
UTILISANT DES PRÉ-  
LEVEURS EN SERVICE  
DANS LES RÉSEAUX ET  
DEMANDANT PEU  
DE MODIFICATIONS**



# La campagne de mesures «Escompte 2001»

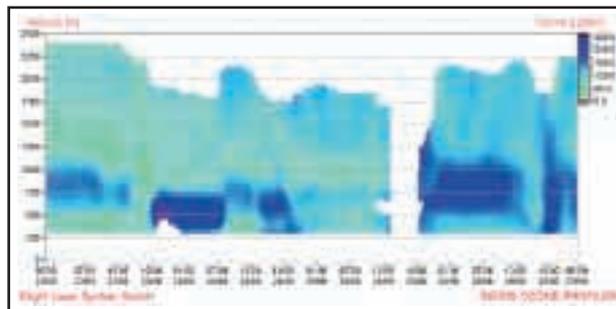
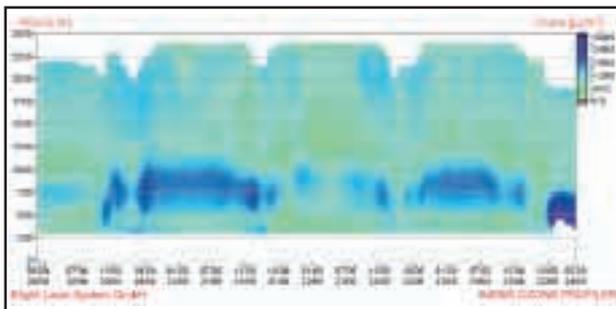
Émeric FRÉJAFON



### Exemple d'instruments de mesure présents lors de la campagne ESCOMPTE.

Une très large campagne de mesure s'est déroulée durant l'été 2001 dans la zone Marseille-Fos-Berre. Ce programme ESCOMPTE (Expérience sur Site pour Contraindre les Modèles de Pollution atmosphérique et de Transport d'Émissions) s'inscrit dans un effort général de recherche visant à disposer de modèles de chimie-transport permettant de mieux caractériser le phénomène de pollution par l'ozone en effectuant une description fine des relations entre les émissions polluantes, les conditions météorologiques, et les niveaux de pollution résultants, en zones urbaine et rurale. Ces modèles sont des outils indispensa-

bles pour évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions polluantes et pour procéder à des prévisions en vue de satisfaire aux objectifs de qualité de l'air. Afin de les paramétrer, de les optimiser puis de les valider, il est fondamental de construire une large base de données qui soit à même d'englober l'ensemble de ces besoins. Pour ce faire, de nombreuses équipes ont participé au programme en instrumentant très finement plusieurs sites répartis sur une zone de 10 000 km<sup>2</sup> (100 x 100 km). Près de 200 scientifiques ont déployé un dispositif expérimental colossal (5 LIDAR, 10 Radar/SODAR, 6 avions



Profils verticaux d’ozone du 20 au 26 juin 2001, obtenus par le Profiler O<sub>3</sub> INERIS installé à Cadarache, zone rurale localisée dans le panache de Marseille, en situation de brise de mer.

# 200

**PRÈS DE 200 CHERCHEURS FRANÇAIS ET ÉTRANGERS ONT PARTICIPÉ À LA CAMPAGNE DE MESURE. LES MOYENS UTILISÉS COMPREENAIENT 5 LIDAR, 10 RADAR/SODAR, 6 AVIONS ÉQUIPÉS D’ANALYSEURS DE GAZ ET DE PARTICULES, 2 BATEAUX ÉQUIPÉS DE STATIONS DE MESURE MULTIPOLLUANTS, 10 LABORATOIRES MOBILES, 50 STATIONS AU SOL, DES RADIO-SONDAGES, DES BALLONS CAPTIFS**

équipés d’analyseurs de gaz et de particules, 2 bateaux équipés de stations de mesure multipolluants, 10 laboratoires mobiles, 50 stations au sol, des radio-sondages, des ballons captifs...).

## >Des intercomparaisons pour évaluer la cohérence du mesurage

Cette très large diversité des moyens utilisés, ainsi que la nécessité d’accéder à une base de données qui soit la plus précise possible, ont imposé la mise en place d’un contrôle qualité ainsi que d’un protocole d’évaluation des diverses techniques de mesurage mises en jeu. Nous avons ainsi évalué la cohérence du mesurage de l’ozone en effectuant des intercomparaisons, d’une part, entre les stations ponctuelles et les moyens mobiles, et, d’autre part, entre les mesures d’ozone obtenues par les LIDAR, les avions et les radio-sondages.

Les résultats ont montré que l’objectif d’un écart maximum de 15 % admis par

●●● suite page 42



les directives européennes était atteint. L'ensemble des mesures ayant été intégré à la base de données, les premières analyses ont permis de tirer quelques enseignements. La figure p. 41 montre la dynamique du profil vertical de la concentration en ozone, depuis le sol jusqu'à 2 500 m d'altitude. Elle a permis de documenter la stratification atmosphérique sur la région d'étude, support de compréhension de l'influence des effets de brise, de leur pénétration à l'intérieur des terres et de leur dynamique. Une étude spécifique s'engage sur la description de la couche limite atmosphérique et de ses mélanges internes, visant à comprendre puis à modéliser l'impact régional de l'îlot marseillais sur la qualité de l'air. ●

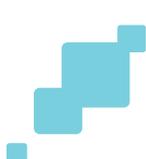
## Publications

■ B. Cros, P. Durand, P. Perros, F. Saïd, V-H. Peuch, E. Fréjafon, C. Kottmeier, J.L. Ponche, D. Robin, and G. Toupance, «ESCOMPTE program: an overview», *Accepted in Atmospheric Research*.

■ Fréjafon E., Allet C., Ancellet G., Durand P., Gizard E., Junkermann W., Perros P. and Saïd F., «Quality control of altitude ozone measurements and database optimization during the ESCOMPTE campaign», *European Geophysical Society 2002*.

■ B. Cros, P. Durand, Ancellet G., B. Calpini, E. Fréjafon, C. Jambert, D. Serça, B. Sol, H. Wortham and M. Zephoris, «ESCOMPTE experiment, some preliminary results about the IOP 2», *European Geophysical Society 2002*.

■ Cros, Durand, Peuch, Bénéch, Cachier, Calpini, Fréjafon, Junkermann, Kottmeier, Laverdet, Perros, Robin, Saïd, Serça, Van Dingenen, Wortham and Zephoris, «The ESCOMPTE experiment», *American Meteorological Society, May 2002, USA*



# Modélisation des particules

Bertrand BESSAGNET

Les particules proviennent de deux sources : les activités humaines (industries, trafic routier, etc.) et les réactions complexes entre polluants atmosphériques. Elles sont caractérisées par leur diamètre, de quelques nanomètres à une dizaine de microns, et par leur composition qui peut être très variable selon leur origine.

LES PARTICULES SONT  
CARACTÉRISÉES PAR  
LEUR DIAMÈTRE ET  
LEUR COMPOSITION

Les particules sont porteuses d'espèces organiques et inorganiques parfois toxiques ou mutagènes. Elles sont au cœur de processus physiques et chimiques des plus complexes impliquant des polluants gazeux. Le dioxyde de soufre, par exemple, s'oxyde et forme de l'acide sulfurique. Cet acide, à basse tension de vapeur saturante, se condense rapidement sur les particules existantes, ou forme de nouvelles particules par nucléation\*.

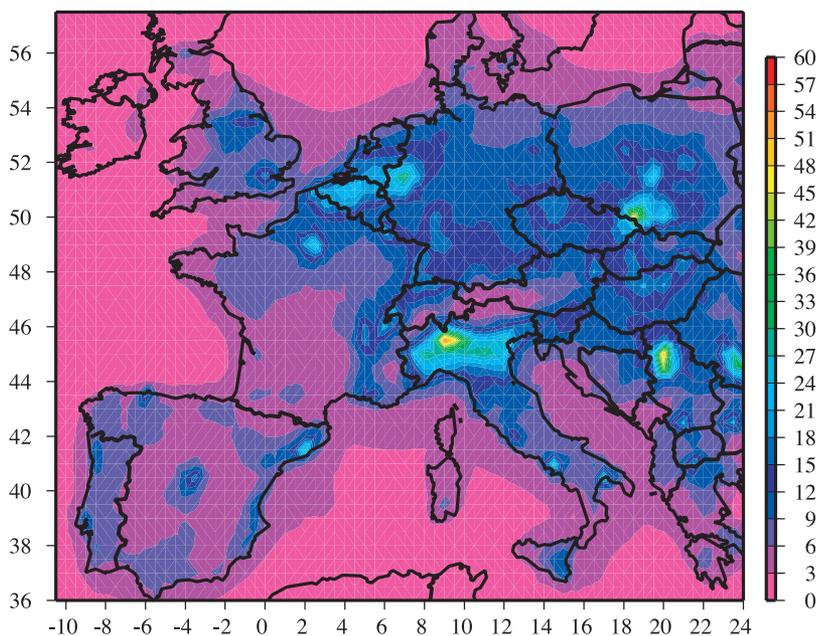
La composition des particules en un point donné dépend largement des émissions locales et de la charge en particules dans les masses d'air voisines. Les paramètres météorologiques (vents, température, hygrométrie) sont les principaux facteurs régissant l'évolution des particules.

### > Simulation de la pollution particulaire en Europe

La mise en équation de l'ensemble des processus physico-chimiques a permis d'élaborer un modèle simulant la pollution particulaire sur une partie de l'Europe pendant un an. La figure ci-dessous présente les résultats de cette simulation pour une concentration moyenne de particules inférieures à 10 pour l'année 1999 (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  d'air).

Ces premiers résultats montrent nettement les principales zones chargées en particules. Outre, les grandes métropoles, l'Italie du Nord, les pays de l'Est sont soumis à des concentrations importantes, essentiellement dues à des vents généralement faibles associés à de fortes émissions de polluants. Le Nord de la France, les Pays-Bas et la Belgique sont aussi exposés à un phénomène similaire. Les fortes émissions d'ammoniac (élevage intensif) associées à une importante formation d'acide nitrique dans l'atmosphère en sont les principales causes. ●

\*Nucléation : formation de microparticules inférieures à 10 nm par agrégation de molécules en phase gazeuse.



Moyenne des concentrations en particules pour 1999 (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

LES PRINCIPALES ZONES CHARGÉES EN PARTICULES SE RETROUVENT DANS LES GRANDES MÉTROPOLES ET DANS LES RÉGIONS SOUMISES À DE FORTES ÉMISSIONS D'AMMONIAC

# Études économiques

La lutte contre les divers types de pollutions s'appuie sur un certain nombre d'instruments réglementaires, fiscaux, économiques, engagements volontaires....dont l'objectif est de modifier le comportement des acteurs socio-économiques dans un sens favorable à la protection de l'environnement.

Parmi ces instruments, ceux qui comportent des mesures économiques font l'objet d'une attention particulière car ils présentent – au moins théoriquement – de nombreux avantages. L'INERIS s'est intéressé dans ce domaine aux expériences connues d'application d'instruments économiques pour la réduction de la pollution transfrontière afin d'en apprécier les causes de succès ou d'échec.

## Étude de mesures économiques pour réduire les émissions de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV et NH<sub>3</sub>

*Sébastien SOLEILLE*

La directive relative aux plafonds d'émission nationaux\* vise à limiter les émissions des polluants acidifiants et eutrophisants et des précurseurs de l'ozone. Elle fixe à cet effet des plafonds d'émission nationaux, qui devront être respectés en 2010, pour quatre polluants atmosphériques : les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les composés organiques volatils non méthaniques (COV) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>).

**DE NOMBREUSES  
MESURES ONT DÉJÀ ÉTÉ  
PRISES DANS LE DOMAINE  
DES TRANSPORTS**

Dans le cadre de la préparation à la mise en œuvre de cette directive, l'INERIS a été chargé d'étudier des mesures économiques et structurelles (taxes, subventions, quotas d'émissions négociables, information, sensibilisation, écolabels, etc.) qui, en complétant les mesures réglementaires traditionnelles, pourraient contribuer au respect des plafonds fixés en France.

Les instruments économiques visent à inciter financièrement les agents économiques à adopter un comportement moins polluant. Ils présentent, au moins sur le plan théorique, de grands avantages : réduction des coûts globaux de dépollution, incitation à l'innovation, etc. Cependant la réglementation a d'autres qualités : simplicité et rapidité de mise en œuvre, d'adaptabilité, etc. Un instrument économique novateur et mal maîtrisé risque, s'il n'est pas mis en place dans de bonnes conditions, d'occasionner des coûts élevés d'application, de contrôle et de gestion qui réduiraient son efficacité théorique.

L'analyse d'expériences françaises et étrangères d'application d'instruments économiques à la réduction de la pollution a permis d'imaginer des outils potentiellement applicables en France et d'étudier leurs avantages, leurs limites, leurs coûts et les réductions d'émissions qu'ils sont susceptibles de provoquer.

Dans le domaine de l'industrie et de la

Programme	Pays	Type d'instrument	Polluants	Secteur	Début
Taxe suédoise sur les oxydes d'azote	Suède	Taxe avec redistribution	NOx	Industrie	1992
Sulfur Dioxide Allowance Trading	États-Unis	Quotas d'émissions négociables	SO <sub>2</sub>	Industrie	1995
Taxe au kilomètre suisse pour les poids lourds	Suisse	Taxe au kilomètre	NOx	Poids lourds routiers	2001
Programme Carl Moyer (incitation à l'achat de véhicules lourds propres)	États-Unis	Aide financière	CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NOx, COV, particules...	Transport routier et non routier	1999

### Quelques exemples intéressants d'applications d'instruments économiques à la lutte contre la pollution atmosphérique

production d'énergie, certains des systèmes de permis d'émissions négociables appliqués aux États-Unis depuis le début des années 1990 semblent avoir été efficaces. Cependant, de tels programmes sont longs, délicats et parfois coûteux à mettre en place. En outre, les interactions éventuelles entre de tels systèmes et le cadre juridique et réglementaire français doivent être clarifiées. Dans le domaine des transports, de nombreuses mesures ont déjà été prises (notamment en ce qui concerne les émissions unitaires des véhicules). Pour aller

au-delà des efforts déjà prévus, il est nécessaire d'envisager conjointement de nombreuses mesures de divers ordres : incitations à l'achat de véhicules plus propres, systèmes de taxation au kilomètre, encouragement du télétravail, etc. Le coût élevé de ces mesures rend nécessaire leur étude dans un cadre élargi (incluant notamment la lutte contre le changement climatique), afin de maximiser l'ensemble des bénéfices escomptés. ●

\*Directive 2001/81/CE du 23 octobre 2001, dite directive NEC (National Emission Ceilings)

#### EN 2010

À partir de cette date des plafonds doivent être respectés pour quatre polluants atmosphériques : les oxydes d'azote (NOx), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les composés organiques volatils non méthaniques (COV) et l'ammoniac (NH<sub>3</sub>).

## L'INERIS ÉTUDIE LES MESURES ÉCONOMIQUES ET STRUCTURELLES QUI POURRAIENT CONTRIBUER AU RESPECT DES PLAFONDS D'ÉMISSION

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

(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

## **ALAIN DESROCHES**

Président de la Commission Scientifique  
Risques Accidentels  
Expert en Sûreté de Fonctionnement  
Chargé de Mission Assurance Produit  
et Sécurité  
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)

## **PATRICE BAILLY**

Professeur des Universités  
Directeur des Études  
Laboratoire Énergétique,  
Explosions, Structure  
ENSI Bourges

## **JEAN-PIERRE BIGOT**

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

## **XAVIER CONTE**

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

## **LIEUTENANT-COLONEL GARIOUD**

Département Études et Recherche  
INESC  
Institut National d'Étude de la Sécurité Civile

## **ANDREW RICHARD HALE**

Safety Science Group  
Université de Delft (NL)

## **JEAN-MARC JAUBERT**

Directeur Sécurité Industrielle  
ATOFINA

## **DIDIER LACROIX**

Directeur de la Recherche  
Centre d'Étude des Tunnels

## **JEAN-PIERRE LANGUY**

Directeur du Département  
« Sécurité, Environnement, Sûreté »  
TECHNIP

## **ANDRÉ LAURENT**

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

## **ANNE LEPRINCE**

Expert Risques Industriels  
GAZ DE FRANCE

## **LAURENT MAGNE**

Chef du Département  
« Management des Risques Industriels »

## **SIMON SHIELD**

Principal Consultant  
Shell Global Solutions (UK)

## **JOHN ROBERT TAYLOR**

Chief Consultant  
Risk and Reliability  
RAMBOLL (DK)

## **JACQUES VALANCOGNE**

Responsable de l'Unité  
« Maîtrise des Risques Système »  
RATP

# RISQUES ACCIDENTELS

## 48 INTRODUCTION

### 50 DANGERS LIÉS AUX PRODUITS ET DANGERS LIÉS AUX PROCÉDÉS

- 51 Classement des produits : les produits comburants (Marie-Astrid KORDEK)
- 52 Les Ammonitrates et autres engrais composés à base de Nitrate d'Ammonium (Marie-Astrid KORDEK)
- 53 Rôle de l'INERIS dans l'application de deux directives européennes relatives aux atmosphères explosibles (Jacques CHAINEAUX / Claire PETITFRÈRE)

### 54 ÉVALUATION DES CONSÉQUENCES D'ACCIDENTS

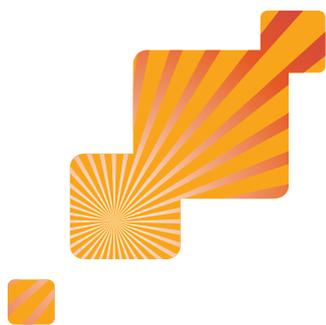
- 55 Analyse des conditions de dispersion d'un gaz liquéfié en champ proche en présence d'obstacles (Stéphane DUPLANTIER)
- 56 Le projet européen FLIE : Flashing Liquids in Industrial Environment (Stéphane DUPLANTIER)
- 58 Comportement d'une structure béton soumise à une onde de pression interne (Guy MAVROTHALASSITIS / Frédéric MERCIER)

### 59 MAÎTRISE DES RISQUES

- 60 Éléments Importants Pour la Sécurité (EIPS) (Sébastien BOUCHET / Dominique CHARPENTIER)
- 61 Maîtrise Intégrée des Risques d'Accidents Majeurs : MIRIAM® / ATOS® (Franck PRATS / Emmanuel PLOT / Jean-Christophe LECOZE)

### 63 VERS UNE INTÉGRATION DE L'ENSEMBLE DES DISCIPLINES DANS L'ÉVALUATION DES RISQUES

- 65 Le projet européen ASSURANCE : Assessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments (David HOURTOLOU)
- 66 Le projet européen ARAMIS : Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of Seveso II directive (David HOURTOLOU / Olivier SALVI)
- 67 Le projet européen UPTUN : Cost-effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels (Emmanuel RUFFIN)



# Une activité marquée par le développement de la recherche

**D**ans le domaine des risques accidentels, l'INERIS a vocation à couvrir l'ensemble de la chaîne des risques : identification des dangers, analyse des risques (essais et modélisation), prévention, intervention en situation de crise, retour d'expérience. Par ailleurs, à côté de l'étude des phénomènes dangereux, l'Institut s'est attaché de longue date à évaluer la conformité des matériels, produits, systèmes et substances à des règlements, des normes, des procédures et cahiers des charges.

## >Montée en puissance de l'activité de recherche depuis deux ans

Les activités dans ce domaine se partagent traditionnellement entre l'appui technique aux pouvoirs publics centraux et locaux et les prestations aux entreprises et collectivités locales. Néanmoins, ces deux dernières années ont vu le développement d'une activité de recherche financée par le ministère de la Recherche avec une contribution croissante d'un financement européen lié aux succès des propositions que l'INERIS et ses partenaires européens ont fait dans le cadre du 5<sup>e</sup> PCRD.

De plus, des efforts importants ont été entrepris pour obtenir des cofinancements de la part de l'ADEME, du ministère chargé des Transports et des fonds de recherche technologique. Ainsi, grâce à ces cofinancements, entre 1999 et 2002, l'activité de recherche en Risques accidentels a été multipliée par 4.

**L'INERIS COUVRE L'ENSEMBLE DES RISQUES ACCIDENTELS, DE L'IDENTIFICATION DES DANGERS AU RETOUR D'EXPÉRIENCE. ENTRE 1999 ET 2002, L'ACTIVITÉ DE RECHERCHE EN RISQUES ACCIDENTELS A ÉTÉ MULTIPLIÉE PAR QUATRE**



**Inflammation  
d'une fuite  
d'hydrogène.**

Cette activité concerne :

- l'échange et la diffusion de connaissances sur le facteur humain dans la sécurité des procédés en particulier dans les PME;
- la compréhension et la modélisation des phénomènes provoqués par l'impact d'un jet de gaz liquéfié sur un obstacle;
- la préparation de la réglementation en termes de sécurité des piles à combustible;

- le développement de modèles d'explosions dues aux hydrocarbures;
- le développement de mesures innovantes pour maîtriser le risque d'incendie dans les tunnels;
- la mise au point d'une technique de mesure expérimentale du risque d'inflammation de mélanges air-poussières ou air-gaz par frottement mécanique;
- l'évaluation des propriétés des produits chimiques condensés à risque d'explosion et incendie.

### >Le partenariat avec l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges marque l'ouverture vers l'Université

À ces travaux de recherche s'ajoute la coordination de deux programmes européens, ACUTEX (établissement des seuils d'exposition aiguë des populations en cas d'émission accidentelle de substances chimiques) et ARAMIS (mise au point d'une méthode d'évaluation qui conjugue les approches déterministes et probabilistes utilisées dans la prévention des accidents majeurs).

Parallèlement, la création d'un centre de recherche CNRS/INERIS sous l'égide de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges a concrétisé la volonté de voir l'INERIS accroître ses partenariats et de s'ouvrir vers le secteur universitaire. Cette nouvelle entité a pour objectif de développer la recherche sur le comportement de structures sous l'effet des explosions. ●



**Essai d'explosion d'un mélange air-méthane dans un récipient d'un mètre cube équipé d'un disque de rupture.**

# Dangers liés aux produits et dangers liés aux procédés

**T**rois directives européennes sous-tendent l'activité de l'INERIS dans le domaine des dangers des produits et des procédés. La directive SEVESO II 96/82/CE concerne la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs mettant en jeu des substances dangereuses. Pour pouvoir atteindre cette maîtrise, il est important de connaître les dangers liés aux produits au cours de chacune des étapes de la vie de ce produit (fabrication, transport, stockage...), qu'il s'agisse de matières premières, de produits finis ou d'intermédiaires de fabrication, et ceci quel que soit le procédé dangereux mis en œuvre.

L'un des objectifs de la directive SEVESO II est la maîtrise des risques à la source. La réduction de ces risques ne peut être effective que si les dangers ont été correctement identifiés. Aussi, dès 2001, l'INERIS a mis en place une action de fond pour évaluer les propriétés des produits chimiques condensés – c'est-à-dire solides ou liquides – présentant des risques d'explosion ou d'incendie plus ou moins marqués.

En parallèle, l'INERIS s'est équipé de moyens expérimentaux pour classer les produits présentant des propriétés dangereuses selon les différentes réglementations en vigueur (TMD, directives européennes sur l'étiquetage, classification et emballage des substances et préparations dangereuses...). À l'aide de ces moyens expérimentaux et de l'expérience acquise dans ce domaine, l'évaluation des propriétés dangereuses d'une matière première, d'un produit fini ou d'un intermédiaire réactionnel peut être réalisée.

La directive 1999/92/CE concerne l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs exposés aux risques des atmosphères explosives (ATEX). Comme pour la directive SEVESO II, l'application de la directive ATEX nécessite de s'intéresser à la fois aux produits inflamma-

bles mis en œuvre, qu'ils soient gazeux, liquides ou solides pulvérulents, ainsi qu'aux procédés dans lesquels sont mis en œuvre ces produits.

Pour déterminer les caractéristiques d'inflammabilité et d'explosivité des produits, l'INERIS développe des méthodes de caractérisation précises et fiables et participe à l'élaboration des normes de détermination de ces caractéristiques, sous l'égide du CEN.

La directive ATEX impose aux exploitants de mettre en place des mesures techniques et organisationnelles de protection contre les effets des explosions. Dans ce domaine, l'INERIS assure la formation des personnels d'exploitation. L'Institut est également sollicité par les exploitants pour définir les mesures techniques les mieux adaptées.

Enfin, la directive 98/24/CE concerne l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs exposés aux risques des agents chimiques. Cette problématique est complémentaire des attentes de la directive SEVESO II en matière de caractérisation des risques liés aux procédés dangereux. Dans ce domaine, l'INERIS s'est équipé de moyens expérimentaux pour caractériser les risques d'emballage de réaction – au moyen de mesures calorimétriques – et propose de mettre en œuvre des méthodes d'évaluation des risques qui intègrent l'effet d'échelle entre la dimension des calorimètres et celles des équipements industriels. Sur ce sujet, l'INERIS travaille en partenariat avec d'autres organismes européens. ●

## 3 DIRECTIVES EUROPÉENNES SOUS-TENDENT L'ACTIVITÉ DE L'INERIS DANS LE DOMAINE DES DANGERS DES PRODUITS ET DES PROCÉDÉS

# Classement des produits

## Les produits comburants

Marie-Astrid KORDEK

Dans le cadre d'une recherche à long terme relative à l'évaluation des propriétés des produits chimiques condensés à risque d'explosion ou d'incendie, une étude sur l'évaluation des propriétés comburantes des produits chimiques solides ou liquides a été effectuée.

Les produits comburants sont des substances ou préparations chimiques largement utilisées : engrais, herbicides, insecticides, agents blanchissants, agents désinfectants, compositions pyrotechniques..., le plus souvent en tant que fournisseurs d'oxygène actif.

On peut ainsi compter parmi les comburants les plus courants : l'oxygène et tous les composés contenant de l'oxygène actif, mais aussi tout composé pouvant libérer facilement des halogènes ; certains acides oxygénés et sels d'acides oxygénés - nitrates, perchlorates, chlorates et parfois sulfates, certains oxydes métalliques, les peroxydes inorganiques, les permanganates. Les comburants solides les plus utilisés sont les nitrates, les chlorates et les perchlorates.

Les produits comburants sont généralement stables à température et pression ordinaires, mais ils présentent des dangers de plusieurs natures : réactions pouvant être violentes lorsqu'ils sont mis en contact avec des matières incompatibles, notamment des combustibles, inflammation spontanée de type hypergolique, toxicité des produits de décomposition, etc. Chaque comburant pouvant avoir un comportement différent, la connaissance de ses propriétés permet de définir les précautions à prendre ainsi que les méthodes d'intervention spécifiques. Afin de combler le manque d'information sur les produits incompatibles avec les produits comburants, il a été procédé à une analyse bibliographique, pour distinguer les grandes familles de produits présentant soit un risque d'incendie avec simple dégagement de fumées toxiques, soit un risque d'incendie avec dégagement de fumées toxiques suivi d'une explosion.

Puis a été procédé à la comparaison des épreuves relatives à l'évaluation de la propriété comburante d'un produit, suivant deux réglementations : classification, étiquetage et emballage des substances et préparations dangereuses, d'une part, et transport des matières dangereuses, d'autre part.

L'ensemble de ces épreuves repose, selon l'état physique - solide ou liquide - de la matière, sur la mesure de la possibilité d'inflammation avec une source thermique calibrée et sur la propagation de la combustion d'un mélange de la matière avec un combustible de référence, une certaine cellulose en l'occurrence. Toutes ces épreuves comportent un essai d'orientation pour écarter les produits à l'évidence trop faiblement comburants, puis des essais sur la cellulose en mélange avec des comburants plus ou moins puissants pour mesurer alors

le degré de réactivité de la matière à éprouver. Ainsi ont pu être identifiés les principaux paramètres qui influencent les épreuves et donc le classement :

- humidité ambiante ;
- stabilité de la source d'inflammation (filament chauffant) ;
- granulométrie et teneur en eau de la cellulose ;
- absence d'un critère de qualité se traduisant par la dispersion des résultats et la mauvaise reproductibilité des épreuves ;
- manque de précision de la mesure du temps de combustion lié à l'appréciation seulement visuelle des phénomènes (début et arrêt de la combustion) ;
- granulométrie et homogénéité de la matière à éprouver.

Par ailleurs, se posent le problème du manque d'harmonisation des épreuves quant aux mélanges de référence utilisés et celui du manque de flexibilité de ces méthodes : on n'utilise qu'un seul type de combustible pour mesurer la violence de combustion et on ne peut tirer aucune information sur les incompatibilités du produit avec divers autres combustibles et sur les éventuelles propriétés explosives de tels mélanges accidentels.

Toute cette analyse montre la marge nécessaire d'interprétation pour définir de manière appropriée le classement d'un produit, au regard d'une propriété particulièrement importante dans l'évaluation des risques d'incendie et d'explosion. Ce classement doit également prendre en compte le retour d'expérience à la suite d'incidents et d'accidents. ●

LA MÉTHODE DE  
CLASSIFICATION DES  
PRODUITS ÉVOLUE EN  
FONCTION DES NOUVELLES  
TECHNOLOGIES  
D'ANALYSES ET DU RETOUR  
D'EXPÉRIENCE



# Les ammonitrates et autres engrais composés à base de nitrate d'ammonium

Marie-Astrid KORDEK

L'incident survenu à TOULOUSE le 21 septembre 2001 a rappelé le danger d'explosion en masse du nitrate d'ammonium et des engrais à base de nitrate d'ammonium. L'ensemble des recherches menées depuis des décennies ne donne pas actuellement d'explication des phénomènes qui ont conduit à l'explosion de Toulouse.

Pour essayer de répondre aux multiples interrogations suscitées par cet accident sur les dangers du nitrate d'ammonium et des engrais à base de nitrate d'ammonium, une recherche globale a été menée afin d'évaluer la stabilité de ces produits, notamment en cas de contamination.

En effet, leur stabilité a fait l'objet de nombreuses recherches particulières en ce qui concerne l'influence des contaminants caractéristiques. Mais aucun travail n'a été mené à ce jour en vue de détecter de manière systématique des incompatibilités conduisant à une réduction importante de la stabilité, avec ou sans la formation de composés dangereux. Les incompatibilités éventuelles avec les produits chlorés ont fait l'objet d'investigations plus spécifiques.

L'effet catalytique de l'ion chlorure Cl<sup>-</sup> sur la décomposition thermique du nitrate d'ammonium à l'état fondu est connu. Il produit un abaissement important de la température de début de décomposition. Mais l'influence des produits chlorés, conduisant à la formation de produits instables et réactifs, est moins connue. Après une analyse de la bibliographie, des essais calorimétriques ont été réalisés à l'aide de la technique «Differential Screening Calorimetry» (DSC). Ainsi a été mise en évidence la forte réactivité de mélanges 50/50 en masse de nitrate d'ammonium sous des formes diverses et de certains produits chlorés, tels le dichloroisocyanurate de sodium et l'acide trichloroisocyanurique.

Ces produits entrent donc dans la longue liste des produits incompatibles avec le nitrate d'ammonium, même pour des teneurs très faibles : composés halogénés, chromés, combustibles, matières organiques, métaux divisés.

Des dispositions particulières de sécurité doivent être prises lorsqu'il y a risque de contamination ou de mélange incompatible avec des produits à base de nitrate d'ammonium, mais également quand l'évaluation des propriétés dangereuses de ces produits n'est pas possible simplement, par exemple pour des produits hors tolérances de fabrication : en conséquence il a été proposé la création d'une quatrième rubrique relative au nitrate d'ammonium dans la directive SEVESO II, « produits dits "hors spécification" »,

permettant de couvrir ce risque. Cette proposition de la France a été acceptée par la Commission européenne.

Les travaux préparatoires ont également permis d'étudier de manière plus large le risque d'incendie présenté par les produits à base de nitrate d'ammonium.

Le second risque majeur, en dehors de l'explosion, avec les engrais à base de nitrate d'ammonium est la décomposition thermique lors d'un incendie. Cet incendie peut être ou non suivi d'une explosion.

Le risque d'incendie est fonction de la composition de l'engrais contenant du nitrate d'ammonium :

- décomposition thermique avec production de gaz toxiques qui s'arrête dès que la source calorifique est supprimée, pour les engrais simples azotés à haute teneur en nitrate d'ammonium ;

- décomposition auto-entretenu avec production de gaz toxiques qui se poursuit même après arrêt de la source calorifique, pour les engrais complexes ou composés.

En 1988, des essais réalisés par le CERCHAR (devenu l'INERIS en 1990) avaient permis de comparer les vitesses de décomposition selon l'axe de propagation (horizontal ou vertical) et selon la technique de mesure utilisée : l'essai « officiel » (essai en auge) pour ces engrais complexes donne des vitesses maximales de 25cm/h selon l'axe horizontal alors que l'essai en semi-grand du CERCHAR sur 1 tonne de produit a fourni une vitesse jusqu'à 6 fois supérieure.

Durant l'année 2002, trois accidents mettant en cause des engrais composés ou complexes ont été analysés : les produits avaient été classés comme non susceptibles de subir une décomposition auto-entretenu à partir des résultats avec l'épreuve en auge ou à l'aide de diagrammes ternaires d'évaluation du risque d'incendie (proportions de chaque constituant). L'analyse du déroulement de ces accidents a permis de constater que la

LES ÉTUDES MENÉES APRÈS  
L'ACCIDENT DE TOULOUSE  
EN SEPTEMBRE 2001  
ONT CONDUIT À PROPOSER  
UNE NOUVELLE RUBRIQUE  
RELATIVE AU NITRATE  
D'AMMONIUM DANS LA  
DIRECTIVE SEVESO II

UNE RECHERCHE GLOBALE A ÉTÉ  
MENÉE AFIN D'ÉVALUER LA STABILITÉ  
DES AMMONITRATES ET DES ENGRAIS  
À BASE DE NITRATE D'AMMONIUM  
EN CAS DE CONTAMINATION

mesure de vitesse de décomposition obtenue dans l'épreuve en auge ne représente pas le phénomène à grande échelle et que la précision du dosage chimique de chacun des constituants doit être connue pour une utilisation convenable du diagramme ternaire correspondant. Il a donc été alors proposé d'inclure cette famille de produits susceptibles de produire des composés toxiques lors d'un incendie dans la future directive SEVESO II modifiée : cette proposition a également été acceptée.

Concernant les engrais à base de nitrate d'ammonium, les spécificités de l'ancienne rubrique ont été conservées. Il a été par contre proposé de détailler les informations relatives à la description de la matière permettant de baisser la teneur en azote (degré de pureté) afin de prendre en compte l'influence de la teneur en contaminant.

Enfin pour le nitrate d'ammonium technique, destiné à la fabrication d'explosifs et les solutions chaudes de nitrate d'ammonium, une harmonisation des

systemes de classement en vigueur avec la réglementation du transport des matières dangereuses a pu être réalisée. L'élaboration de ces nouvelles rubriques pour le nitrate d'ammonium dans la future directive SEVESO II modifiée permet de couvrir désormais l'ensemble des risques d'explosion et d'incendie liés aux produits à base de nitrate d'ammonium. ●

## Rôle de l'INERIS dans l'application de deux directives européennes relatives aux atmosphères explosibles

Jacques CHAINEAUX / Claire PETITFRÈRE

Les directives européennes ATEX 94/9/CE et 1999/92/CE sont entrées en vigueur en juillet 2003. Elles visent, d'une part, le marquage CE des matériels électriques ou non électriques mis sur le marché et destinés à être installés dans les atmosphères explosibles. Elles concernent, d'autre part, la protection des travailleurs dans les installations industrielles où de telles atmosphères peuvent exister à l'état permanent ou occasionnel.

Les difficultés dans l'application des deux directives sont de plusieurs ordres : champs d'application, aspects méthodologiques, manque de documents de références normatifs pour les matériels non électriques. La contribution de l'INERIS à la résolution de ces difficultés est donc primordiale dans la mesure où l'Institut a pour mission d'apporter un appui à la mise en place de telles réglementations, tant aux pouvoirs publics qu'au secteur industriel.

Cette contribution revêt différents aspects :

● De manière générale, le marquage CE des produits implique aujourd'hui une évaluation technique plus importante que dans le passé où il s'agissait seulement de vérifier la conformité des produits à des normes. L'un des outils de plus en plus utiles dans cette évaluation est l'analyse de risque, qui intègre souvent une étude de sûreté de fonctionnement. Cette démarche est d'ailleurs complémentaire de celle visant à identifier les barrières de sécurité au travers de dispositifs techniques ou opérationnels pour l'application de la directive SEVESO II. L'INERIS a ainsi engagé une démarche visant à la certification volontaire de ces dispositifs.

● L'INERIS est partenaire dans le programme européen MECHEX, qui vise à accroître les connaissances sur les phénomènes d'inflammation des atmosphères explosibles. Cette recherche est particulièrement importante pour les matériels non électriques.

● La connaissance des phénomènes d'inflammation et de développement d'une réaction de décomposition dans les dépôts de poussières combustibles est indispensable pour la qualification d'une atmosphère explosible poussiéreuse. Dans

ce domaine, l'INERIS a développé des méthodes de caractérisation de l'inflammabilité à l'échelle du laboratoire, ainsi que la mise en œuvre de modèles de prévision des température et taille critiques au-dessus desquelles se produit l'inflammation du dépôt.

● Après avoir fait la synthèse de divers référentiels existant sur le thème du classement de zone, l'INERIS a développé une approche expérimentale à petite et moyenne échelles

associée à la modélisation permettant l'extrapolation en vraie grandeur. Ainsi, le code REAGAS mis au point conjointement par l'INERIS et le TNO (Pays-Bas) permet d'appréhender la propagation d'une explosion dans un environnement industriel complexe et fournit par conséquent une aide notable pour le classement de zones.

Ces exemples illustrent la variété des problèmes à résoudre au quotidien dans le domaine de la certification ainsi que dans l'évaluation des risques. ●

DANS UNE ATMOSPHÈRE  
POTENTIELLEMENT  
EXPLOSIVE, L'EMPLOYEUR  
DOIT DÉSORMAIS  
RÉPONDRE À DE NOUVELLES  
OBLIGATIONS

# Évaluation des conséquences d'accidents

La qualification et la quantification des risques auxquels l'exploitation d'une installation industrielle expose son environnement comporte plusieurs étapes. En premier lieu, il est nécessaire de bien connaître les installations, leurs modalités d'exploitation et les produits en cause pour en déduire les scénarios d'accident susceptibles de survenir. Ensuite, le processus d'évaluation des risques implique l'estimation des conséquences des phénomènes dangereux relatifs aux scénarios considérés. Dans ce contexte, l'INERIS réalise des travaux permettant à terme de mieux comprendre et prévoir les conséquences associées aux phénomènes dangereux suivants :

- les rejets accidentels de substances toxiques ou inflammables,
- les incendies,
- les explosions.

Dans tous les cas, la détermination des conséquences des accidents conduit à estimer le plus précisément possible les effets sur les personnes et sur l'environnement, des phénomènes dangereux tels que l'inhalation de produits toxiques, les transferts de chaleur, la propagation d'ondes de surpression ou les

projections de fragments. Dans le cas des incendies et des explosions, il est important de caractériser la résistance des structures pour apporter un éclairage complet sur les conséquences possible de ce type d'accident. Ainsi, il est nécessaire de prévoir la tenue des cloisons pour quantifier au mieux la propagation des incendies en milieu confiné, tout comme il est indispensable d'estimer la résistance de structures comme les réservoirs ou les canalisations, pour évaluer les effets dominos en cas d'accidents majeurs.

Dans ce but, l'INERIS a récemment entrepris en collaboration étroite avec l'ENSIB des travaux sur le comportement des structures soumises à des ondes de pression ou à des flux thermiques. En ce qui concerne les phénomènes dangereux (rejets, incendies, explosions) d'importants résultats ont été obtenus dans l'étude des rejets diphasiques. De tels rejets peuvent survenir dans les installations contenant des produits comme l'ammoniac, le chlore ou encore des GPL. Dans le contexte de la réglementation associée aux installations à risques, l'étude de ces rejets est importante car ils concernent des produits à la fois fréquemment employés et relativement dangereux du fait de leur toxicité ou de leur inflammabilité.

Par contre, les outils de calculs disponibles ne permettent pas de caractériser ces rejets, en particulier s'ils viennent à se produire dans des milieux encombrés d'obstacles, ce qui est le cas le plus fréquent en environnement industriel. Les travaux en cours visent à la production de tels outils. ●

**L'INERIS RÉALISE DES TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX ET DÉVELOPPE DES MODÈLES PERMETTANT DE PRÉVOIR LES CONSÉQUENCES D'ACCIDENTS TELS QU'INCENDIE, EXPLOSION ET REJETS DE SUBSTANCES**

**IL EST IMPORTANT DE CARACTÉRISER LA RÉSISTANCE DES STRUCTURES POUR AVOIR UNE VISION GLOBALE DES CONSÉQUENCES EN CAS D'INCENDIE ET D'EXPLOSION**

# Analyse des conditions de dispersion d'un gaz liquéfié en champ proche en présence d'obstacles

Stéphane DUPLANTIER

Les procédés industriels recourent en grande majorité à des hautes pressions. De ce fait, les fluides utilisés sont susceptibles de se trouver dans un état de surchauffe par rapport aux conditions ambiantes, ce qui est le cas notamment des gaz liquéfiés. Des situations dangereuses peuvent apparaître à la suite d'un rejet accidentel provoqué, soit par un défaut d'équipement, soit par une erreur humaine. L'objectif de cette recherche est de développer des outils permettant d'estimer le terme source pour la dispersion atmosphérique dans le cas d'un rejet impactant de gaz liquéfié.

Ces outils en développement permettront de réaliser une meilleure estimation des quantités émises dans l'atmosphère et, par conséquent, d'estimer plus finement les distances de sécurité associées à ce type de rejet. En effet, les configurations industrielles renforcent l'éventualité d'un rejet impactant. Le confinement partiel (mur) peut être un moyen de réduire les distances de sécurité pour de tels rejets. Toutefois, à l'heure actuelle, il n'existe pas de moyen disponible pour quantifier cette réduction. L'outil permettra d'estimer la quantité de liquide piégée par le ou les obstacles placés sur la trajectoire du jet.

Le développement de ce nouvel outil a commencé par la recherche dans la littérature des modèles existants notamment pour les jets diphasiques. Dans un deuxième temps, la réalisation d'essais à petite échelle a été envisagée. Ces essais seront complétés par des essais à grande échelle dans le cadre du projet européen FLIE.

Le dispositif expérimental qui est opérationnel depuis la fin de l'année 2001 a été utilisé au cours de l'année 2002 pour réaliser des essais de rejets de butane en présence ou en l'absence d'obstacle.

## 1 - Obstacle

Accumulation de glace et de butane :  
2 - sur l'obstacle  
3 - sur les sondes

4 - Produit piégé dans le bac de rétention

5 - Bac de rétention



● En présence d'obstacle, ils ont montré qu'une quantité importante de produit peut être collectée par l'obstacle sous forme de glace et, en quantité moindre, dans la cuvette située au pied de l'obstacle. Il est important de noter que cette phase solide est un mélange d'eau et de butane.

● En l'absence d'obstacle, des mesures de granulométrie (mesures de vitesse et de taille de gouttes) ont été effectuées avec le PDA (Phase Doppler Anemometer). Ces essais ont permis de mettre en évidence, dans un premier temps, l'influence importante de la configuration de l'orifice (à bord mince ou au travers d'une canalisation) sur la géométrie du jet et, dans un deuxième temps, ces essais ont montré le rôle joué très tôt par la gravité

au sein du jet. En effet, une dissymétrie apparaît assez rapidement au sein du jet sur le diamètre moyen des gouttes, ce dernier étant supérieur sous le jet. Cette campagne d'essais se poursuit afin d'étudier notamment l'influence du diamètre de fuite ou de la nature du produit rejeté avant de réaliser des essais à plus grande échelle dans le cadre du projet européen FLIE. ●

## LES OUTILS EN DÉVELOPPEMENT

PERMETTRONT D'ESTIMER

LA QUANTITÉ DE GAZ

LIQUÉFIÉ RETENUE PAR LES

OBSTACLES PLACÉS SUR

LA TRAJECTOIRE DU JET



# Le projet européen FLIE (Flashing Liquids in Industrial Environment)

Stéphane DUPLANTIER

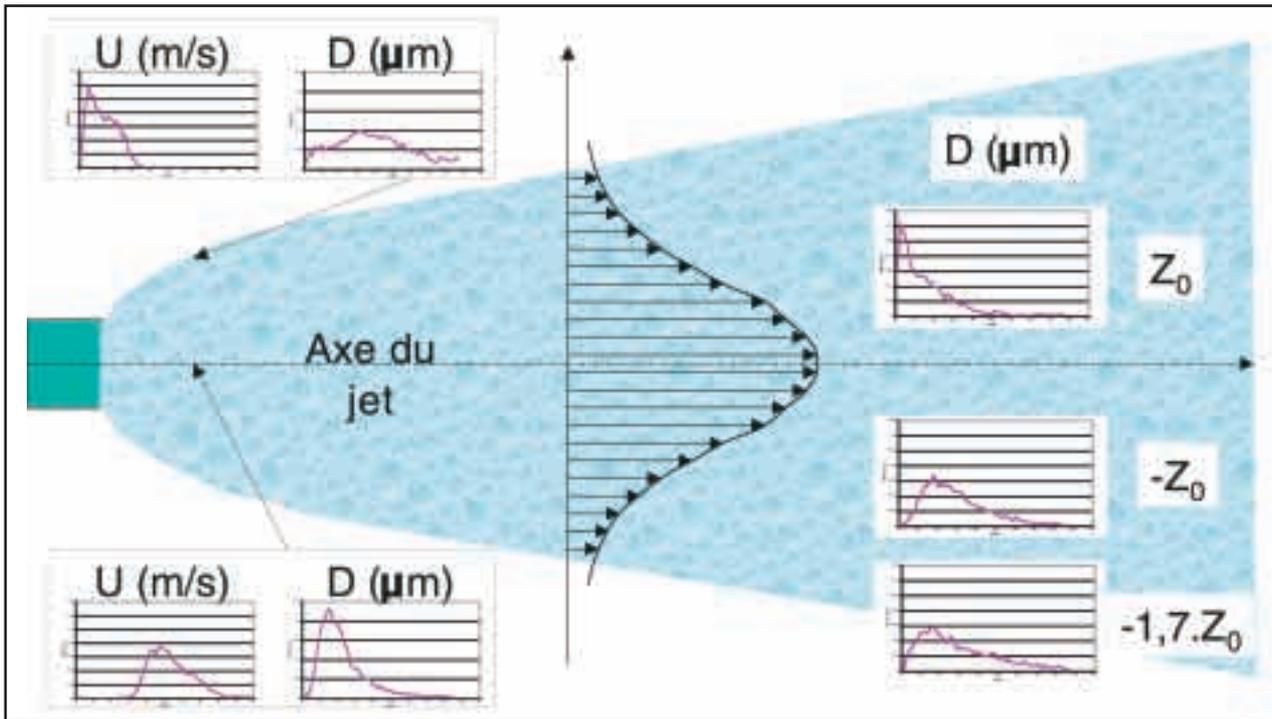
Le projet européen FLIE (Flashing Liquids in Industrial Environment) réunit autour du coordinateur GexCon (Norvège), l'institut Von Karman (Belgique), l'université d'Hertfordshire (Grande Bretagne) et l'INERIS. Ce projet met l'accent, plus particulièrement, sur les fuites de substances inflammables pouvant conduire à la formation d'un nuage combustible de gaz susceptible d'aboutir à une explosion en présence d'une source d'inflammation. Le projet FLIE a pour but d'améliorer la compréhension des phénomènes à la source de l'émission, et s'intéresse plus particulièrement au rejet de gaz liquéfiés inflammables tels que le butane et le propane. La méthode proposée inclut la réalisation de campagnes d'essais et le développement de modèles décrivant la dispersion et l'évaporation des aérosols formés après le flash qui se produit à la brèche. Ces modèles seront systématiquement validés avant d'être utilisés dans des études de sécurité. A cette fin, les essais à grande échelle permettent de vérifier que les résultats obtenus à petite et moyenne échelles sont transposables aux situations en vraie grandeur. Les résultats de ces essais permettent également de constituer une base de données. L'année 2002 a été consacrée à la mise en place du dispositif expérimental qui a permis d'étudier l'influence des différents paramètres identifiés lors de la réalisation des essais à petite échelle. Des essais de rejet de butane à petite échelle ont été réalisés en considérant deux configurations différentes de rejet : une canalisation de 1,65 mm de dia-

quement validés avant d'être utilisés dans des études de sécurité. A cette fin, les essais à grande échelle permettent de vérifier que les résultats obtenus à petite et moyenne échelles sont transposables aux situations en vraie grandeur. Les résultats de ces essais permettent également de constituer une base de données. L'année 2002 a été consacrée à la mise en place du dispositif expérimental qui a permis d'étudier l'influence des différents paramètres identifiés lors de la réalisation des essais à petite échelle. Des essais de rejet de butane à petite échelle ont été réalisés en considérant deux configurations différentes de rejet : une canalisation de 1,65 mm de dia-

L'INERIS ÉTUDIE LA CONFIGURATION DES FUITES DE GAZ LIQUÉFIÉ INFLAMMABLE SUSCEPTIBLES DE PROVOQUER UNE EXPLOSION EN PRÉSENCE D'UNE SOURCE D'INFLAMMATION

Contribution	Buse	Canalisation	Remarques
<b>Condition de stockage</b>			La vitesse est plus faible dans le cas de la buse car tout le produit est en phase liquide au niveau de section de fuite alors que dans le cas de la canalisation, la détente qui débute à l'intérieur de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse de l'écoulement.
<b>Flash ou expansion</b>			Le changement de phase provoque un déplacement isotrope des gouttes. La vitesse de cette expansion est certainement plus faible dans le cas de la canalisation car la détente a déjà débuté au sein de cette canalisation. Par conséquent, comme le produit s'est rapproché de sa position d'équilibre à pression ambiante, le flash est moins « violent ».
<b>Résultante</b>			La composition des vitesses résultantes d'une part de la configuration de la brèche et d'autre part de l'expansion montre clairement que le jet associé à la buse présente une plus grande ouverture que celui issu de la canalisation.

Représentation schématique de la composition des vitesses à la brèche pour les deux configurations étudiées.



Représentation schématique des premiers enseignements recueillis lors des essais à petite échelle réalisés avec du butane.

mètre et une buse de 5 mm de diamètre. Ces essais ont permis de mettre en évidence les principaux points suivants :

- L'ouverture du jet diffère selon la configuration de la brèche (jet plus large dans le cas de la buse). Sur ce point, il peut être supposé que la présence des parois de la canalisation a permis de canaliser le flash du produit lors de sa détente partielle dans la canalisation. Les parois ont permis de transformer une partie de la composante transversale produite par le flash en composante longitudinale. Cette approche permet notamment d'expliquer pourquoi, dans le cas de la buse, l'ouverture du jet est plus grande. Une représentation schématique de la composition des phénomènes mis en jeu est donnée sur la figure ci-dessus.

- Juste après la zone d'expansion, les petites gouttes se trouvent majoritairement au centre alors que les plus grosses sont plus nombreuses sur la périphérie.
- En s'éloignant de la zone d'expansion, il apparaît progressivement une dissymétrie entre la partie supérieure et la partie inférieure du jet. Il semble que les gouttes les plus grosses s'accumulent sous le jet.
- Il est possible de trouver une loi de similitude pour déterminer la composante

longitudinale de la vitesse au sein du jet. La loi de décroissance de la vitesse sur l'axe dépend de la configuration étudiée. Ces derniers points sont repris schématiquement sur la figure ci-contre.

Les résultats obtenus au cours de cette première campagne d'essais confortent la démarche retenue par l'INERIS pour modéliser un rejet diphasique.

En effet, le devenir des gouttes présentes au sein du jet est principalement influencé par l'évaporation, l'interaction entre la turbulence du jet et la pesanteur. L'importance de chacune de ces influences dépend essentiellement de la taille des gouttes. Elles ont été identifiées au préalable et prises en compte dans le modèle développé par l'INERIS.

Les mesures montrent qu'il y a, selon leur taille, deux types de comportement pour les gouttes présentes au sein du jet.

- Les gouttes les plus fines sont soumises à des phénomènes de convection et d'évaporation au sein du jet.
- Les gouttes les plus grosses sortent du jet sous l'influence de l'inertie et de la pesanteur.

Le modèle développé par l'INERIS s'appuie sur le couplage de 2 modèles :

- le premier considère le jet dans son

ensemble. Ce modèle se rapproche donc de ce qui se passe pour les plus petites gouttes ;

- le second considère chaque goutte de façon individuelle en supposant que la goutte est entourée soit par une ambiance riche en vapeur du produit rejeté, soit par une ambiance constituée d'air. Ce modèle semble légitime pour les gouttes les plus grosses.

L'hypothèse consistant à calculer le diamètre moyen à partir d'une relation du type nombre de Weber constant semble fondée même en présence d'un flash thermodynamique, comme cela est le cas pour le butane, à condition toutefois de se situer suffisamment loin en aval de la zone d'expansion.

Lors de la prochaine campagne, il est prévu de concentrer les mesures (avec un maillage plus fin) dans la région la plus proche de la section de fuite, afin d'explorer la zone d'expansion. ●



# Comportement d'une structure en béton soumise à une onde de pression interne

Guy MAVROTHALASSITIS / Frédéric MERCIER

Le programme de recherche vise à décrire le comportement d'une structure en béton susceptible d'être le siège d'une explosion interne. Cette recherche a pour objectif de préciser les modalités de la ruine de la structure et, le cas échéant, la nature, la forme et la vitesse des projectiles ainsi engendrés. Une première étape a consisté à élaborer un modèle simplifié d'effondrement d'une structure verticale. À cet effet, un modèle

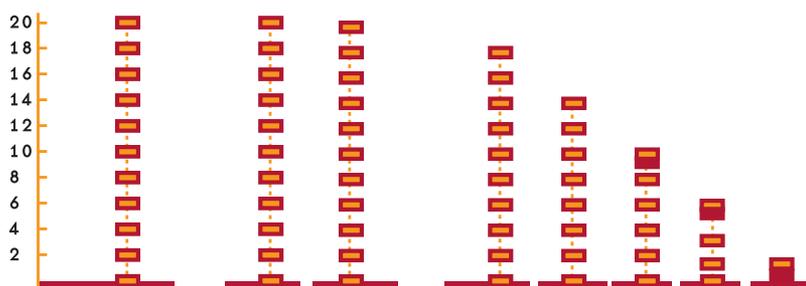
unidimensionnel simple a été développé. Une tour verticale, composée de masses reliées entre elles par des ressorts à comportement élastique fragile, est soumise à la gravité. Si deux masses entrent en contact, elles sont reliées entre elles par un ressort de très forte raideur. Un coefficient d'amortissement structurel est rajouté pour interdire des oscillations trop fortes de la tour, lorsqu'elle est entière. De nombreux scénarios d'effondrement

ont été pris en compte et une étude de sensibilité paramétrique à l'amortissement structural a été réalisée. Ces scénarios donnent des résultats très différents et montrent l'intérêt qu'il y a d'expérimenter et de cartographier une structure avec des outils numériques adaptés. Ils mettent également en évidence la nécessité de mener une étude poussée et dynamique de la vulnérabilité d'un bâtiment et d'en repérer ses éléments clés.

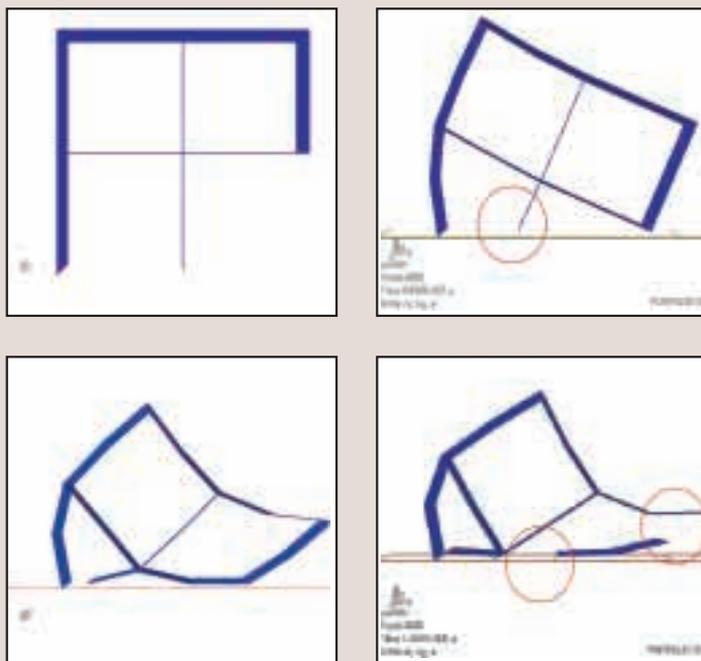
En outre, deux résultats théoriques intéressants ont pu être dégagés :

- La démonstration de la non-convergence d'un modèle élasto-plastique pour une poutre suspendue : ce résultat a des conséquences sur toutes les tentatives d'utilisation d'un modèle élasto-plastique dans une simulation d'effondrement. Une réduction du maillage ne permet pas au modèle de converger.

- La démonstration de l'équivalence entre des éléments discrets et des éléments finis qui permet d'envisager d'utiliser un logiciel à éléments discrets dans le domaine de l'effondrement. Par ailleurs, les travaux menés ont permis la réalisation d'un catalogue d'algorithmes qui servira de base à l'élaboration d'un logiciel d'effondrement et qui peut plus généralement être utilisé pour mettre au point des solutions numériques de réponse de structures à des problèmes accidentels. ●



Modèle unidimensionnel d'effondrement



Simulation sommaire d'effondrement réalisée avec des éléments de coques

## Publications

- Reimeringer M., Bailly P., Mavrot G., 2003. Étude du processus d'effondrement d'un bâtiment. *Congrès Français de Mécanique*, Nice, 1 au 5 Septembre 2003

- Bailly P. et Mavrothalassitis G. Expérimentations en compression et flexion dynamique sur des éléments de béton et béton armé, *Congrès Français de Mécanique*, Nice, 1 au 5 Septembre 2003

# Maîtrise des risques



**L**a transposition de la directive SEVESO II 96/82/CE relative à la maîtrise des dangers liés aux accidents industriels majeurs introduit en droit national le besoin de définir les facteurs importants pour la sécurité, dans toutes les phases d'exploitation des installations (arrêté du 10 mai 2000).

Ces facteurs incluent les paramètres et modalités de fonctionnement, les équipements et également l'organisation et le niveau de compétence des intervenants. Un des objectifs majeurs de la directive est la maîtrise des risques à la source. Pour ce faire, il est de la responsabilité de chaque industriel de mettre en place des barrières de sécurité pour limiter la probabilité d'occurrence ou la gravité d'événements accidentels majeurs identifiés à l'issue d'une analyse des risques.

Dans tous les cas, afin de démontrer qu'ils maîtrisent les risques inhérents à leurs activités, les exploitants d'unités industrielles doivent démontrer que les barrières techniques et organisationnelles mises en œuvre permettront effectivement d'assurer les fonctions de sécurité identifiées.

L'INERIS a pour mission d'aider les industriels et les pouvoirs publics à s'assurer de la maîtrise des risques industriels. À ce titre, il développe des outils d'évaluation de la robustesse de ces barrières afin de fournir des axes d'amélioration et bâtit un référentiel de certification des

dispositifs technologiques.

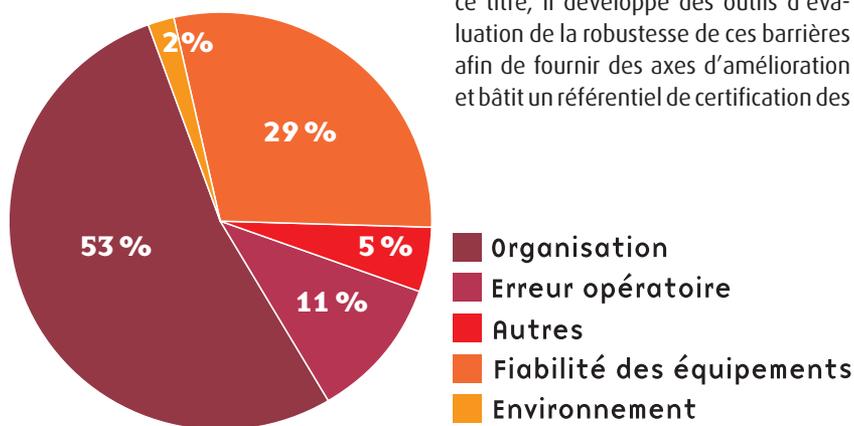
Dans le cadre de l'application de cette directive, l'INERIS s'intéresse plus particulièrement aux événements accidentels relatifs à une perte de confinement conduisant à la mise à l'atmosphère d'une substance ou préparation dangereuse ou à la libération brutale d'énergie. Les barrières de défense sont mises en place pour assurer des fonctions de sécurité données, soit en prévention (réduction de la probabilité d'occurrence d'événements initiateurs), soit en protection (réduction des conséquences des phénomènes dangereux).

Les événements initiateurs peuvent être d'origine organisationnelle (défaut de maintenance, action humaine...) ou technologique (défaillance d'un équipement...). La base de données européennes MARS, qui recense les accidents majeurs déclarés dans les pays de l'Union européenne, donne la répartition des causes suivante (voir figure ci-contre).

Quelles que soient les fonctions de sécurité à assurer, les barrières peuvent donc être de nature organisationnelle et/ou technologique.

Les outils développés par l'INERIS sont relatifs à :

- la détermination des éléments importants pour la sécurité ;
- l'intégration des aspects organisationnels et techniques pour la maîtrise des risques ;
- l'évaluation des performances des équipements importants pour la sécurité. ●

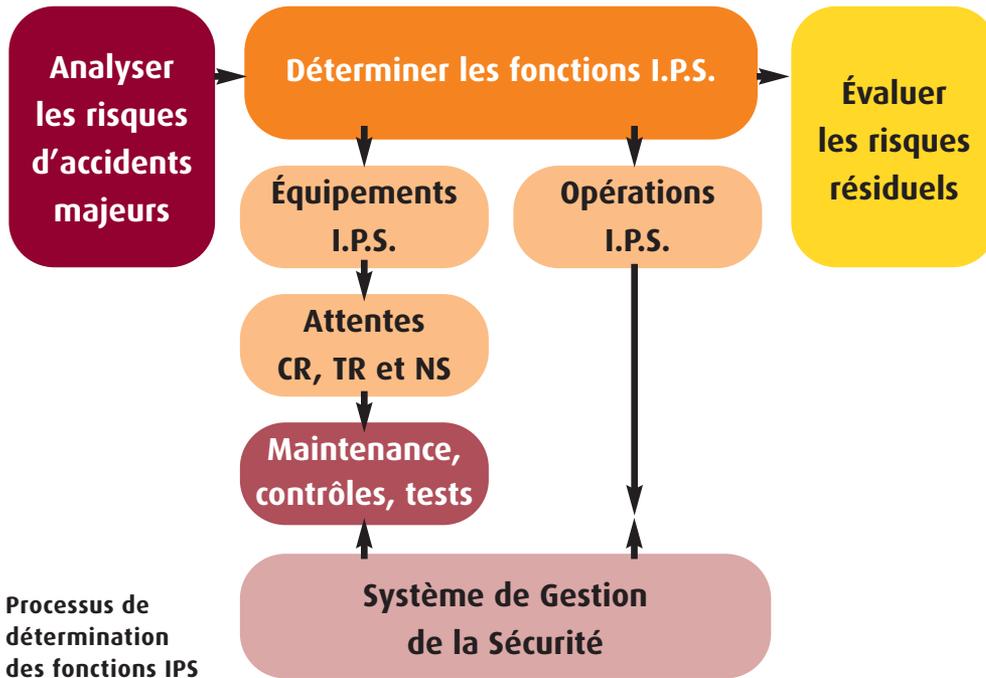


Causes des accidents majeurs



## Éléments Importants Pour la Sécurité (EIPS)

Sébastien BOUCHET / Dominique CHARPENTIER



Processus de détermination des fonctions IPS

**POUR ÊTRE QUALIFIÉ D'IMPORTANT POUR LA SÉCURITÉ (IPS), UN ÉLÉMENT (OPÉRATION PROCÉDURE OU ÉQUIPEMENT) DOIT ÊTRE CHOISI PARMIS LES BARRIÈRES DE DÉFENSE DESTINÉES À PRÉVENIR L'OCCURRENCE OU À LIMITER LES CONSÉQUENCES D'UN ÉVÉNEMENT REDOUTÉ SUSCEPTIBLE DE CONDUIRE À UN ACCIDENT MAJEUR**

Les notions d'IPS – Important Pour la Sécurité – et d'EIPS – Éléments Importants Pour la Sécurité – sont apparues il y a une dizaine d'années en France comme à l'étranger dans la réglementation et ont fait l'objet de développements dans des ouvrages techniques à destination d'un public spécialisé. Dans l'arrêté français du 10 mai 2000, pris pour l'application de la directive SEVESO II, ces notions ont été introduites et ne sont pas clairement définies, ni d'ailleurs dans les textes réglementaires ou ouvrages qui les mentionnent. Qu'il s'agisse de spécifications, de procédures, d'équipements..., il ressort de cet arrêté que le choix des paramètres IPS est de la responsabilité de l'exploitant.

Un groupe de travail mis en place par la DRIRE Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) et animé par l'INERIS, a proposé une définition des Éléments Importants pour la Sécurité (EIPS) : Sur cette base, la démarche développée par l'INERIS pour la détermination des EIPS est la suivante. L'analyse des risques permet de mettre en évidence des événements indésirables qui par leurs enchaînements peuvent engendrer un accident majeur. Aux événements indésirables sont associées des fonctions de sécurité, permettant de limiter l'occurrence ou les conséquences d'un accident. Certaines de ces fonctions seront identifiées comme IPS, et les barrières de sécurité associées seront alors qualifiées d'IPS. Aux barrières techniques sont associées des critères d'évaluation, à savoir la capacité de réalisation (CR), le temps de réponse (TR) et le niveau de sécurité (NS). Le suivi de ces barrières de sécurité doit être assuré afin que les critères définis subsistent dans le temps ; c'est entre autres finalités, le rôle du système de gestion de la sécurité (SGS). Des définitions des critères concernant les fonctions et barrières techniques de sécurité ont, en outre, été élaborées :

● **capacité de réalisation** : l'aptitude d'une barrière technique à remplir la fonction de sécurité pour laquelle elle a été choisie, pendant une durée donnée. Cette aptitude s'exprime en pourcentage d'accomplissement de la fonction, en ne considérant que le fonctionnement normal (non dégradé). Ce pourcentage peut varier pendant la durée de fonctionnement de la barrière ;

● **temps de réponse** : l'intervalle de temps entre le moment où une barrière de sécurité est sollicitée et le moment où la fonction de sécurité assurée par cette barrière est réalisée dans son intégralité ;

● **niveau de sécurité** : la quantification de la sécurité apportée par la barrière. Le niveau de sécurité (compris entre SIL 1 et SIL 4) est associé à des spécifications de comportement sur défauts de la barrière. Ce paramètre prend ainsi en compte la sûreté de fonctionnement de la barrière par le calcul de la probabilité des défaillances dangereuses.

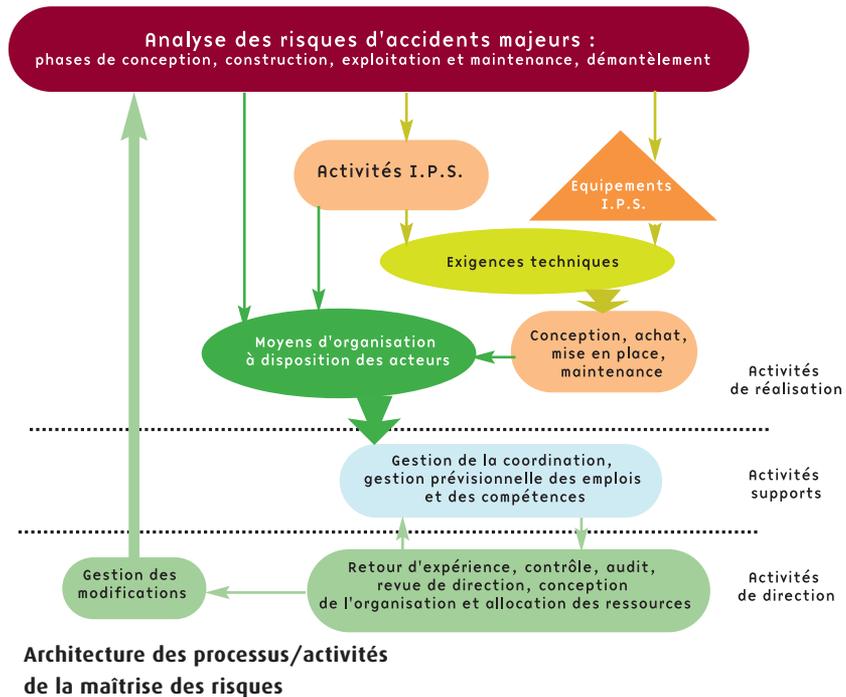
Les travaux de l'INERIS sont destinés à établir un référentiel d'évaluation de ces dispositifs de sécurité dans le but de les certifier ainsi que d'émettre des avis techniques sur les fonctions de sécurité assurées par de tels dispositifs. ●

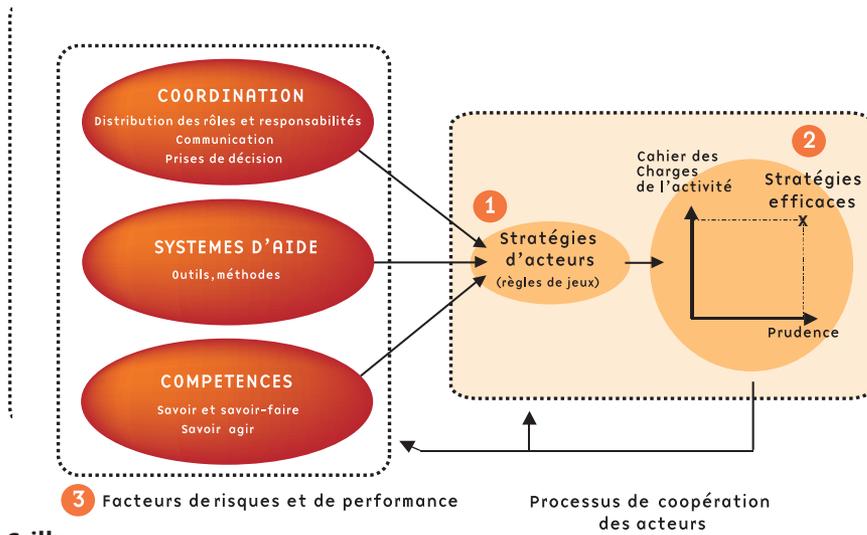
## Maîtrise Intégrée des Risques d'Accidents Majeurs : MIRIAM<sup>®</sup> / ATOS<sup>®</sup>

Franck PRATS / Emmanuel PLOT / Jean-Christophe LECOZE

Dans le cadre d'un programme de recherche, l'INERIS a développé, d'une part, la première version d'une grille d'analyse du management de la maîtrise des risques majeurs intitulée MIRIAM<sup>®</sup> (Maîtrise Intégrée des Risques d'Accidents Majeurs) et, d'autre part, une méthode d'intervention sur site dénommée ATOS<sup>®</sup> (Analyse Technique et Organisationnelle de Sécurité). MIRIAM<sup>®</sup> est un référentiel qui propose une définition et une articulation des paramètres techniques, organisationnels et humains, à prendre en compte pour évaluer ou organiser la maîtrise des risques d'un établissement industriel. ATOS<sup>®</sup> associe au référentiel MIRIAM<sup>®</sup> des

●●● suite page 62





**Grille  
d'analyse des  
mécanismes  
de l'agir  
humain**



techniques d'intervention transférables aux industriels.

MIRIAM<sup>®</sup> comporte deux volets. Le premier présente une conception originale de l'architecture des processus/activités de la maîtrise des risques (voir figure p. 61), parmi lesquels on distingue les activités de réalisation, les activités support et les activités de direction. Toutes ont un impact sur la performance des barrières importantes pour la sécurité (IPS).

**ATOS<sup>®</sup> ASSOCIE AU  
RÉFÉRENTIEL MIRIAM<sup>®</sup>  
DES TECHNIQUES D'INTER-  
VENTION TRANSFÉRABLES  
AUX INDUSTRIELS**

Le second volet s'appuie sur une représentation des mécanismes de l'action individuelle et collective permettant de comprendre, d'analyser et d'évaluer la manière dont les acteurs chargés de la sécurité gèrent chacun des processus ou activités de la maîtrise des risques et la culture sécurité des équipes (voir figure ci-dessus).

ATOS<sup>®</sup> propose des techniques d'intervention (questionnaires, groupes de travail, grille d'entretiens) permettant de réaliser les 6 objectifs suivants :

1. Réaliser une analyse technique des risques majeurs (identifier les scénarios d'accident et les barrières de sécurité techniques et humaines permettant d'en assurer la maîtrise).

2. Évaluer le Système de Gestion de la Sécurité (SGS).

3. Réaliser une évaluation de la culture sécurité – avant intervention ATOS<sup>®</sup> – des acteurs chargés des activités de la maîtrise des risques visant à :

- analyser les problèmes de coordination, de compétences, de systèmes d'aide, ainsi que les éventuels non respects des consignes, erreurs de routines, inattention, les problèmes de prudence, les problèmes de confiance, les conflits, etc. ;

- comprendre les conditions de mise en œuvre des systèmes de gestion de la sécurité, conditions internes et externes aux sites industriels, touchant aux phénomènes de régulation et aux pratiques de gouvernance du risque. Les systèmes de gestion de la sécurité exigés réglementairement ne vivent pas dans un désert économique, politique et social, bien au contraire. Dès lors, l'amélioration de leur efficacité et de leur efficience ne peut pas faire l'économie d'un diagnostic des modes de régulations ou des pratiques de gouvernance.

4. Proposer des axes d'amélioration (spécifier les solutions possibles), préciser les éventuels spécialistes auxquels il faudrait faire appel, circonscrire les problèmes aujourd'hui non résolus.

5. Accompagner les industriels dans leur dynamique d'amélioration sur une de leurs problématiques humaines clefs (conduire la dynamique du changement) et aussi participer à la construction d'une culture sécurité.

6. Suivre l'évolution du niveau de maîtrise des risques à travers la mise en place d'indicateurs et de tableaux de bord concernant les aspects techniques, organisationnels et humains de la sécurité, et évaluer l'évolution de la culture sécurité après intervention ATOS<sup>®</sup>. La méthode ATOS<sup>®</sup> s'inscrit ainsi dans les systèmes d'amélioration continue des SGS.

Ces travaux ne portent donc pas sur l'analyse d'un fait ou d'un objet constitué, mais permettent d'aboutir à des solutions concrètes de gestion des risques, en intégrant les sciences sociales, les sciences de l'ingénieur et les techniques de management. ●

# Vers une intégration de l'ensemble des disciplines dans l'évaluation des risques

**B**ien qu'elle relève d'une multitude de paramètres, la sécurité est encore trop souvent gérée sur la base de considérations purement techniques. À cet égard, la compétence des experts et les outils d'analyse des risques représentés par les installations dangereuses fixes (installations classées), ou les systèmes de transport sont déterminants auprès des décideurs.

Les outils d'analyse des risques servent notamment à éclairer les prises de décision dans la délivrance des autorisations d'exploiter, la maîtrise de l'urbanisation ou l'élaboration des plans de secours. L'intérêt toujours croissant pour l'amélioration de la connaissance des risques est en partie dû aux accidents majeurs qui ont marqué les mémoires : SEVESO (1976), Bhopal (1984), Mont-Blanc (1999), Tauern (1999)... La catastrophe d'AZF à Toulouse, le 21 septembre 2001, nous rappelle que l'évaluation des risques majeurs souffre encore d'un manque de données fiables et de méthodes rigoureuses.

Malgré l'évolution des connaissances et des techniques d'analyse des risques, le projet ASSURANCE (p. 65) a mis en évidence

une grande disparité des résultats calculés entre plusieurs experts. Cette incertitude « technique » ne simplifie pas les prises de décision en matière de gestion des risques. La variabilité semble inévitable dans un processus global d'évaluation des risques dans la mesure où elle résulte de la finesse du modèle employé

et de l'expérience de l'expert. Il est très difficile de dissocier l'un de l'autre. C'est en effet au final le seul jugement de l'expert qui permet de définir les hypothèses les plus réalistes et les mieux adaptées

aux modèles qu'il utilise. Notre travail reste toujours une approximation et une simplification d'une réalité complexe.

Dans le domaine de la prévention des accidents majeurs, la recherche est morcelée, en France comme dans l'ensemble de l'Union européenne. Les travaux réalisés ou en cours s'intéressent à des problématiques « isolées », telles que la réduction des incertitudes liées à l'analyse technique des risques (ASSURANCE), la maîtrise de l'organisation ou du management de la sécurité, la compréhension du facteur humain dans le mécanisme de l'accident (dimension ergonomique, psychologique ou sociologique). L'enjeu est aujourd'hui de travailler l'articulation opérationnelle de toutes ces problématiques au sein d'une recherche d'envergure européenne. C'est l'objectif des projets ARAMIS et UPTUN (exemples p. 66 et 67).

**UNE MAÎTRISE EFFICACE  
DES RISQUES MAJEURS  
NÉCESSITE UNE  
APPROCHE SYSTÉMIQUE  
ET PLURIDISCIPLINAIRE**

●●● suite page 64



Une maîtrise efficace des risques majeurs dépend de la capacité à intégrer tous les aspects de la prévention et nécessite l'adéquation des différentes solutions disciplinaires entre elles.

Un autre enjeu d'envergure concerne l'harmonisation des différences d'approche et de méthodes parmi les spécialistes, aux plans national et européen, entre les partisans d'une approche quantitative probabiliste, et les défenseurs de l'approche déterministe.

En France, les approches d'Évaluation Quantifiée des Risques (EQR) sont utilisées dans l'application de la réglementation

pour le passage des matières dangereuses en tunnel. L'EQR permet d'éclairer la décision face à l'alternative entre le passage en souterrain

ou à l'air libre. Pour cela, on évalue à la fois les probabilités d'occurrence et la gravité (perte de vies humaines) d'accidents majeurs impliquant les matières dangereuses. D'autres paramètres, tels que les impacts environnementaux ou économiques, ne sont pas intégrés dans ces évaluations. La sécurité en tunnel est également étudiée pour les autres risques (accidents de la route, incendie...) dans les Études Spécifiques des Dangers. Ces études sont déjà pluridisciplinaires. Elles prennent en compte l'ensemble des paramètres influençant la sécurité en tunnel pour définir les scénarios a priori les plus risqués (fréquence x gravité) et faire une évaluation déterministe de ces scénarios

en intégrant un grand nombre de facteurs d'influence (usagers de la route, opérateurs de tunnel, services de secours, réponse des systèmes techniques...).

Dans le domaine nucléaire, domaine d'État en France, l'approche probabiliste a permis d'établir des critères nationaux d'acceptabilité des risques sur lesquels les analyses peuvent se fonder pour démontrer la maîtrise des risques. Dans le domaine du transport des matières dangereuses, l'approche probabiliste est utilisée différemment.

La gestion des risques majeurs dans les installations classées est plus complexe. Ces établissements étant privés pour la plupart, il est difficile au plan national (et européen) de définir des seuils de risque acceptable à l'instar du nucléaire, les enjeux et les responsabilités engagées n'étant pas les mêmes. La comparaison de différentes alternatives de gestion des risques serait envisageable mais beaucoup moins immédiate que dans le cas du transport des matières dangereuses. L'approche française des risques associés aux installations classées reste donc pour le moment déterministe. Elle repose sur la définition de scénarios d'accident définis forfaitairement de manière plus ou moins précise.

Toutefois, aucune des deux approches

n'est parfaitement adaptée à la recherche d'une politique globale de gestion des risques. En effet, des exemples récents ont montré que la société civile n'accepte pas le risque d'une installation sur des critères exclusivement techniques. La notion de risque est toujours perçue de façon négative. Le risque subi ne peut être accepté par un tiers (public, administration, association...) qu'à partir du moment où il présente en contrepartie des bénéfices suffisants. Il est donc nécessaire, pour un décideur, de posséder une analyse multicritère des risques (vulnérabilité de l'environnement, intérêt économique, etc.) pour pouvoir établir sa décision.

L'INERIS travaille actuellement sur une solution alternative. Celle-ci s'appuie sur les concepts des barrières de défense et de la défense en profondeur, qui constituent le principe fondateur de la sécurité dans les installations nucléaires et certaines installations industrielles. Cette approche permet plus de transparence dans la présentation de la gestion des risques et améliore donc la communication à l'intention du public et des associations. Plusieurs pays européens tels que de la Grande-Bretagne et les Pays-Bas s'orientent d'ailleurs peu à peu vers ce type de méthode. ●

**L'INERIS ÉTUDIE  
UNE SOLUTION  
ALTERNATIVE FONDÉE  
SUR LES BARRIÈRES DE  
DÉFENSE ET LA DÉFENSE  
EN PROFONDEUR**

**UN ENJEU DE LA MAÎTRISE  
DES RISQUES CONCERNE  
L'HARMONISATION DES  
DIFFÉRENCES D'APPROCHE  
ET DE MÉTHODES AUX PLANS  
NATIONAL ET EUROPÉEN**

# Le projet européen ASSURANCE Assessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments

David HOURTOLOU

Le projet ASSURANCE a succédé, à un autre projet européen intitulé BEMHA (Benchmark Exercise on Major Hazards Analysis). Son objectif est de réaliser une étude comparative des méthodes d'analyse des risques et des approches sécurité à travers l'Europe. Pour cela, le projet a réuni, entre 1998 et mars 2002, neuf organismes européens qui ont évalué les risques d'une installation chimique réelle prise comme référence.

En tirant les leçons du premier benchmark, ASSURANCE s'est attaché, dans le découpage des étapes du projet, à mieux cadrer le travail des experts, pour permettre la comparaison des résultats intermédiaires intervenant dans l'évaluation finale du risque.

Le projet ASSURANCE était divisé en trois phases principales. Les deux premières étapes recouvraient une analyse qualitative (identification et hiérarchisation des risques, choix des scénarios), puis une analyse quantitative (calcul des probabilités et des conséquences, évaluation du risque). La troisième étape a consisté en une étude de sensibilité : à l'issue de l'étape 2, les partenaires se sont concertés pour retenir six cas types permettant de tester la sensibilité de divers paramètres identifiés et leur influence sur les résultats finaux (calcul du débit de fuite, temps de rejet retenu, modèle de dispersion utilisé, etc.)<sup>\*</sup>.

Dix ans après le projet BEMHA, ASSURANCE révèle toujours une grande disparité des résultats, qu'il s'agisse d'évaluation des probabilités ou des conséquences. Cette disparité s'explique par :

- le choix des scénarios à quantifier ;
- l'incertitude ou l'ambiguïté dans la définition d'un scénario, source majeure de disparité, notamment pour la maîtrise de l'urbanisation ;
- les modèles utilisés, qui ne sont toujours qu'une simplification des phénomènes accidentels étudiés, le niveau d'incertitude dépend de la bonne connaissance du phénomène physique et du degré de complexité du phénomène ;
- le choix des hypothèses, qui constitue une source majeure et récurrente de variabilité mettant en exergue l'importance de l'expérience de l'analyste et de sa connaissance des phénomènes pour définir les hypothèses les plus réalistes dans les scénarios ;
- la subjectivité propre de chaque expert qui amène finalement chacun à formuler des hypothèses plus ou moins majorantes. L'incertitude relative à l'évaluation des risques individuels et

sociétaux – notions propres à l'approche probabiliste – demeure encore très importante. Il paraît difficile de fonder sur cette approche seule une politique cohérente et transparente de gestion des risques. D'autant que des exemples récents ont montré toute la difficulté de résumer le risque acceptable à un seul nombre ( $10^{-5}$  /an ou  $10^{-6}$  /an).

Les approches déterministe et probabiliste ne doivent pas, pour autant, être opposées car elles sont souvent complémentaires. La première sert à vérifier la conception sûre d'une installation ; l'approche probabiliste permet ensuite d'évaluer le niveau de risque résiduel. Aujourd'hui, plusieurs pays européens s'orientent vers une approche alternative, semi-probabiliste et basée sur l'évaluation des barrières de défense. ●

<sup>\*</sup> L'INERIS présente ses principaux constats dans un rapport complet disponible sur son site Internet.

LES APPROCHES  
DÉTERMINISTE  
ET PROBABILISTE NE  
DOIVENT PAS ÊTRE  
OPPOSÉES CAR ELLES  
SONT COMPLÉMENTAIRES

L'OBJECTIF DU PROJET  
ASSURANCE EST DE  
RÉALISER UNE ÉTUDE  
COMPARATIVE DES  
MÉTHODES D'ANALYSE  
DES RISQUES ET DES  
APPROCHES SÉCURITÉ  
À TRAVERS L'EUROPE



# Le projet européen ARAMIS Accidental Risk Assessment Methodology for Industries in the framework of SEVESO II directive

David HOURTOLOU / Olivier SALVI

**D**epuis janvier 2002, l'INERIS coordonne un projet européen, ARAMIS, financé par le 5<sup>e</sup> PCRD<sup>(1)</sup> de la Commission européenne. Le projet réunit quinze organismes européens. Prévu pour une durée de trois ans, ARAMIS a été bâti sur les conclusions d'autres projets européens financés par le 4<sup>e</sup> programme-cadre, dont notamment ASSURANCE et I-RISK.

## LE PROJET ARAMIS INTÈGRE TROIS INDICES POUR ÉVALUER UN NIVEAU DE RISQUE

ARAMIS a pour objectif le développement d'une nouvelle méthode d'évaluation des risques intégrant les points forts des différentes approches déterministes et probabilistes existant dans l'Union européenne. De manière générale, ce projet vise à améliorer les démarches d'analyse et de maîtrise des risques d'accident majeur autour des établissements dangereux. Il se fonde sur un principe de gestion selon lequel «*tout ce qui n'est pas mesuré, n'est pas maîtrisé*»<sup>(2)</sup>. En cela, ARAMIS doit contribuer à l'harmonisation des pratiques européennes et favoriser l'application de la directive SEVESO II dans les états membres. Alternative aux méthodes traditionnelles, ARAMIS s'appuie sur les concepts des barrières de défense et de la défense en profondeur, principe fondateur de la sécurité notamment dans les installations nucléaires. Il s'agit d'abord d'identifier des scénarios d'accident majeur puis d'en évaluer les effets de manière déterministe. En fonction de la gravité de ces effets, l'enjeu est ensuite d'évaluer la «robustesse» des barrières de défense

en place en fonction de leur probabilité de défaillance.

Le projet doit aboutir à un indice intégré du risque, basé sur le choix de scénarios de référence, combinant trois indices construits indépendamment :

- l'indice S d'évaluation des effets potentiels des scénarios d'accident ;
- l'indice M reflétant l'efficacité des barrières de défense et du système de gestion de la sécurité, qui permet de réduire la probabilité d'occurrence des accidents majeurs ;
- l'indice V d'estimation de la vulnérabilité de l'environnement du site, susceptible d'être affecté par des accidents. L'originalité de l'approche réside dans l'intégration des trois indices S, M et V pour caractériser le niveau de risque d'un site. La méthodologie construite est en cours de validation. Tout au long du projet, les développements sont examinés deux fois par an par un comité de suivi regroupant des experts en risque de l'industrie et des autorités compétentes des états membres. Ce suivi périodique par un collège d'utilisateurs potentiels permet de s'assurer de la prise en compte de leurs besoins, favorisant ainsi l'acceptation finale de la démarche développée. Enfin, le consortium communique auprès du public par l'intermédiaire d'un site Internet (<http://aramis.jrc.it>). Il met en place des ateliers lors des conférences annuelles de l'ESREL. ●

(1) Programme-Cadre pour la Recherche et le Développement Technologique.

(2) Deming, célèbre économiste américain du XX<sup>e</sup> siècle.

# Le projet européen UPTUN Cost-Effective, Sustainable and Innovative Upgrading Methods for Fire Safety in Existing Tunnels

*Emmanuel RUFFIN*

**L**e projet UPTUN a débuté en 2002. Il a pour principal objectif de développer une démarche intégrée pour l'amélioration de la sécurité incendie des tunnels existants. L'ensemble des facteurs d'influence est pris en compte dans le cadre de travaux préparatoires sur les thèmes suivants :

- prévention, détection et surveillance,
- développement des incendies et mesures d'atténuation,
- comportements humains,
- comportement des structures du tunnel.

Dans un premier temps, ces travaux permettront de tenir compte de l'état de l'art et de définir les paramètres importants pour la sécurité dans chaque domaine. Ils permettront également de lister les technologies innovantes les plus intéressantes qui, comparées aux technologies classiques, permettront de détecter l'occurrence des incendies, guider les usagers, aider la lutte contre l'incendie, protéger les structures des tunnels... Il sera alors possible d'établir la liste des paramètres les plus influents pour la sécurité, pour chaque cas spécifique de tunnel, qu'il soit routier ou ferroviaire. Dans un second temps, ces paramètres seront intégrés dans une démarche d'évaluation globale des risques nommée UPGRADE à laquelle l'INERIS prend une part importante. Cette procédure innovante est le cœur de la démarche de sécurité intégrée du projet. Sa fonction est de définir, pour un tunnel donné, les paramètres à modifier en priorité pour améliorer le plus efficacement possible sa sécurité. L'intégration des paramètres de sécurité classiques, d'ordre technologique, avec d'autres paramètres d'influence tels que les comportements et les coûts, est le moyen qui est choisi pour obtenir une bonne évaluation des améliorations possibles. L'approche intégrée

devrait permettre d'atteindre des améliorations durables, innovantes et économiquement viables donc efficaces.

Un autre axe d'intégration proposé dans UPGRADE est d'utiliser la complémentarité des approches d'Évaluation Quantitative des Risques (EQR) et des approches déterministes. Ainsi, une démarche d'évaluation déterministe et systémique de la sécurité en tunnel routier, similaire à celle proposée dans le cadre des Études Spécifiques des Dangers françaises, sera développée et intégrée à une approche EQR, pratiquée dans d'autres États européens. L'intégration de ces deux approches permettra à la fois d'obtenir une quantification globale des risques (gravité et probabilité) et de tenir compte de l'influence précise, durant les premières minutes d'un incendie, de chaque élément d'un système «tunnel».

La boucle d'optimisation que constitue UPGRADE sera complétée par un calcul des coûts des scénarios accidentels prévisibles ainsi que des coûts relatifs aux améliorations possibles de la sécurité.

La procédure UPGRADE sera testée sur des exemples théoriques concrets de tunnels routiers et ferroviaires. Une démonstration pratique sur un site existant ainsi que la dissémination des résultats sont prévus en fin de projet.

L'INERIS prend également une part importante à des travaux ayant abouti à la définition des scénarios d'incendie qui seront évalués dans les futures études des dangers ainsi que dans la procédure UPGRADE. Ces scénarios concernent les tunnels routiers et ferroviaires. Ils sont basés sur une revue de la littérature existante et sur les principes adoptés par les partenaires du projet pour définir de tels scénarios dans leur pays.

Une méthode de choix de scénarios d'incendies est également en cours d'élaboration par l'INERIS. À l'aide d'un simulateur d'environnement, cette méthode permettra de mieux comprendre l'influence des facteurs humains sur les conséquences des incendies en tunnel.

Pour la diffusion des résultats durant la réalisation du projet un site Internet a été créé : [www.uptun.net](http://www.uptun.net). ●

**LE PRINCIPAL OBJECTIF  
DU PROJET UPTUN  
EST DE DÉVELOPPER UNE  
DÉMARCHE INTÉGRÉE POUR  
L'AMÉLIORATION DE LA  
SÉCURITÉ INCENDIE DES  
TUNNELS**

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

(au 1<sup>er</sup> janvier 2003)

## **JEAN-PIERRE MAGNAN**

Président de la Commission Scientifique  
Risques du Sol et Sous-sol  
Directeur technique  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

## **GÉRARD VOUILLE**

Vice-Président de la Commission Scientifique  
Risques du Sol et Sous-sol  
Directeur de Recherche  
Centre de Géotechnique et Exploitation  
du Sous-sol  
École des Mines de Paris

## **ALBERT ARMANGUÉ**

Chef du Département Gypse  
BPB Placo

## **JEAN-PAUL BARRIÈRE**

Directeur des Sites Arrêtés et Coordinateur  
National CdF  
Houillères de Bassin du Centre et du Midi

## **PATRICK BRETIN**

Directeur Général  
SOGEREM

## **GILBERT CASTANIER**

Chef de la Division «Géologie Géotechnique»  
EDF Branche Énergies

## **PIERRE COMBES**

Directeur de Recherche  
École Nationale Supérieure des Mines de Paris

## **BEHROOZ GATMIRI**

Adjoint au Chef du Service Aménagements  
et Risques Naturels  
BRGM

## **PHO HOANG TRONG**

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

## **LYESSE LALOU**

Directeur de Recherche  
École Polytechnique Fédérale de Lausanne (CH)

## **JEAN LAMBERTI**

Directeur Environnement  
RHODIA

## **PATRICK LEBON**

Adjoint au Directeur Scientifique  
ANDRA

## **HENRI MOLLERON**

Président-Directeur Général  
COLAS Environnement et Recyclage

## **JEAN SICARD**

Département de génie civil  
École Normale Supérieure de Cachan

## **DIMITRI SPOLIANSKY**

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

## **MATHIEU VESCHKENS**

Chef de la section Ressources Minérales  
ISSeP (BE)

## **BERNARD FEUGA**

GEODERIS

# RISQUES DU SOL ET SOUS-SOL

## 70 INTRODUCTION

## 72 PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS MAJEURS

- 73 Stabilité des cavités souterraines : le cas des marnières (Jean-Jacques TRITSCH)
- 73 Réalisation d'études d'aléas dans le cadre de PPRN «Mouvements de terrain» (Jean-Marc WATELET)
- 74 Auscultation et surveillance d'un versant rocheux dans les Alpes-Maritimes (Yann GUNZBURGER)

## 75 GESTION DE L'APRÈS-MINE

- 76 Méthodologie de hiérarchisation des zones à risque d'effondrement (Romuald SALMON / Myriam MERAD)
- 77 Les SIG : un outil interactif d'analyse et de gestion des risques miniers résiduels «Mouvements de terrain» (Laurent CAUVIN)
- 78 L'apport de la modélisation numérique (Alain THORAVAL / Farid LAOUAFA)

## 79 AUSCULTATION ET SURVEILLANCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

- 80 Expérimentation en grand de surveillance des instabilités de falaises côtières (Gloria SENFAUTE)
- 81 Expérimentation de méthodes de surveillance des instabilités de carrières souterraines (Cyrille BALLAND)
- 82 Technique de tomographie appliquée au diagnostic des ouvrages souterrains (Franz LAHAIE)

## 83 ÉMANATION DE GAZ SOUTERRAIN

- 83 Évaluation et prévention des risques d'émissions de gaz liés aux mines de charbon (Candice LAGNY)
- 84 Émissions de gaz dans les anciennes mines de fer (David GRABOWSKI / Zbigniew POKRYSZKA)

# Une activité dominée par l'après-mine

**L**es activités de l'INERIS dans le domaine des risques du sol et du sous-sol sont en grande partie héritées de l'ancien Centre d'Études et Recherches de Charbonnages de France (CERCHAR). Elles concernent l'évaluation et la prévention des risques liés à l'exploitation du sous-sol (avant, pendant ou après l'extraction) : mouvements de terrains, dégagements gazeux et hydrogéologie. Ces compétences se sont progressivement élargies à la connaissance et à la surveillance du comportement des massifs rocheux et des ouvrages souterrains.

Depuis deux ans, l'«après-mine» a pris le pas sur l'activité relative à l'exploitation minière en phase de production. Cette problématique est, à bien des égards, distincte de celle d'une mine en activité : les échelles de temps et d'espace sont importantes ; les phénomènes en jeu sont complexes et difficiles à cerner dans le temps.

Dans ce contexte, l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) doit s'appuyer sur des méthodologies adaptées qu'il convient d'élaborer à partir d'une recherche en amont.

Ce besoin a présidé à la création dès 1999 d'un groupement d'intérêt scientifique de recherche sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains, le GISOS, associant l'INERIS, le BRGM et l'INPL, rejoints, en 2002, par l'École des Mines de Paris.

**LES TRAVAUX DE RECHERCHE DOIVENT DÉBOUCHER SUR DES MÉTHODOLOGIES, DES MOYENS D'INVESTIGATION, D'AUSCULTATION ET DE SURVEILLANCE**

Par ailleurs, un autre groupement prenant la forme d'un GIP (Groupement d'Intérêt Public) GEODERIS a été constitué, en janvier 2002, par l'INERIS et le BRGM pour appuyer les DRIRE à l'échelle nationale. Jusqu'à présent, les travaux de recherche relatifs à l'après-mine ont surtout porté sur les anciennes mines de fer de Lorraine où certains problèmes comme l'influence de l'engoyage sur la stabilité à terme des terrains sont à l'étude ; ils concernent également les problèmes spécifiques posés par les mines de sel ou les problèmes de stabilité des terrains liés à la dissolution progressive du sel s'ajoute celui de la pollution saline des aquifères.

Ces travaux de recherche doivent débou-



Exemple de carte d'aléa.

cher sur des méthodologies, des moyens d'investigation, d'auscultation et de surveillance. Ils comportent le recours à des expérimentations in situ de grande ampleur, comme celles qui viennent de se dérouler sur le site de Tressange, dans le bassin ferrifère lorrain.

### >Extension de l'activité à la réalisation des PPRN

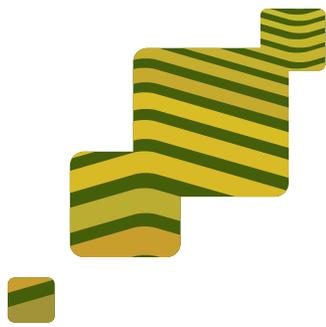
Dans le domaine des risques du sol et du sous-sol, l'INERIS joue également un rôle important dans la réalisation des Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN) et Miniers (PPRM) ainsi que dans l'élaboration des méthodologies d'évaluation de ces risques.

Enfin, les compétences reconnues internationalement dans ce domaine ont permis la constitution d'un partenariat scientifique avec l'ANDRA ; l'INERIS contribue à l'étude des conditions de stockage de longue durée des déchets radioactifs. ●

**Reconnaissance sur site présentant un risque d'instabilité.**



**LES COMPÉTENCES DE L'INERIS DANS LE DOMAINE MINIER ONT ÉTÉ ÉLARGIES À LA CONNAISSANCE ET À LA SURVEILLANCE DU COMPORTEMENT DES MASSIFS ROCHEUX ET DES OUVRAGES SOUTERRAINS**



# Prévention des risques naturels majeurs

**D**e très nombreux secteurs urbanisés ou potentiellement urbanisables sont soumis à des risques naturels dont les origines et les conséquences peuvent être très variées. La protection des populations menacées est l'une des préoccupations majeures des services de l'État et des autorités locales dans leur devoir d'information publique et d'amélioration de la sécurité des populations exposées. L'INERIS possède une expérience et une capacité d'expertise affirmées dans le domaine de la prévention de ce type de risques, notamment ceux concernant les

**L'INERIS, UN ORGANISME COMPÉTENT ET RECONNU DANS LE DOMAINE DE L'ÉVALUATION DES RISQUES LIÉS À LA PRÉSENCE DE CAVITÉS SOUTERRAINES, CARRIÈRES OU MINES, EN ACTIVITÉ OU ABANDONNÉES**

mouvements de terrain. L'expérience de l'Institut repose sur sa longue tradition minière. Sa capacité d'expertise s'appuie sur l'association complémentaire d'équipes de «généralistes» (capables d'analyser globalement des problèmes variés et complexes) et de «spécialistes» (géologues, géophysiciens, techniciens spécialisés). Ce savoir-faire fait aujourd'hui de l'INERIS un organisme compétent et reconnu dans

le domaine de l'évaluation des risques liés à la présence de cavités souterraines, carrières ou mines, en activité ou abandonnées. Par ailleurs, en s'appuyant sur la méthodologie d'analyse du risque établie pour le souterrain, une méthodologie spécifiquement adaptée à la problématique des versants rocheux instables a été développée et mise en œuvre dans l'emprise d'enjeux sensibles.

Outre le diagnostic et l'affichage du risque, il est primordial, dans une optique de développement durable du territoire, de maîtriser l'urbanisme dans ces secteurs, – parfois très étendus – qui font l'objet d'une pression foncière importante sans condamner systématiquement tout projet d'aménagement.

### > Faire progresser outils de diagnostic du risque et solutions techniques

Pour gérer au mieux ces questions fondamentales, l'INERIS mène des programmes de recherche nationaux ou européens. L'objectif est de faire progresser les outils de diagnostic du risque (localisation des vides, techniques d'auscultation des structures souterraines, outils de diagnostic) mais également les solutions techniques permettant d'en assurer une gestion optimale (techniques innovantes de remblayage, étude de l'interaction sol-structure, outils de surveillance en grand). L'INERIS s'est par ailleurs investi dans la réalisation de Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPRN) et dans la rédaction de guides méthodologiques spécialisés (parution en 2002 d'un guide sur l'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines). ●

### Publication

■ **Tritsch J.-J., Toulemont M., Durville J.-L., Potherat P.** - Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. *Collection de guides techniques du LCPC*, 2002.

### TROIS EXEMPLES

Trois exemples représentatifs de l'activité récente dans le domaine des risques naturels ont été choisis pour illustrer la diversité d'approches et de domaines d'intervention des équipes de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol. Ainsi, pour répondre aux attentes des autorités appelées à gérer la problématique des effondrements de marnières, l'INERIS a initié, en partenariat avec le CETE de Rouen, une réflexion sur les mécanismes d'effondrement à l'aplomb de ces cavités. Le second sujet présente les capacités et l'expérience de l'Institut en matière de réalisation de PPRN liés à la présence de cavités souterraines abandonnées. Enfin, le troisième thème illustre un travail de recherche à caractère appliqué entrepris sur la problématique de la stabilité de versants rocheux.

# Stabilité des cavités souterraines : Le cas des marnières

Jean-Jacques TRITSCH

Les marnières sont des carrières souterraines abandonnées de dimensions limitées, d'une vingtaine de mètres d'extension pour 2 à 3 mètres de hauteur en moyenne. Elles sont néanmoins susceptibles d'induire des désordres en surface et de mettre en péril les personnes et les biens. Les phénomènes observés se manifestent surtout par des effondrements localisés de type fontis et des débouffrages de puits. Si ces instabilités se développent majoritairement dans des champs cultivés, elles peuvent également affecter des habitations et des infrastructures routières. De fait, on recense dans l'histoire plusieurs cas d'accidents corporels.

Les départements du Nord-Pas-de-Calais et de la Basse-Normandie ainsi que la région Picardie sont fortement affectés par ce risque. Mais c'est surtout la Haute-Normandie qui est la plus exposée avec un nombre de marnières estimé à 100 000, soit une concentration d'environ 10 marnières au km<sup>2</sup>.

Au cours de ces dernières années, l'augmentation de la fréquence des effondrements de marnières a contribué à rendre la thématique particulièrement sensible et prioritaire pour les autorités. Si l'on estimait à 4 le nombre d'instabilités induites chaque année par les marnières au cours des années 1980, il a atteint un maximum de 20 effondrements en une seule journée au cours du printemps 2001.

L'analyse menée avec la collaboration du CETE (Centre d'Étude Technique de l'Équipement) de Rouen sur une quinzaine de cas d'effondrements les mieux documentés parmi les 8 500 recensés dans la base de données, a permis de montrer que les phénomènes de rupture des terrains à l'aplomb des marnières se traduisaient par des accidents localisés en surface, généralement peu étendus à l'extérieur des limites de la cavité. Une analyse statistique des désordres a mis en évidence deux

zones d'effets, définies par deux angles d'influence, respectivement de l'ordre de 10° et 30°, pris par rapport à la verticale. Si la zone centrale peut s'avérer potentiellement dangereuse pour les personnes, la zone périphérique semble être le siège d'effets modérés de type tassements de sol, éventuellement dommageables pour les structures mais non dangereuses pour les personnes. Ces premières conclusions apportent des indications intéressantes en terme de prise en compte du risque sur le plan de l'urbanisme. Devant le faible nombre de cas étudiés, elles doivent toutefois être prises avec précaution et mériteront d'être validées et complétées à l'avenir, au cas par cas, en valorisant les retours d'expérience des futurs désordres convenablement renseignés (archives disponibles sur l'exploitation avant effondrement). ●

# 100 000

LA HAUTE-NORMANDIE EST LA  
RÉGION LA PLUS EXPOSÉE AVEC  
UN NOMBRE DE MARNIÈRES  
ESTIMÉ À 100 000, SOIT UNE  
CONCENTRATION D'ENVIRON  
10 MARNIÈRES AU KM<sup>2</sup>

# Réalisation d'études d'aléas dans le cadre de PPRN «Mouvements de terrain»

Jean-Marc WATELET

En application de l'article L.562 du Code de l'Environnement et conformément au décret 95.1089 du 5 octobre 1995, l'État élabore et met en application des Plans de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPRN). Ces plans ont pour objectifs de délimiter les zones exposées et de définir les mesures de prévention pour les aménagements existants et futurs. Dans le cadre des études techniques nécessaires

à l'établissement du zonage réglementaire, l'INERIS a réalisé, en 2002, plusieurs analyses d'aléa dans le cadre de PPRN «Mouvements de terrain», notamment sur le territoire de plusieurs communes de Picardie touchées par des effondrements de cavités dus à la remontée de la nappe phréatique.

La phase de recueil de données a permis

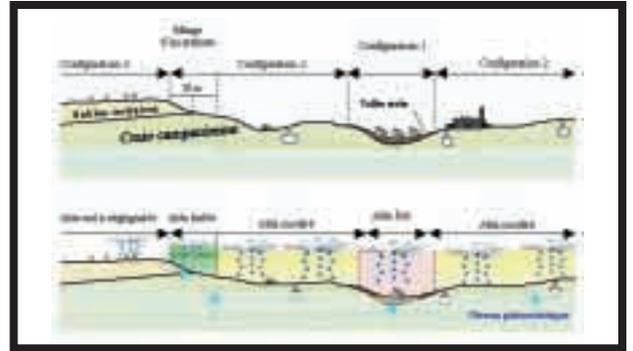
●●● suite page 74



de juger de l'extension des cavités à l'origine du risque et d'identifier les différentes configurations qui les caractérisent. Elle a également contribué à recenser les phénomènes redoutés ainsi que les principaux facteurs d'initiation ou d'aggravation. La hiérarchisation de l'aléa a ensuite été effectuée en fonction de la prédisposition du site vis-à-vis d'un type de rupture donné. Dans le cas des effondrements, il convient de considérer le comportement des ouvrages souterrains à très long terme. De fait, l'analyse a privilégié les conditions climatiques extrêmes susceptibles de provoquer une accélération des mécanismes de dégradation fragilisant les ouvrages.

En aval de cette phase de hiérarchisation de l'aléa, l'INERIS participe aux groupes de pilotage technique mis en place par la préfecture pour l'établissement des zonages réglementaires et la rédaction des règlements correspondants. La connaissance précise des mécanismes de rupture et des conséquences des éventuelles instabilités constitue en effet

un atout important dans la définition des mesures de prévention et de protection les plus efficaces et adaptées au contexte. ●



Coupes schématiques présentant l'aléa en fonction des configurations.

## Auscultation et surveillance d'un versant rocheux dans les Alpes-Maritimes

Yann GUNZBURGER

Le 13 mai 2000, en plein après-midi, 3 000 tonnes de rochers se détachaient de la falaise des Rochers de Valabres qui surplombe la vallée de la Tinée (Alpes-Maritimes) et s'écrasaient sur la route départementale qui longe le front rocheux. Cette chute ne fit aucune victime mais la route dut rester fermée durant cinq semaines, le temps de sécuriser les lieux.

Malgré les moyens considérables déployés, la falaise constitue toujours une menace potentielle qu'il semble difficile de maîtriser totalement. Dans les Gorges de Valabres, comme dans de nombreuses autres vallées encaissées, les versants sont le siège de déformations d'amplitudes et d'origines variées (précipitations, alternances de gel et de dégel, séismes... qui peuvent conduire à des ruptures catastrophiques. Les mécanismes en jeu étant encore mal compris et maîtrisés, les éboulements restent souvent très difficiles à prévoir. La persistance d'instabilités potentielles au sein des Gorges de Valabres et les facilités d'accès au site (une route désaffectée mène à son pied) ont conduit l'INERIS à choisir ce secteur pour en faire un «site-laboratoire».

L'objectif de la recherche est principalement méthodologique : il s'agit de comparer différentes méthodes, classiques ou novatrices, d'étude des mouvements de versants rocheux afin

d'en mesurer les potentialités et les limites. Le but final est de proposer des méthodes efficaces d'analyse, de surveillance et de gestion du risque. Le site doit être équipé en 2003, d'un système d'instrumentation (déformation, température, hydraulique, micro-sismicité...) permettant une auscultation continue de la falaise. Le choix et l'implantation des capteurs se sont appuyés sur des travaux de modélisation numérique dont l'objectif était de mieux cerner les mouvements potentiels. En retour, les mesures *in situ* permettront un calibrage et une validation des calculs en vue de l'élaboration d'un modèle global de comportement. En parallèle, plusieurs méthodes d'imagerie et de caractérisation mécanique du massif rocheux seront testées sur site.

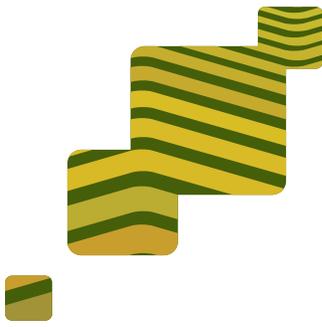
Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse de doctorat, en partenariat avec le LAEGO (École des Mines de Nancy). Plusieurs équipes de recherche participent aux études et travaux sur ce site expérimental. ●

### Publications

■ Merrien-Soukatchoff V., Gunzburger Y.  
Modelling a tool of investigation for landslide : the case of the Clapiere landslide (Southern Alps, France).

■ Gunzburger Y., Laumonier B.  
Origine tectonique du pli supportant le glissement de terrain de la Clapière (Nord-Ouest du massif de l'Argentera-Mercantour, Alpes du Sud, France) d'après - *Comptes Rendus Géosciences*, 2002, vol. 334, pp. 415-422.

LES VERSANTS ROCHEUX  
SONT LE SIÈGE DE  
DÉFORMATIONS  
D'ORIGINES VARIÉES  
QUI PEUVENT ENTRAÎNER  
DES EFFONDREMENTS  
IMPORTANTES



# Gestion de l'après-mine

**M**ines de fer, de charbon, de sel ou de potasse, mais aussi carrières souterraines de calcaire, de gypse..., durant des siècles la France a largement exploité les ressources de son sous-sol. Près de 3 milliards de tonnes de minerai ont été extraites du gisement ferrifère lorrain, nécessitant le creusement de plus de 40 000 km de galeries et créant des vides souterrains d'un volume global de plusieurs centaines de millions de m<sup>3</sup>. Ces chiffres soulignent l'ampleur des travaux réalisés dans les grands bassins miniers.

Une fois les ressources épuisées ou leur rentabilité amoindrie, les exploitations minières ont été progressivement arrêtées, voire abandonnées après la disparition des exploitants, sans qu'une attention suffisante ait été systématiquement portée sur les éventuelles conséquences, techniques et environnementales, inhérentes à cette cessation d'activité. De ce fait, de nombreuses régions et communes sont aujourd'hui exposées aux risques dits de l'après-mine.

Bien qu'ils puissent sensiblement différer suivant la nature des matières minérales extraites et des méthodes d'exploitation mises en œuvre, les principaux impacts et risques liés à l'arrêt de l'activité minière concernent : la stabilité des terrains de surface ; la ressource en eau, tant en terme qualitatif que quantitatif ; les émanations possibles de gaz de mine en surface ; la présence d'ouvrages miniers débouchant au jour (puits, descenderies et galeries), d'installations et de bâtiments industriels et, enfin, de dépôts de stériles et de résidus d'exploitation de surface.

### >Trois axes de recherche

L'acceptabilité de ces risques par la population est moindre aujourd'hui car l'industrie minière ne représente plus une source de revenus pour les communes et les habitants concernés alors que les besoins d'aménagement du territoire augmentent toujours. Il est nécessaire de développer et de structurer la recherche dans ce domaine pour prendre en compte la sensibilité croissante de la population vis-à-vis des problèmes de sécurité et de protection de l'environnement, et répondre à la demande sociétale d'une plus grande maîtrise des risques liés à la présence de nombreuses cavités souterraines artificielles. Les objectifs sont de mieux comprendre, analyser et modéliser les phénomènes élémentaires en jeu ainsi que les différents mécanismes qui peuvent intervenir et interagir, en prédire et en prévenir les conséquences techniques et socio-économiques, tout en garantissant la sécurité publique.

Les recherches menées par l'INERIS, notamment dans le cadre du Groupement de recherche sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains (GISOS), concernent plus particulièrement les trois axes suivants.

● Le comportement des terrains et l'impact en surface de l'évolution de l'état de stabilité des cavités et vides souterrains artificiels, en fonction du temps (fluage, fatigue, vieillissement des roches) et/ou sous l'influence de modifications des conditions hydrauliques qui règnent au sein du massif environnant.

Ces recherches supposent, entre autres, la mise en œuvre de simulations numériques qui, compte tenu de la complexité des différents mécanismes intervenant dans les phénomènes de mouvements de terrain, nécessitent le développement et la validation de modèles couplés hydromécaniques et hydrochimiques, calés sur les retours d'expérience et les résultats des essais réalisés en laboratoire et des expérimentations en vraie grandeur.

● L'impact des ouvrages souterrains et de la remontée des eaux, consécutive à l'arrêt des pompes d'exhaure minière,

●●● suite page 76

# 3 MILLIARDS

## PRÈS DE 3 MILLIARDS

## DE TONNES DE MINERAI

## ONT ÉTÉ EXTRAITES DU

## GISEMENT FERRIFÈRE

## LORRAIN, NÉCESSITANT

## LE CREUSEMENT DE

## 40 000 KM DE GALERIES

EN FRANCE DE  
NOMBREUSES RÉGIONS  
ET COMMUNES SONT  
AUJOURD'HUI EXPOSÉES  
AUX RISQUES DE  
L'APRÈS-MINE



sur la ressource en eau souterraine et la qualité des eaux de surface. C'est dans ce cadre que sont étudiés les mécanismes physico-chimiques et d'échanges gazeux au sein du milieu triphasique constitué par l'ensemble eau-roche-gaz caractérisé en laboratoire et dans un site expérimental réalisé dans une mine de fer arrêtée.

● L'évaluation et la gestion des risques liés aux ouvrages souterrains, dont l'une des principales difficultés réside dans leur interdépendance, ce qui confère à cet axe de recherche un caractère pluridisciplinaire d'autant plus marqué. L'objectif des recherches entreprises est d'intégrer les connaissances techniques actuelles dans une problématique de gestion qui permette une liaison opérationnelle entre les scientifiques et les décideurs.

### >Cartographie du risque

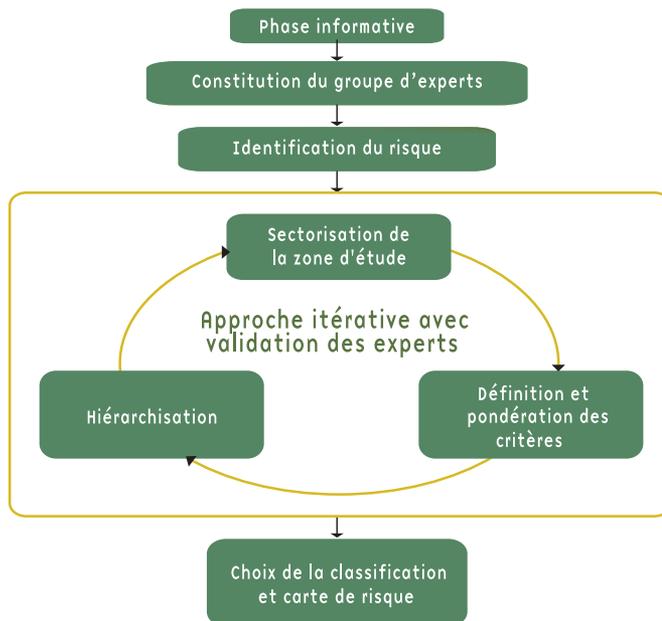
De la même façon que pour l'aléa et la vulnérabilité, une recherche de l'expression du risque, notamment sous forme graphique (Plans de Prévention des Risques Miniers, PPRM, et Systèmes d'Information Géographique, SIG) est engagée pour

pouvoir répondre aux besoins des différents utilisateurs potentiels (gestionnaires de risques, services de l'État, collectivités territoriales et locales...) et constituer des outils de communication, d'aide à la décision et à la gestion du risque dans le cadre des réflexions menées actuellement sur le développement durable des grands bassins industriels en voie de reconversion et l'aménagement futur du territoire.

Dans ce cadre, et en étroite liaison avec les travaux de recherche menés sur le comportement à long terme des terrains sous-minés, des travaux de recherche et développement sont réalisés sur différentes méthodes de détection et de suivi des mouvements de terrain à différentes échelles et de surveillance microsismique ou sismo-acoustique. Ces méthodes de surveillance en grand ont, en particulier, pour objectif non seulement de parfaire nos connaissances sur les phénomènes et mécanismes d'instabilité en jeu et leur mode de propagation jusqu'en surface, mais également de détecter et localiser précisément des signes physiques précurseurs de la défaillance des édifices souterrains et d'un effondrement de la surface. ●

## Méthodologie de hiérarchisation des zones à risque d'effondrement

Romuald SALMON / Myriam MERAD



Les sept étapes de la méthode globale d'analyse et de hiérarchisation des risques miniers résiduels

Les affaissements miniers survenus récemment en Lorraine, à l'aplomb de mines de fer abandonnées, ont provoqué d'importants dommages aux bâtiments et infrastructures de surface. D'une superficie d'environ 1 800 km<sup>2</sup>, le bassin ferrifère lorrain a été exploité pendant près d'un siècle, et jusqu'en 1997, en employant en plusieurs endroits la méthode des chambres et piliers qui peut avoir laissé des espaces vides sous les zones urbanisées. Cette situation implique la mise en place d'une stratégie de prévention basée sur l'analyse des risques. En France, des progrès importants ont été réalisés dans la maîtrise des risques engendrés par les mouvements de terrain grâce à une politique d'élaboration des «Plans de Prévention des Risques» (PPR). Cependant, alors qu'ils sont de plus en plus souvent disponibles dans les zones de carrières, les PPR en sont encore

au stade de lancement dans les zones minières. De larges étendues sous-minées, à l'aplomb de zones bâties ou d'infrastructures, doivent encore faire l'objet d'un affichage du risque. Jusqu'à présent, les cartographies de risques sont rares en raison de la difficulté d'évaluation quantitative de l'aléa et des dommages prévisibles, mais aussi du fait de la nécessité de faire appel, pour ces évaluations, à des connaissances très variées issues de disciplines différentes. L'analyse du risque d'effondrement minier pose un problème de décision dans un contexte complexe et incertain. Elle se place à la croisée de plusieurs disciplines telles que le génie minier, la

géographie, le génie civil, etc. Des méthodes d'aide à la décision permettent de pallier en partie ces difficultés. Dans ce contexte des risques liés aux affaissements miniers, l'INERIS a mis en œuvre une méthodologie de hiérarchisation de zones à risques, s'appuyant sur la méthode d'aide multicritère à la décision ELECTRE® TRI. Cette méthodologie a pour but d'affecter les zones concernées à l'une des quatre classes de risques définies par un groupe d'experts, auxquelles correspondent des dispositifs à mettre en place pour la surveillance de ces zones. Le principe global de cette méthodologie est présenté sur la figure de la page 76. ●

## Publication

■ Merad M., Roy B., Kouniali S., Verel T.  
- Méthodologie de hiérarchisation des zones à risques d'effondrement miniers.  
- 55th Meeting of the European working group Multicriteria Aid for Decision, 14-16 mars 2002, Leipzig, Allemagne.

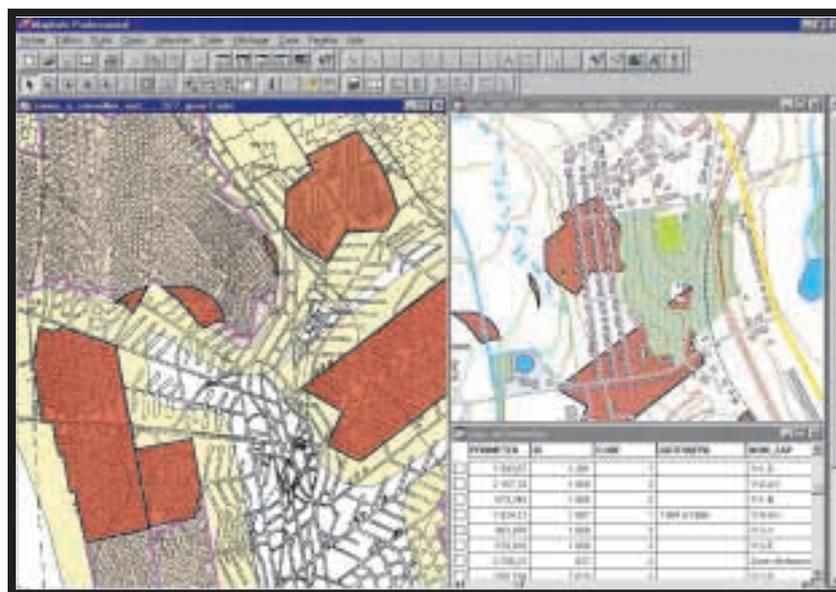
# Les SIG : un outil interactif d'analyse et de gestion des risques miniers résiduels «Mouvements de terrain»

Laurent CAUVIN

**A**fin d'évaluer la stabilité à long terme des anciennes exploitations minières du bassin ferrifère lorrain, l'INERIS a développé une méthode d'analyse et de cartographie de l'aléa et du risque basée sur les techniques SIG (Systèmes d'information géographique).

Dans ce bassin, la description des travaux miniers souterrains nécessitait la juxtaposition et/ou la superposition de centaines de plans miniers archivés sur papier. Face à cette problématique, l'INERIS a développé une technique permettant de positionner le plus précisément possible l'ensemble des données cartographiques disponibles afin de décrire au mieux les exploitations minières ainsi que les enjeux en surface. L'INERIS a notamment développé une méthode innovante de géoréférencement des plans miniers, après numéri-

●●● suite page 78



**Analyse sous Map Info® d'un secteur exploité par une ancienne mine de fer à l'aplomb d'une zone bâtie ; à gauche, analyse et sectorisation du plan minier, à droite, report de la sectorisation en surface et analyse des enjeux ; en bas, base de données attributaires associées au zonage.**



sation des plans originaux sur support papier. Après l'intégration des données cartographiques, une base de données constituée de couches d'informations géolocalisées a été créée afin d'identifier, d'analyser et de localiser les mécanismes d'instabilités susceptibles de se produire dans les travaux miniers. Ces phénomènes ont été hiérarchisés grâce à des méthodes multicritères d'aide à la décision du type ELECTRE, puis les résultats ont été intégrés au SIG comme attributs des différentes zones. L'utilisation d'un SIG a nettement facilité la classification et l'interprétation des données. Cet outil a également facilité la production de documents cartographiques et thématiques nécessaires à la bonne communication des résultats. À l'heure

actuelle, les SIG évoluent rapidement et permettent d'envisager des améliorations dans le traitement des données. Deux axes de développement sont envisageables.

Le premier est l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT), créés à partir de données altimétriques de la surface et du sous-sol, afin, par exemple, d'améliorer l'évaluation des profondeurs et donc d'affiner l'analyse des phénomènes redoutés en surface. Le deuxième est le développement de nouvelles méthodes de renseignement « terrain » des données stockées et analysées dans les SIG en particulier en utilisant les possibilités offertes par les techniques de positionnement par satellite de type GPS. ●

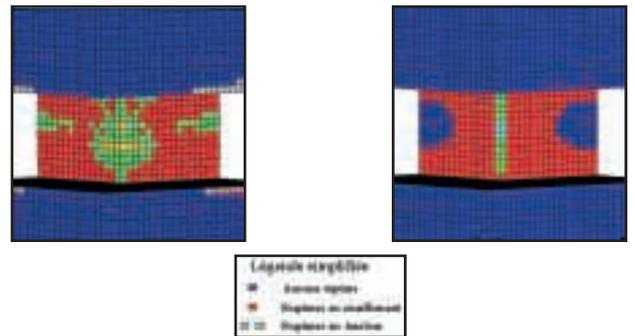
## L'apport de la modélisation numérique

Alain THORAVAL / Farid LAOUAFA

La prédiction du comportement à long terme des anciennes exploitations minières dépend de l'historique et des géométries d'exploitation. Elle est également liée aux phénomènes susceptibles de se produire au cours du temps, tels que le vieillissement des matériaux qui se traduit par une évolution de leur résistance mécanique ou l'engorgement des travaux miniers souterrains qui entraîne une modification des conditions hydriques.

Les modèles analytiques simples ne sont plus suffisants pour représenter et prédire le devenir de milieux complexes. En revanche, la modélisation numérique présente l'avantage de tenir compte des hétérogénéités (comme la présence de discontinuités), du comportement non linéaire des matériaux et du couplage entre différents processus (mécanique, hydraulique, thermique, etc.). S'agissant du comportement mécanique, la mise au point de modèles numériques pertinents permet, en particulier, une analyse et une compréhension relativement précises des mécanismes de déformation et des éventuelles ruptures pouvant survenir sur des ouvrages souterrains et dans les mines, pendant ou après l'exploitation. La pertinence de ces modèles dépend toutefois fortement de la qualité des données disponibles et nécessite, en conséquence, des essais de caractérisation et des mesures *in situ*. Les résultats de laboratoire et les observations de terrain ont permis à l'INERIS d'améliorer la représentativité des modèles de comportement.

À titre d'exemple, une simulation numérique a porté sur le comportement au cours du temps d'un pilier d'une ancienne mine de fer exploitée par la méthode des chambres et piliers abandonnés. Cet exemple illustre l'apport de la modélisation numérique par rapport aux modèles classiques qui ne peuvent pas reproduire de façon satisfaisante

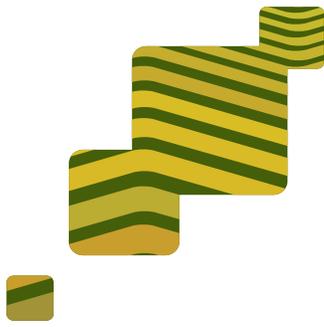


Calcul de l'état initial (gauche) et final (droite) d'un pilier abandonné d'une mine de fer à l'aide du code FLAC3D (les zones saines non plastifiées sont représentées en bleu).

l'évolution de la sollicitation et de la déformation du pilier au cours du temps. En effet, le modèle numérique simule de façon réaliste, comme l'attestent les observations effectuées *in situ*, l'évolution des zones en rupture (figure ci-dessus). ●

### Publications

- Souley M., Al Heib M., Thoraval A. Modélisation hydromécanique préliminaire d'engorgement d'un site dans le bassin lorrain.
- Souley M., Thoraval A., Goreychi M., Su K. Hydromechanical analysis of unsaturation process around a deep underground excavation. - *International Workshop in Geomechanics «THM Modelling in Deep Argillaceous Rocks»*, 22-24 mai 2002, Nancy.



# Auscultation et surveillance des ouvrages souterrains

**L**es enjeux soulevés par la gestion technique et scientifique des risques du sol et du sous-sol passent par une maîtrise complète des méthodes géotechniques et géophysiques d'investigation sur le terrain. Les exigences croissantes dans les domaines de la reconnaissance, du diagnostic à court terme ou du pronostic du comportement à long terme des ouvrages souterrains requièrent plus que jamais la mise en œuvre de méthodes de mesure innovantes, permettant de répondre aux besoins de l'expertise. Historiquement engagé dans cette compétence majeure, l'INERIS axe sa stratégie selon trois orientations principales.

● Première orientation : le développement constant de méthodes et outils de reconnaissance et d'auscultation appli-

**UNE MAÎTRISE COMPLÈTE  
DES MÉTHODES GÉOTECH-  
NIQUES ET GÉOPHYSIQUES  
D'INVESTIGATION SUR  
LE TERRAIN EST NÉCESSAIRE**

qués au diagnostic géotechnique d'ouvrages souterrains et à la quantification de l'aléa et du risque qui leur sont liés. En 2002, la mise au point et l'application avec succès sur le site expé-

riental de Tressange de la société Arbed (Groupe Arcelor) – en Lorraine – d'une sonde diagraphique ultrasonique à très haute résolution pour le diagnostic de l'état de pilier minier a démontré le potentiel de ce type d'outil nouveau. Le développement des logiciels TOMI, évoqué ci-après, appliqué à l'imagerie sismique d'auscultation, ou ROSAS, pour le suivi et le contrôle des variations à long terme des contraintes dans les massifs rocheux, représentent des progrès indéniables dans ce domaine.

● Seconde orientation : la conduite de travaux de recherche sur la phénomé-

nologie de rupture des roches et des instabilités en grand des massifs rocheux. Grâce à l'acquisition en 2001 d'un système de mesure ultrasonique très performant appliqué à la caractérisation des champs de contraintes et de déformations d'échantillons en laboratoire, un pas important a été franchi pour étudier et améliorer la compréhension des modes de comportement microscopique et intergranulaire des roches sous forte sollicitation mécanique. Un autre exemple, le projet européen, décrit plus loin, illustre cette application à l'échelle du massif rocheux.

● Troisième orientation : le développement permanent d'outils technologiques opérationnels appliqués à la télésurveillance des ouvrages souterrains. Déployée sur de nombreux sites depuis plusieurs années, la plateforme de télémessure microsismique SYTMIS® constitue, à ce titre, un exemple remarquable de développement technologique et scientifique performant transféré pleinement vers l'industrie et ses opérateurs, mais également mise en œuvre dans de nombreux projets scientifiques en cours. L'exemple de la surveillance expérimentale de la carrière de gypse de Grozon en décrit une application. ●



# Expérimentation en grand de surveillance des instabilités de falaises côtières

Gloria SENFAUTE

**TOUS LES PAYS EUROPÉENS DOTÉS D'UNE FAÇADE MARITIME SONT CONCERNÉS PAR LA PROBLÉMATIQUE DES EFFONDEMENTS DE FALAISES**

Les effondrements de falaises et le recul des côtes qu'ils engendrent soulèvent une problématique qui concerne tous les pays européens dotés d'une façade maritime. En France, particulièrement en Normandie, des effondrements massifs (plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup>) surviennent de manière récurrente et non prévisible. Le front maritime peut ainsi reculer brutalement de 2 à 3 mètres sur plusieurs dizaines de mètres de longueur. De nombreuses questions scientifiques restent ouvertes sur les mécanismes d'évolution de ces systèmes. C'est pour y répondre que le programme de recherche européen PROTECT\* a démarré en 2001. Ce programme est destiné à une expérimentation en grand, sur un site naturel, de techniques couplées d'auscultation et de surveillance de types géophysique, géotechnique et climatique. Le site choisi est la falaise de Mesnil-Val près du Tréport (Seine-Maritime). La reconnaissance de la falaise, la disposition et la taille des fractures ont permis le diagnostic du risque d'éboulement dans un délai *a priori* court.

## Des résultats prometteurs

Dès les premiers mois de surveillance après l'équipement du site en janvier 2002, des événements microsismiques sporadiques et associés aux ruptures du massif rocheux ont

été enregistrés. Le 23 juin 2002 à 3 heures du matin, le dispositif d'écoute microsismique a enregistré une série de signaux spécifiques de très faible énergie. Pendant la journée, l'enregistrement d'événements s'est poursuivi de manière accélérée jusqu'à l'occurrence d'un éboulement important et brusque, au centre de la zone instrumentée, entraînant l'effondrement de plus de 1 000 m<sup>3</sup> de blocs rocheux.

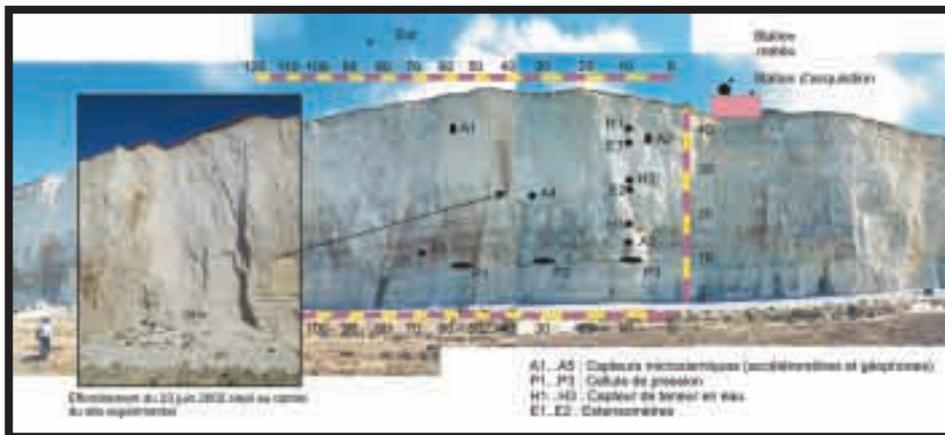
L'interprétation approfondie des données collectées a abouti à des résultats qui vont permettre de faire progresser les connaissances scientifiques sur des aspects essentiels liés à ces phénomènes. Le retour d'expérience de cette recherche permet d'étudier et de mieux comprendre les mécanismes d'évolution hydromécanique des massifs rocheux instables à long terme. Il permet également d'en dégager les enseignements utiles au dimensionnement des dispositifs de surveillance opérationnels des sites à risque d'instabilité mécanique. ●

\* Protect Prediction of the Erosion Cliffed Terrains (programme européen réunissant auprès de l'INERIS et du BRGM plusieurs partenaires danois, italiens et polonais).

## Publication

■ Busby J., Gourry J.C., Senfaute G., Pedersen S., Mortimore R. Can we predict coastal cliff failure with remote, indirect measurements? - *Proceedings of the International Conference «Instability, Planning and Management»*, 20-23 mai 2002, Ventnor, Isle of Wight, Angleterre, pp. 203-208.

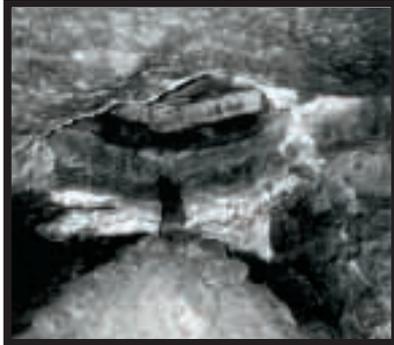
## TECHNIQUES D'AUSCULTATION ET SURVEILLANCE COUPLÉES GÉOPHYSIQUES, GÉOTECHNIQUES, CLIMATIQUES



Implantation du dispositif d'auscultation et de surveillance sur le front rocheux de Mesnil-Val. Photo insérée : vue de l'effondrement survenu le 23 juin 2002, à 19 heures.

# Expérimentation de méthodes de surveillance des instabilités de carrières souterraines

Cyrille BALLAND



**Fontis actif en front de carrière souterraine.**



**Mécanisme de soufflage actif de mur et de poinçonnement et fracturation de pilier.**

**A**fin de préciser le domaine d'application des méthodes de surveillance des risques liés aux carrières souterraines, il est nécessaire de procéder à des expérimentations permettant de tester et valider en conditions réelles les techniques développées.

Dans ce but, un secteur arrêté de la carrière de gypse de Grozon (Jura) exploité par la méthode des chambres et piliers abandonnés, a été sélectionné pour y conduire une expérimentation scientifique en grand. Les études de reconnaissance réalisées par l'INERIS ont permis d'identifier, d'une part, le risque significatif d'effondrement d'une zone multiniveaux avec des piliers fortement fracturés et mal superposés et, d'autre part, de nombreux fontis en cours d'évolution dans une autre zone distincte et située à plus faible profondeur. En partenariat avec la société BPB Placo, exploitant du site, deux réseaux de télémesures microsismiques, composés de différents types de capteurs, ont été installés en 2001 avec un double objectif :

- étudier les mécanismes de dégradation des ouvrages dans le temps ;
- tester les performances de la surveillance par l'écoute de bruits liés à la fracturation des terrains et à la chute de blocs. Cette expérimentation a permis de rassembler de nombreuses données scientifiques dont les résultats préliminaires sont prometteurs. La détection et l'enregistrement automatique des signaux acoustiques émis ont notamment fait l'objet de

traitements de localisation afin d'établir une carte des ruptures en corrélation avec les données visuelles relevées lors des visites d'inspection et de maintenance.

## >Points de faiblesse plutôt que vieillissement des roches

Pour la zone multiniveaux, la majorité des bruits relevés a été localisée dans l'intercalaire entre les deux couches exploitées, au droit de deux piliers mal superposés. Ces données montrent clairement que le mécanisme d'évolution de la zone, qui correspond dans ce cas au poinçonnement très localisé de la planche intercalaire et au soufflage du mur, n'est pas un mécanisme général diffus dû au «vieillissement» des roches exposées mais que le phénomène s'articule avant tout sur des points de faiblesse mécanique très précis liés à la géométrie et à la configuration des chambres et piliers. Le mécanisme général d'évolution d'une telle zone, dimensionnée à l'origine pour être stable à très long terme, repose donc sans aucun doute sur un cycle permanent de ruptures progressives isolées, à l'échelle d'un pilier, jusqu'à la ruine du volume concerné. Le transfert potentiel à d'autres zones de moindre faiblesse et localisées est en cours d'étude.

Pour la zone à fontis, les données enregistrées ont montré une concentration marquée autour d'un fontis qui a effectivement plus fortement évolué au cours du temps, selon un régime par palier.

À ce stade avancé de l'expérimentation, qui suit son cours, les résultats montrent que l'activité acoustique constitue un bon indicateur des modes d'évolution d'une carrière souterraine, dans le contexte géologique rencontré. ●

**L'ACTIVITÉ  
ACOUSTIQUE  
CONSTITUE UN  
BON INDICATEUR  
DES MODES  
D'ÉVOLUTION  
D'UNE CARRIÈRE  
SOUTERRAINE**



# Technique de tomographie appliquée au diagnostic des ouvrages souterrains

Franz LAHAIE

**D**ans le cadre des travaux scientifiques relatifs au comportement à long terme des ouvrages souterrains abandonnés, les techniques d'imagerie sismique à haute résolution appliquées au diagnostic d'ouvrages souterrains présentent des perspectives prometteuses.

À l'instar des techniques d'imagerie médicale, la tomographie sismique à haute résolution permet en particulier de constituer une cartographie précise du champ de vitesse des ondes

dans une zone-cible à l'échelle mésoscopique. En effet, dans le cas où les mesures sont réalisées dans un milieu rocheux homogène, la cartographie des vitesses retranscrit le champ de contrainte et l'état de fracturation de la zone considérée. Ces informations se révèlent fondamentales pour l'expertise pertinente de la stabilité de l'ouvrage. Sur le terrain, la tomographie sismique en champ proche est

néanmoins une opération complexe dont la phase d'analyse et d'interprétation, une fois les mesures obtenues, nécessite des outils sophistiqués de traitement des données. Pour ce faire, l'INERIS a développé le logiciel TOMI qui intègre l'état de l'art dans l'exploitation, la validation et le traitement par inversion de données tomographiques, y compris en milieu rocheux anisotrope.

## >Endommagement et déconfinement des parements du pilier

En 2001, la mise en œuvre de la technique de tomographie sismique sur un pilier tabulaire du site minier de Tressange, situé à environ 230 mètres de profondeur, a permis de construire une

image complète du champ de vitesse dans une section horizontale du pilier.

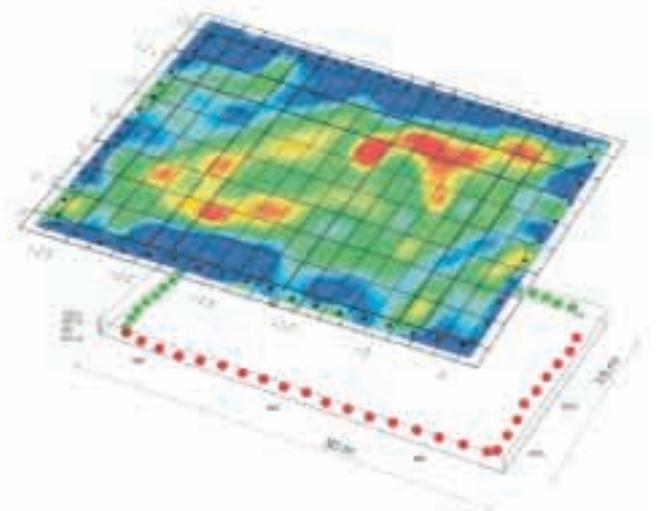
L'image tomographique traitée, visible sur la figure ci-dessous, indique clairement, sur le pourtour du pilier, la présence d'une bande régulière de 2 à 3 mètres de large où la vitesse des ondes est faible. Ceci révèle un endommagement et un déconfinement importants des parements du pilier, tandis que son cœur encaisse le champ de contrainte induit par les galeries et excavations voisines. L'orientation des fractures naturelles, le «fil de mine», apparaît de manière spectaculaire. Notons que ces résultats ont été confirmés par des mesures de contrainte et des diagraphies ultrasoniques. Bien que ce résultat soit prévisible qualitativement, la délimitation quantitative précise de l'état du pilier constitue une donnée d'entrée importante à la fois pour l'étude du risque de mouvements de terrain de la zone minière et pour la modélisation numérique du comportement à long terme de l'édifice. ●

## Publication

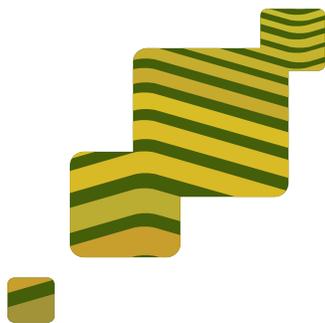
■ Balland C., Forny F., Pettit W.

Techniques d'instrumentation ultrasonique appliquées à la caractérisation de l'endommagement d'ouvrages - *Journée AGAP «Géophysique appliquée aux besoins du génie civil et de l'environnement»*, 7-8 novembre 2002, Nantes.

Images superposées du pilier tabulaire instrumenté et du champ de vitesse obtenu (isocontours). Les points rouges représentent les points sources (microcharges), les points verts, les capteurs accélérométriques.



L'IMAGERIE SISMIQUE  
À HAUTE RÉOLUTION  
PRÉSENTE DES PERSPECTIVES  
PROMETTEUSES POUR  
ÉTUDIER LE COMPORTEMENT  
DES OUVRAGES SOUTERRAINS



# Émanations de gaz souterrain

**L**es émanations de gaz en surface constituent un phénomène mal connu et difficile à apprécier. Ces émanations sont le plus souvent liées à des cavités souterraines naturelles ou anthropiques, à des anciennes mines ou encore à des dépôts de déchets. Elles peuvent conduire à différentes situations de risque accidentel, selon la nature et l'intensité de l'émission : inflammation, intoxication ou risque d'asphyxie. S'appuyant sur son expérience dans le

domaine minier, l'INERIS développe des compétences relatives aux émanations gazeuses en liaison avec le sol et le milieu souterrain. Des développements récents ont permis d'acquérir de nouvelles connaissances et de mieux apprécier les risques induits dans trois des cas parmi les plus problématiques en France :

- les mines de charbon fermées ou en cours de fermeture ;
- les anciennes mines de fer ;
- les dépôts de déchets ou d'ordures ménagères. ●

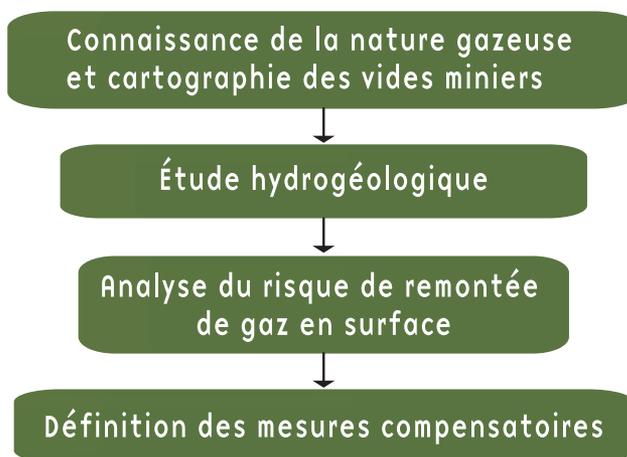
## Évaluation et prévention des risques d'émissions de gaz liés aux mines de charbon

*Candice LAGNY*

**L**es émissions gazeuses constituent un des problèmes majeurs de la mise en sécurité des mines de charbon en phase de fermeture. Un programme de recherche européen pluriannuel a été entrepris par l'INERIS sur ce sujet, financé par l'Union européenne et Charbonnages de France. L'un de ses principaux résultats est l'élaboration d'une méthodologie d'analyse des risques en surface liés au gaz. Cette méthodologie est fondée sur une synthèse du contexte géologique et des caractéristiques minières du gisement concerné.

Cette analyse suit les étapes de la figure ci-contre, la troisième étape de la démarche est la plus importante. Elle se compose de trois parties :

- L'évaluation du caractère grisouteux du gisement. Celui-ci est appréhendé au travers de la recherche d'informations quantitatives et qualitatives (accidents liés au grisou, classement administratif des chantiers...) et de la synthèse des données collectées tout au long de l'exploitation ;
- La localisation des zones pouvant piéger du gaz de mine. La localisation de ces zones est déterminée par : les résultats de l'étape précédente, mais aussi l'identification des travaux les plus superficiels et des structures géologiques ou tectoniques propices à l'accumulation ou à la migration de gaz vers la surface (anticlinaux, failles ...). Cette analyse est affinée en tenant compte de l'existence de bancs imperméables ou d'une nappe



**Démarche générale d'analyse du risque de remontée de gaz de mine vers la surface du sol.**

●●● suite page 84



## LE PROGRAMME EUROPÉEN CONDUIT PAR L'INERIS A PERMIS L'ÉLABO- RATION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RISQUES EN SURFACE LIÉS AUX ÉMISSIONS DE GAZ



aquifère qui pourraient faire obstacle aux remontées gazeuses. Cette étape aboutit à une carte des «zones susceptibles d'émettre du gaz de mine» ;

● L'identification et la localisation des zones à risque en surface : elles sont réalisées en superposant la carte précédente à la carte d'occupation de la surface afin d'identifier, parmi les zones potentiellement émettrices, celles qui sont occupées par des infrastructures ou par du bâti. Appliquée à un cas concret (exemple de la figure ci-dessous), cette analyse permet d'aboutir à une carte d'évaluation des risques.

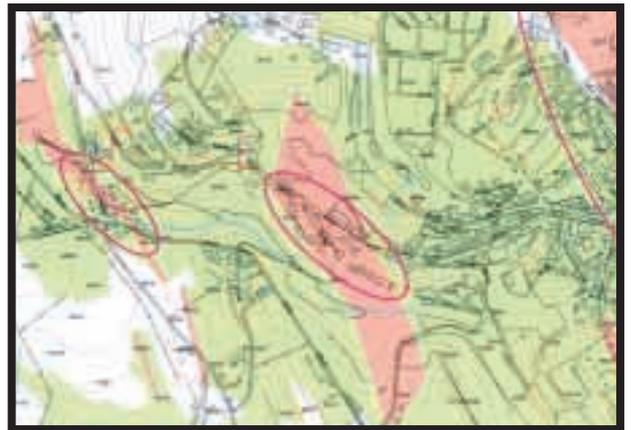
En présence d'un risque identifié, des mesures préventives ou de surveillance

devront être prises. En fonction du contexte, différentes mesures compensatoires classiques pourront être préconisées : le traitement des orifices miniers, la création d'exutoires sécurisés, l'exploitation des réservoirs de gaz ou la gestion de l'occupation de la surface. ●

### Publication

■ **Tauziède C., Pokryszka Z.**  
Évaluation du risque d'émission de gaz à la surface du sol par les anciennes mines de charbon et mesures préventives.  
- *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, 8-9 octobre 2002, Nancy.

**Exemples de cartographie résultant de l'analyse du risque dans un bassin houiller Français. En vert : zones exploitées ; en rose : zones susceptibles d'émettre du gaz de mine ; cerclées : zones à risque**



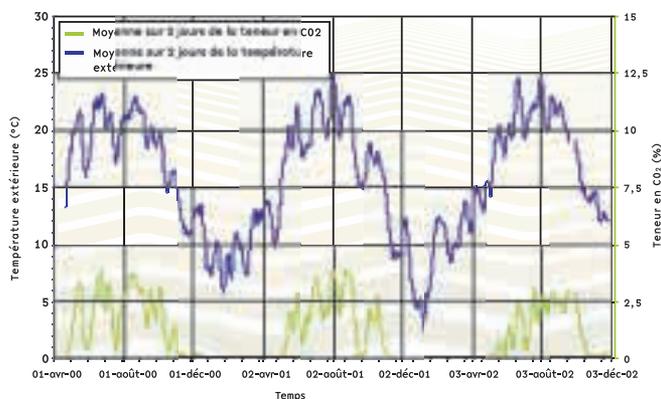
## Émissions de gaz dans les anciennes mines de fer

David GRABOWSKI / Zbigniew POKRYSZKA

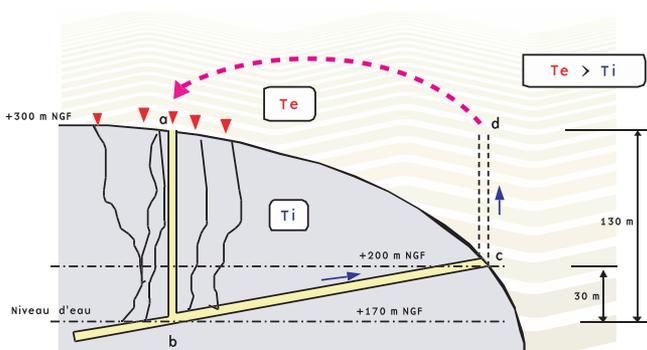
**L**une des rares études réalisées à ce jour sur les émissions gazeuses à partir des anciennes mines métalliques concerne le bassin ferrifère lorrain. Elle a permis de mettre en évidence des émanations de mélanges gazeux sous-oxygénés et chargés en gaz nocifs (dioxyde de carbone, radon), en relation étroite avec les vides laissés par des exploitations minières souterraines. Dans les zones les plus affectées, les

teneurs mesurées atteignent 6 % pour le CO<sub>2</sub>, 10 000 Bq/m<sup>3</sup> pour le radon et 13 % pour l'O<sub>2</sub>, pouvant ainsi présenter un risque d'asphyxie et d'intoxication pour les populations.

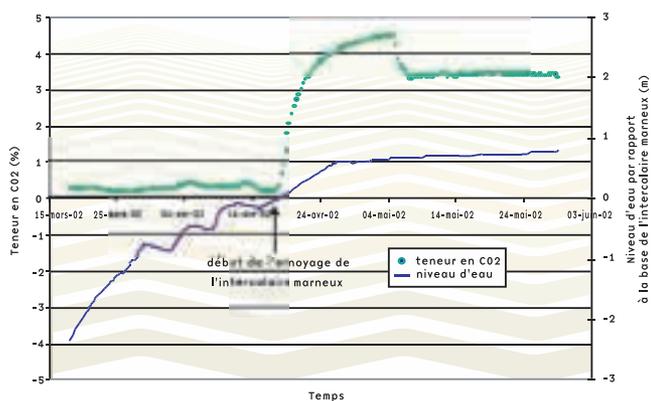
Afin de comprendre les mécanismes des échanges gazeux entre les anciens travaux miniers et l'atmosphère extérieure, deux stations de mesures ont été mises en place à l'entrée de galeries d'exploitation abandonnées pour acquérir en



1- Évolution de la température extérieure et de la teneur en CO<sub>2</sub>, mesurée à l'entrée d'une ancienne galerie d'exploitation.



2- Le tirage naturel thermique, mécanisme à l'origine de la circulation des gaz au sein des travaux miniers abandonnés.



3- Mise en évidence de la relation existant entre l'ennoyage des marnes pyriteuses et le dégagement de CO<sub>2</sub>, mesuré sur le site pilote de Tressange.

continu les paramètres suivants :

- l'intensité et le sens de l'écoulement de l'air ;
- la température du gaz émis ;
- les teneurs en certains composants du gaz (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, radon) ;
- la température et la pression barométrique extérieures.

Les résultats obtenus ont confirmé que les émissions d'air vicié sont bien liées à d'anciens travaux miniers. Les écoulements gazeux à l'origine des émanations sont animés par un phénomène de tirage naturel, dont le moteur principal est la différence de température existant entre l'extérieur et les zones de travaux sou-

terrains (figures 1 et 2).

Pour comprendre le mécanisme de production des gaz, un essai spécifique est en cours dans le cadre de l'expérimentation coordonnée par le GISOS, sur le site pilote de la mine de fer de Tressange (Moselle). Il vise à quantifier et à qualifier la production de gaz résultant de l'interaction entre l'eau et le massif rocheux, pendant et après l'ennoyage du site. Le dispositif est constitué de deux sondages accumulant des gaz produits au sein du massif rocheux et d'une station de mesure permettant de déterminer la composition du mélange gazeux accumulé.

Un mois après le début de l'ennoyage,

## LA PRODUCTION DE GAZ EST LIÉE À UNE SÉRIE DE RÉACTIONS CHIMIQUES METTANT EN JEU L'EAU (L'HUMIDITÉ), L'OXYGÈNE ATMOSPHÉRIQUE ET LA PYRITE PRÉSENTE AU SEIN DES MARNES

l'atmosphère mesurée s'est enrichie en CO<sub>2</sub>, et appauvrie en O<sub>2</sub>. Cette évolution coïncide avec l'ennoyage de l'intercalaire marneux, qui confirme l'hypothèse selon laquelle le phénomène est lié à une série de réactions chimiques mettant en jeu la pyrite présente au sein des marnes (figure 3).

Ces premiers résultats permettent de conclure que l'ennoyage de vides miniers du bassin ferrifère peut constituer un élément déclenchant une transformation dangereuse de l'atmosphère, observée dans certaines zones du bassin. ●

### Publication

■ Grabowski D., Pokryszka Z.  
Émissions gazeuses à partir de vides miniers dans le bassin ferrifère lorrain.  
- Actes du Colloque International Après-mine 2003, 5-7 février 2003, Nancy.

# GLOSSAIRE

**ADEME**

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

**ANDRA**

Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs

**BCRD**

Budget Civil de Recherche et de Développement

**BRGM**

Bureau de Recherches Géologiques et Minières

**CEN**

Comité Européen de Normalisation

**CETE**

Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement

**COMOBIO**

COmmunications MObiles et BIOlogie

**DOAS**

Differential Optical Absorption Spectroscopy

**DRIRE**

Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement

**EDR**

Évaluation Détaillée des Risques

**ENSIB**

Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Bourges

**ESREL**

European Safety & Reliability International Conference

**INPL**

Institut National Polytechnique de Lorraine

**INRA**

Institut National de la Recherche Agronomique

**INSERM**

Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

**LAEGO**

Laboratoire Environnement, Géomécanique, Ouvrages

**LIDAR**

Light Detection And Ranging

**OCDE**

Organisation for Economic Co-operation and Development

**PCRDT**

Programme-Cadre de Recherche et Développement Technologique

**RAMP**

Risk Assessment Mobile Phones

**REACH**

Système intégré d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des produits Chimiques

**SACARTOM**

Méthodes prédictives de caractérisation de la contamination de végétaux exposés à des sites pollués par des substances organiques

**TRANSPOL**

Intercomparaison et validation des codes de transports de polluants dans les sols et les eaux



**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](mailto:ineris@ineris.fr)

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