

INERIS

INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT
INDUSTRIEL ET DES RISQUES

Rapport Annuel et Scientifique 2000

INERIS

*INSTITUT NATIONAL DE L'ENVIRONNEMENT
INDUSTRIEL ET DES RISQUES*



Rapport

Annuel et

Scientifique

2000



Maryse Arditi

Pour l'INERIS, l'année 2000 s'est caractérisée par un développement de son activité autour de trois axes majeurs :

- la recherche, qui poursuit son développement ;
- l'expertise d'appui technique aux pouvoirs publics, en forte augmentation ;
- les interventions sur des sujets qui ont marqué l'actualité.

L'INERIS s'est davantage impliqué dans des projets de recherche européens, avec de premiers succès obtenus dans le cadre du 5^e PCRD. La poursuite du recrutement de scientifiques de haut niveau a également permis de lancer 11 nouveaux programmes. Dans le domaine des risques chroniques, on peut citer en écotoxicologie, le développement de biomarqueurs précoces de l'impact des substances chimiques et, en toxicologie, l'étude du risque lié aux éthers de glycols sur la reproduction. Dans le domaine des risques accidentels, les événements récents ont montré l'intérêt de disposer d'outils d'aide à la décision dédiés à différents modes de transport et notamment le ferroviaire. L'année 2000 a également été marquée par le renforcement des coopérations scientifiques de l'INERIS au niveau national, avec notamment l'ADEME, le BRGM, le CEMAGREF et plusieurs écoles d'ingénieurs et universités, au sein desquelles 17 doctorants ont été financés par l'INERIS. L'INERIS a consacré plus de la moitié de ses ressources à l'expertise d'appui technique aux pouvoirs publics. C'est ainsi que GEODERIS, pôle technique et scientifique, a été créé en partenariat avec le BRGM pour gérer les risques liés aux anciennes exploitations minières. Les équipes de l'INERIS se sont fortement mobilisées sur les programmes liés à la gestion des suites d'accidents. En ce qui concerne l'*Erika*, il s'agissait d'évaluer les risques sanitaires à long terme pour les bénévoles qui ont participé au nettoyage des côtes sinistrées. Une équipe de 15 personnes a mené à bien ce travail qui a donné lieu à la publication, sur le site web de l'INERIS, de sept rapports d'expertise.

L'INERIS a aussi participé à l'évaluation des risques sanitaires et d'explosion après l'accident du chimiquier *Ievoli Sun*. Il est intervenu en Roumanie après la pollution accidentelle du Danube et en Turquie après le séisme d'Izmit.

En août 2000, l'INERIS a été certifié ISO 9001 par l'AFAQ. L'INERIS, qui est désormais le premier organisme de cette nature à être certifié, sera en mesure de renforcer la qualité et la compétitivité des prestations qu'il développe. Cette certification a été obtenue grâce à l'ensemble du personnel, qui a su s'impliquer fortement dans cette démarche. Dans le domaine des atmosphères explosibles, l'INERIS a créé la certification Saqr-ATEX destinée aux réparateurs de moteurs et équipements présents dans ces atmosphères. Pour compléter son expertise, il a aussi développé de nombreux programmes de formation.

Enfin, deux éléments indispensables à la reconnaissance de l'INERIS ont été achevés cette année : la charte de déontologie et le contrat d'objectifs approuvé le 28 septembre par le conseil d'administration et qui sera signé par le ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement au courant du premier semestre 2001.

En 2000, grâce au financement du MATE, le budget de l'INERIS s'est accru de 5 % ; les prestations délivrées aux industriels sont, elles, restées stables. Les financements d'investissements accordés cette année ont permis de poursuivre la modernisation des installations et d'acquérir un LIDAR, outil nécessaire à l'INERIS pour rester à la pointe de la métrologie de la qualité de l'air. Les effectifs se sont fortement accrus (+ 35 personnes), ce qui témoigne du dynamisme de l'Institut et de la confiance des pouvoirs publics.

Ainsi, le bilan de l'année 2000 montre que le projet INERIS 2002, élaboré en 1998, est en bonne voie de réalisation. Pour le mener à bien, l'INERIS va continuer à développer la recherche, qui doit représenter, à terme, un tiers de son activité, poursuivre l'élargissement de ses collaborations, en particulier européennes, et renforcer encore ses compétences.

Maryse ARDITI
Présidente du conseil
d'administration



Georges LABROYE
Directeur général



Georges Labroye

Avis aux lecteurs

Le Rapport Annuel et Scientifique a pour mission, outre la présentation de l'INERIS, d'illustrer par des exemples les travaux de recherche conduits au sein de l'Institut.

Répartis en trois rubriques représentatives de nos domaines de compétence, ces textes présentent quelques-uns des résultats les plus marquants, tout en précisant les moyens techniques et scientifiques utilisés. Il n'est que l'un des modes de diffusion de nos travaux, que complètent par ailleurs des colloques, conférences, publications et rencontres scientifiques.

Les prestations commerciales pour les industriels ou les collectivités locales ne sont pas traitées dans ce rapport.

Les versions intégrales de ce document, en français et en anglais, sont accessibles sur le site Internet de l'INERIS : <http://www.ineris.fr>.

Pour contacter les experts de l'INERIS cités en tête de chaque rubrique, utiliser la syntaxe *Prénom.Nom@ineris.fr*.

La Direction Scientifique

CONSEIL D'ADMINISTRATION	6
CONSEIL SCIENTIFIQUE	6
COMMISSIONS SCIENTIFIQUES	7
BILAN FINANCIER	8
ORGANISATION-RESSOURCES HUMAINES	10
L'INERIS ET LA FORMATION	12
L'INERIS ET LA RECHERCHE	14
L'INERIS ET L'EXPERTISE	16
RISQUES CHRONIQUES	17
■ Essais interlaboratoires de mesures de polluants gazeux à l'émission	18
■ Hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant: six années d'expérience	23
■ Étude pilote de l'exposition totale de populations urbaines aux aldéhydes	28
■ Développement et validation d'un marqueur biologique des œstrogènes mimétiques: la vitellogénine	31
■ Évaluation de l'écotoxicité des déchets	39
■ Évaluation des risques sanitaires et environnementaux liés au naufrage de l'Erika	44
■ Apport méthodologique pour la réalisation de diagnostics environnementaux de zones d'activités	48
RISQUES ACCIDENTELS	53
■ Feux industriels en milieu confiné	54
■ Caractérisation de l'environnement électromagnétique industriel	60
■ Méthodologie d'analyse des risques d'appareil pour atmosphères explosives	63
■ Intégration de l'aspect organisationnel dans l'évaluation des risques majeurs	66
■ Effets du séisme d'Izmit sur les infrastructures et les installations industrielles	70
RISQUES SOUS-SOL	75
■ Optimisation de la localisation des sources microsismiques liées au creusement d'ouvrages souterrains	76
■ Impact des sites pollués sur les eaux souterraines: modélisation de la migration des polluants	81
■ Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines	87

Conseil d'administration

Présidente du CA

Maryse ARDITI

Maître de conférences, université Paris-VII

Commissaire du Gouvernement

Philippe VESSERON

Ministère chargé de l'Environnement
Commissaire du Gouvernement

Administrateurs

REPRÉSENTANTS DE L'ÉTAT

Hugues MALECKI

Ministère chargé de la Santé

René FEUTEUN

Ministère chargé de la Sécurité civile

Patrick SOULÉ

Ministère chargé du Budget

André GASTAUD

Ministère chargé des Transports

Rose-Agnès JACQUESY

Ministère chargé de la Recherche

Benoît LESAFFRE

Ministère chargé de l'Environnement

Eugène TROMBONE

Ministère chargé de l'Industrie

Marie-Thérèse VALAT-TADDEÏ

Ministère chargé du Travail

PERSONNALITÉS QUALIFIÉES

François BERTRAND

Houillères du Bassin de Lorraine

René DANIERE

France Nature Environnement

Michel FRANCK

Chambre de Commerce
et d'Industrie de Paris

Michel HENRY

Commission Environnement
de la Fédération des industries
mécaniques

Georges-Yves KERVERN
TACTIC

Dominique BILLEBEAUD

Union française des industries
pétrolières

Jean-Michel UYTTERHAEGEN

Union des industries chimiques

REPRÉSENTANTS DU PERSONNEL

Philippe CASSINI

Sylvain DEGAUGUE

Didier GASTON

Thomas HERPIN

Alain JODART

Daniel MORAINVILLERS

Bernard BARTET

Vice-présidente du CA

Martine RAMEL

Représentante du personnel

Contrôleur d'État

Alain BOURNAZEL

Ministère chargé du Budget
Contrôleur d'État

Conseil scientifique

MEMBRES FRANÇAIS

Michel AFFHOLDER
SIAAP

Jean-Claude ANDRÉ
INRS

Jacques AUMONIER
NOVARTIS FRANCE SA

Georges BONNIER
BNM-INM

Gérard CHOUX
TOTALFINA

Francis DEWERDT
GDF

Christian ELICHEGARAY
ADEME

Christian FOUILLAC
BRGM

Philippe HUBERT
IPSN

Michel JOUAN

Pierre JOULAIN
ENSMA

Jean-Pierre LIBERT
Université de Picardie

Alain PAVÉ
CNRS - UMR 5558

Sylvain RAULT
Université de Caen

Claudine SCHMIDT-LAINÉ
CEMAGREF

Henri VIELLARD

Préfecture de police - Laboratoire central

Jean-Luc WYBO

École des Mines de Paris

MEMBRES ÉTRANGERS

Jean LE GUEN
Head of Risk Policy Unit
HSE (GB)

Pr Dominique LISON
Université catholique de Louvain (B)

Hans PASMAN
Directeur - *Defence Research* - TNO
(NL)

Pr Otto RENTZ
Directeur de l'Institut franco-allemand
de recherche sur l'environnement

Commissions scientifiques

Risques chroniques

MEMBRES FRANÇAIS

Claude ALZIEU
IFREMER

Marc BABUT
CEMAGREF

Jacques DESARNAUTS
ATOFINA

Philippe GARRIGUES
UPS 831 CNRS

Pr Marcel GOLDBERG
Institut de Veille Sanitaire

Claude LESNÉ
IRHC-CNRS

Patrick LÉVY
RHODIA Corporate

Jean-Marie MUR
INRS

Pr Alain NAVARRO
Association RE.CO.R.D.

Patrick SEBASTIEN
Saint-Gobain

Paule VASSEUR
EBSE, UFR Sci F.A.

Pr Jean-Pierre WOLF
Université Claude-Bernard (Lyon-I)

Denis ZMIROU
Université Joseph-Fourier (Grenoble-I)

MEMBRES ÉTRANGERS

Christian BLAISE
Centre Saint-Laurent/Région du Québec (CDN)

Pr Michel GUILLEMIN
Institut universitaire romand de Santé au travail (CH)

Pr Joseph TARRADELLAS
École polytechnique fédérale de Lausanne (CH)

Risques accidentels

MEMBRES FRANÇAIS

Patrice BAILLY
ENSI Bourges

Jean-Pierre BIGOT
École nationale supérieure des Mines

Alain DESROCHES
CNES

Daniel FULLERINGER
IPSN/DES/BAIN

Francine KERAVAL
Réseau ferré de France

Gérard LABADIE
EDF

Didier LACROIX
CETU

Jean-Pierre LANGUY
TECHNIP

Pr André LAURENT
ENSIC-INPL

Anne LEPRINCE
Gaz de France

Commandant GARIOUD
Institut National d'Études de la Sécurité Civile

Yvan VEROT
ATOFINA

MEMBRES ÉTRANGERS

Pieter De GELDER
AVN-Vinçotte Nucléaire (B)

Neil MITCHISON
Institut des systèmes d'informatique et de la sécurité (I)

Pr SCHECKER
Université de Dortmund (D)

Dr Simon SHIELD
Shell Research Ltd. (GB)

Risques sol et sous-sol

MEMBRES FRANÇAIS

Albert ARMANGUÉ
BPB Placo

Claude BAGREL
COLAS

Patrick BRETIN
SOGEREM

Pierre DESIDERI
HBL - UCAD

Jean-Yves DUBIÉ
EDF

Bernard FEUGA
BRGM

Mehdi GHOREYCHI
École polytechnique

Pho HOANG TRONG
Université Louis-Pasteur

Jean LAMBERTI
RHODIA Corporate

Jean-Pierre MAGNAN
LCPC

Jean-Luc NARCY
COGEMA

Dimitri SPOLIANSKY
Inspection générale des carrières de la Mairie de Paris

François SCHLOSSER
Pr Gérard VOUILLE
École des Mines de Paris

MEMBRES ÉTRANGERS

François DESCOEUDRES
École polytechnique fédérale de Lausanne (CH)

Mathieu VESCHKENS
ISSEP (B)

Poursuite de la consolidation financière

A la faveur d'une croissance retrouvée, tant au niveau de l'économie nationale que de l'Institut lui-même, la consolidation

financière se poursuit, avec un résultat positif de 3 759 kF en 2000 et un nouvel accroissement des fonds propres.

Structure des ressources

En s'appuyant sur un effort croissant de recherche en matière de sécurité environnementale, l'INERIS fournit aux pouvoirs publics un appui technique et une expertise de référence. De plus, il propose aux entreprises et aux collectivités des prestations de haut niveau contribuant à la prévention des risques.

La structure des ressources de l'Institut reflète celle de ses missions, et leur évolution globale (+ 5,3 % en 2000) reflète, quant à elle, la préoccupation croissante de la société face aux problèmes de sécurité environnementale.

- La recherche est progressivement identifiée en termes de financement, avec la contribution du Budget Civil de

Recherche et de Développement (BCRD) (13 MF en 2000). L'effort de recherche de l'INERIS se concrétise également dans le cadre de projets européens bénéficiant de financements PCRDT (programme-cadre de recherche et de développement technologique) et CECA.

- L'État (ministères, agences nationales) finance, par des subventions ou par des contrats et des conventions, l'appui technique qu'il sollicite et contribue au financement de certains coûts d'infrastructures. L'ensemble des financements de cet appui technique aux pouvoirs publics représente 44,9 % des ressources de l'INERIS.

Structure des dépenses

Les dépenses de l'INERIS se caractérisent par :

- la part majoritaire des dépenses de personnel (56 %) ;
- la croissance des dépenses externes de recherche,

notamment pour le financement de thèses en liaison avec les universités et les écoles associées à l'INERIS dans des programmes scientifiques.

Investissements

Les investissements mobiliers et immobiliers se sont élevés en 2000 à 21,9 MF, soit 8,1 % du budget de l'INERIS. L'attribution à l'INERIS par l'État d'une subvention d'investissement d'autorisation de programme (30,9 MF en 2000) a été consacrée pour une large part à la mise en œuvre de

la modernisation des infrastructures scientifiques et techniques de l'Institut et à l'acquisition de moyens de recherche sophistiqués (par exemple, le véhicule-laboratoire LIDAR pour l'étude de la pollution atmosphérique).

Compte d'exploitation et bilan simplifiés

Les tableaux ci-dessous résument l'évolution du compte des résultats et du bilan sur les exercices 1999 et 2000 (en kF hors taxes), qui traduit une amélioration progressive de l'équilibre financier structurel de l'Institut.

Recettes	1999	2000
Prestations aux entreprises	83 685	86 031
État et régions	131 569	145 228
<i>dont BCRD</i>	6 775	5 490
<i>dont prestations sur contrats</i>	24 924	23 766
Union européenne	4 085	4 161
Autres produits	21 407	18 167
Produits financiers	255	317
Produits exceptionnels	19 574	20 646
TOTAL	260 575	274 550

Dépenses	1999	2000
Achats	24 278	28 776
Charges externes	46 535	48 146
Impôts et taxes	9 326	10 258
Charges de personnel	139 734	148 393
Charges d'amortissement	28 137	27 475
Charges de gestion courante	222	1 243
Charges financières	4 470	4 316
Charges exceptionnelles	2 100	2 184
TOTAL	254 802	270 791

Résultat	5 773	3 759
----------	-------	-------

Actif	1999	2000
Actifs incorporels	14 429	9 325
Actifs corporels	120 614	131 689
Actifs financiers	1 427	1 334
Stocks et en-cours	10 078	9 238
Créances	136 543	169 580
Disponibilités	6 475	12 266
Charges const. d'avance	990	1 097
TOTAL	290 556	334 529

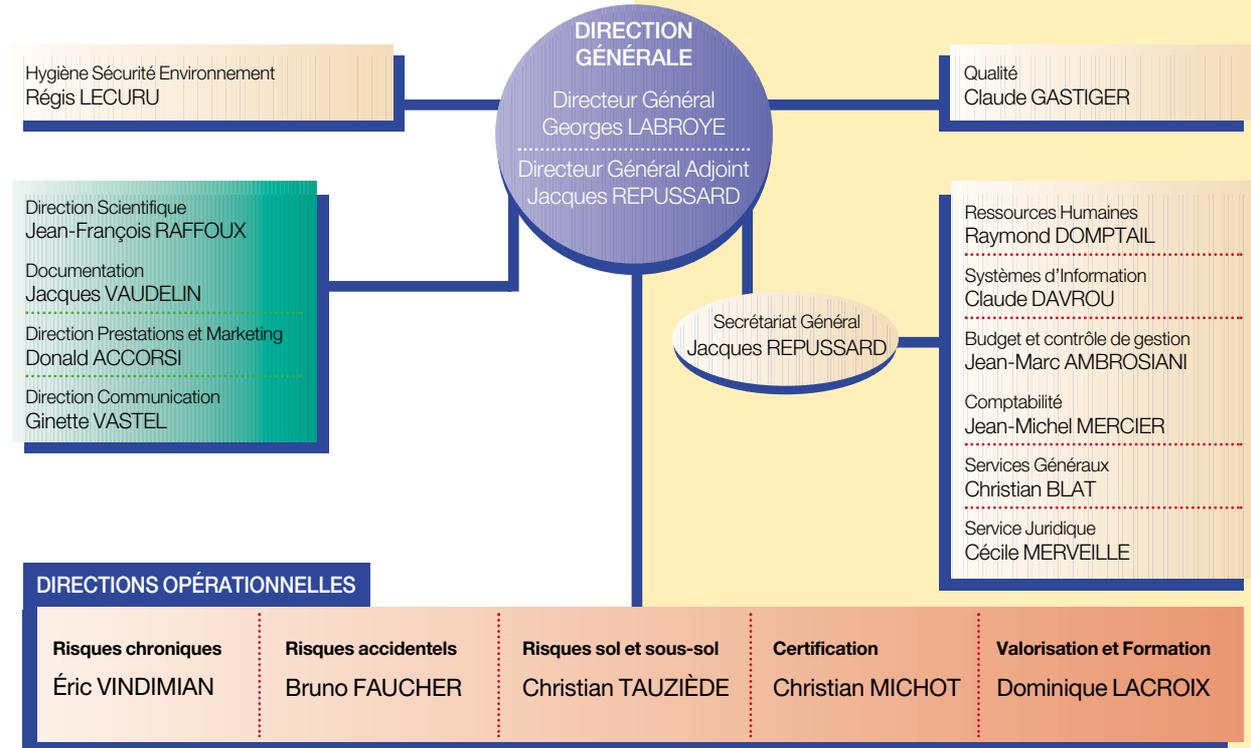
Passif	1999	2000
Capitaux propres	134 297	173 458
<i>dont Résultat</i>	5 773	3 759
Provisions pour charges	1 978	437
Dettes financières	85 485	78 129
Dettes d'exploitation	59 054	74 587
Dettes diverses	5 804	2 854
Produits const. d'avance	3 938	5 064
TOTAL	290 556	334 529

ORGANISATION

Depuis mai 1999, l'Institut s'organise autour de cinq grands pôles opérationnels chargés de mener à bien les programmes de recherche et de développement, de fournir l'appui technique et l'expertise nécessaires aux pouvoirs publics et de réaliser les prestations demandées par les entreprises.

- Trois directions se partagent l'évaluation et la prévention des risques accidentels, des risques chroniques et de ceux liés au sol et au sous-sol.

- La Direction Certification assure les essais officiels de conformité de produits et de matériels ayant une incidence sur la sécurité environnementale.
- La Direction Valorisation-Formation a pour mission d'assurer une large diffusion du savoir-faire de l'Institut en matière de prévention des risques.



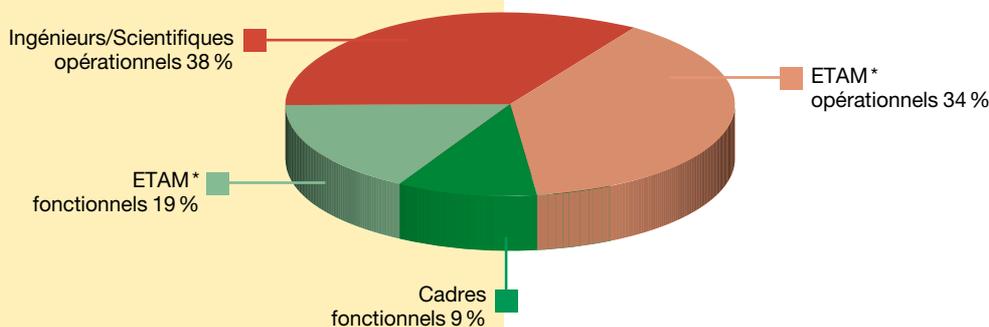
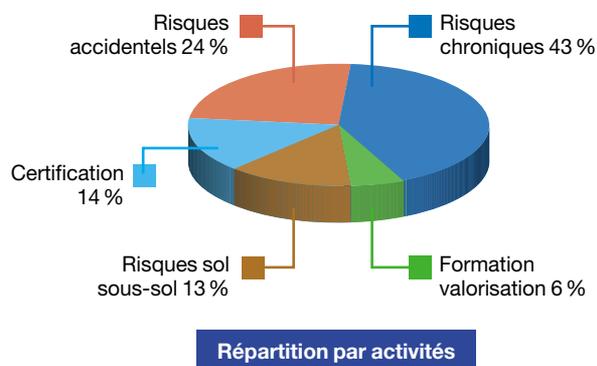
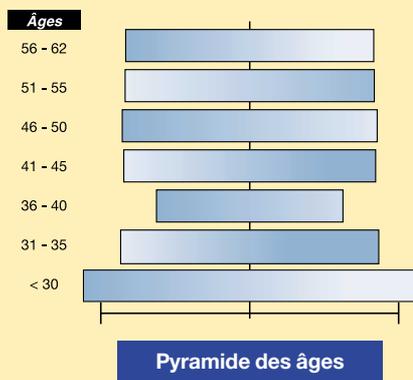
RESSOURCES HUMAINES

La politique de ressources humaines menée en 2000 a été celle du développement. Le développement quantitatif, d'une part, avec un effectif en augmentation de 26 personnes, un *turnover* accru, donc d'importants recrutements (35 ingénieurs et 13 techniciens) afin d'atteindre les effectifs nécessaires à la croissance de nos activités attendue des pouvoirs publics. Le développement qualitatif, par ailleurs, avec le lancement d'un Plan de Progrès pour la gestion des ressources humaines mobilisant tant la Direction des Ressources Humaines que l'encadrement.

Au 2 mai 2001.

L'objectif poursuivi est de mieux employer et développer les compétences des personnes dans l'intérêt collectif et individuel. Début 2001, l'INERIS compte 453 salariés, avec 47 % d'ingénieurs et de chercheurs, auxquels s'ajoute une vingtaine de doctorants. Le taux de féminisation des effectifs est de 39 %. L'essentiel du personnel se situe à Verneuil-en-Halatte (Picardie). Ces équipes sont appuyées par six délégations régionales et deux laboratoires, intégrés respectivement à l'École des Mines de Nancy et à l'École d'Ingénieurs de Bourges.

Répartitions des effectifs



Formation du personnel

Le pourcentage de la masse salariale allouée à la formation interne reste stable (environ 5 %), mais des tendances fortes apparaissent : le nombre de stagiaires a doublé en quatre ans, et le nombre d'heures en formation a été multiplié par quatre, sur la même période.

L'année 1999 avait annoncé cette évolution par une forte hausse du nombre de stagiaires et d'heures passées en formation. Cette tendance se confirme en 2000, avec la poursuite de la formation « Montée en puissance bureautique », alliée à la formation aux outils de gestion.

La formation, outil de gestion des Ressources Humaines à part entière, est entrée dans une démarche prescriptive et collective (lancement à grande échelle d'actions ciblées

telles que l'écrit et l'oral scientifique, les statistiques, la qualité, etc.), rendant visible la stratégie de l'Institut et permettant d'aller au-delà du simple transfert de compétences en créant les bases d'une culture commune.

	Ingénieurs / Scientifiques	ETAM *	Total
Hommes	133	103	236
Femmes	46	97	143
Total	179	200	379

Nombre de salariés ayant suivi au moins une formation.

* Employés, Techniciens, Agents de maîtrise.

Développer la formation

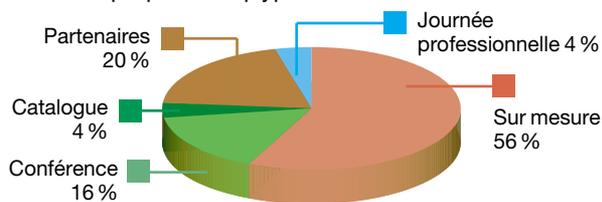
Les actions de formation existent depuis la création de l'INERIS, car il entre naturellement dans la vocation des experts et des chercheurs de contribuer à transmettre leur savoir-faire. De nombreux interlocuteurs sollicitent régulièrement les spécialistes de l'Institut pour donner des conférences, animer des stages, participer à la rédaction d'ouvrages pédagogiques. La formation et le conseil sur les thèmes de la sécurité environnementale concourent à part entière à la réalisation des missions de l'Institut. Ces activités doivent être organisées de manière à répondre plus efficacement aux attentes de l'État, des entreprises et des collectivités locales. Le développe-

ment de la formation passe par quatre types d'actions :

- renforcer la contribution de l'INERIS à la formation permanente des agents de la fonction publique compétents en matière de sécurité environnementale ;
- formaliser, développer et promouvoir l'offre de l'INERIS vers les entreprises, y compris les PME et PMI ;
- susciter une demande de formation au niveau des associations et des responsables des actions de sécurité environnementale dans les collectivités locales ;
- organiser la contribution de l'INERIS aux formations qualifiantes au plan national en matière de santé et d'hygiène-sécurité-environnement (HSE).

Des formations diversifiées

L'INERIS propose cinq types de formations.



Journées stagiaires par type de formation

- **Des formations sur catalogue.** L'Institut présente un catalogue d'une quarantaine de stages concernant le risque chronique et l'environnement, le risque accidentel, le management Qualité, Hygiène, Sécurité, Environnement, qui se déroulent sur le site de l'INERIS.
- **Des formations sur mesure.** Les experts de l'INERIS conçoivent des formations spécifiques adaptées aux besoins des clients. Quelques exemples : « Les mesures de polluants à l'émission », « Les risques liés aux matériaux pulvérulents », « Les risques industriels pour le personnel de maintenance », « La sécurité environnementale », « Les conséquences des incendies », « Le risque des

installations GPL », « La veille réglementaire », « Les risques d'inflammabilité », « L'évaluation des risques dans le cadre d'un système de management de la sécurité ».

- **Des formations en partenariat.** L'INERIS participe à l'animation des stages pour d'autres organismes de formation, en particulier le CFDE (les explosions de poussières, le matériel électrique en ATEX et l'analyse environnementale), l'AFNOR (la réglementation applicable dans le cadre des installations classées pour la protection de l'environnement [ICPE] et le management environnemental) et les chambres consulaires (CCI).
- **Des journées professionnelles.** Deux manifestations ont été organisées : une sur les explosions de poussières et une autre sur les atmosphères explosibles.
- **Un appui à l'enseignement supérieur.** Les écoles d'ingénieurs ou les universités proposent des formations aux métiers de l'environnement ou des cursus avec une spécialité environnementale. L'INERIS est intervenu auprès d'une dizaine d'établissements, essentiellement sous forme de conférences.

Des clients d'horizons divers

Nos clients se répartissent en trois grandes catégories.

- **Le secteur public.** Nous différencions, d'une part, les ministères et leurs administrations décentralisées ainsi

que leurs établissements publics, et, d'autre part, les collectivités dans leur ensemble et les organisations associées.

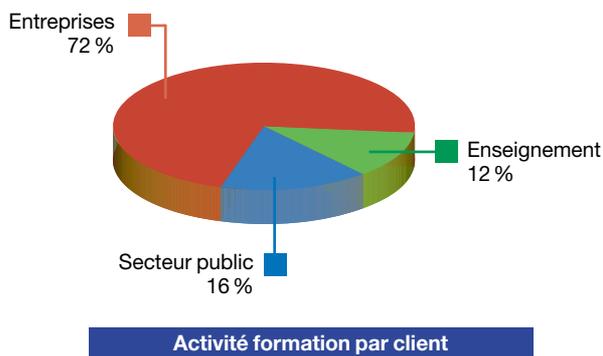
- **Les entreprises.** Nos formations concernent aussi bien les grands industriels que les PMI (avec l'appui des réseaux de CCI), les bureaux d'études que les sociétés de service.
- **L'enseignement.** Il s'agit des étudiants en formation initiale et des salariés en formation continue dans des cycles diplômants. Les écoles des Mines occupent une bonne place, ainsi que le CNAM, notamment au niveau des instituts d'hygiène industrielle et de l'environnement (IHIE), sans oublier les universités.

Des domaines très variés

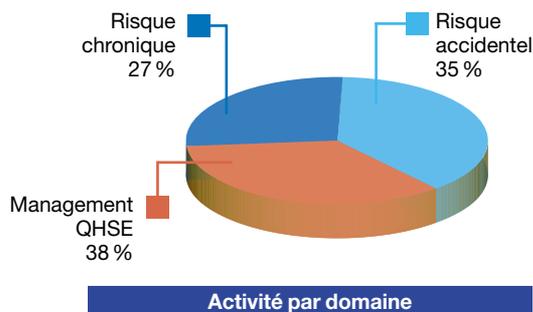
- **Les aspects sanitaires.** L'ensemble des DRIRE de métropole et d'outre-mer a bénéficié d'une journée de formation, aux aspects sanitaires de l'étude d'impact, et nous avons mis au point une formation plus complète de trois jours sur une étude de cas. Sur ce thème, nous avons proposé ces formations aux industriels et aux bureaux d'études. Par ailleurs, l'INERIS forme les consultants spécialisés sur les sites et sols pollués à l'évaluation détaillée des risques pour la santé.
- **Le Management Hygiène-Sécurité-Environnement.** Le management environnemental tend à évoluer vers le management de système intégrant l'hygiène, la sécurité, l'environnement (HSE) et, quelquefois, la qualité. L'INERIS accompagne cette évolution et anime des formations à l'analyse environnementale, au diagnostic HSE, à la mise en place de système de management ISO 14001 ou OHSAS 18001, ainsi que des formations d'auditeur interne, de responsable environnement et de veille réglementaire.
- **La formation ATEX.** L'accent a été mis sur la nouvelle réglementation applicable en juillet 2003. Cette directive porte sur tous les équipements (électriques et autres) utilisables en zones ATEX. Nous avons également mis en place la démarche Saqr'ATEX (certification pour les concepteurs, installateurs et réparateurs de matériels ATEX) et les formations afférentes.

Les résultats

L'activité a représenté 4 300 journées stagiaires, 340 jours de formations, 200 actions de formation et 250 interventions d'experts. Elle représente 2 % du budget de l'Institut.



- **La qualité et la métrologie.** Ces formations sont essentiellement destinées aux laboratoires et à la recherche. Nous offrons des outils "clés en mains" ou une mise en situation réelle de ces derniers selon le sujet abordé (par exemple : gestion de la documentation qualité, audits internes, mise en œuvre des BPL, validation informatique, etc.). Par ailleurs, nous allons compléter notre offre de formation en métrologie.
- **Les explosions de poussière et de gaz.** Ce type de formation a lieu sur le site de Verneuil, où les installations permettent des démonstrations très appréciées. Les formations « Explosion et Incendie » concernent les poussières mais aussi les liquides inflammables, les gaz et les aérosols. Certains phénomènes particuliers, tels que la foudre, l'électromagnétisme (CEM) et l'électricité statique, sont également traités.



Le BCRD

Dans le cadre de sa réflexion stratégique à l'horizon 2002, l'INERIS vise à un développement important de son activité de recherche, dont il souhaite qu'à terme elle constitue sensiblement le tiers de l'activité globale de l'Institut. Financée depuis 1995 par le Budget Civil de Recherche et de Développement (BCRD) et en croissance régulière depuis, cette activité a intégré, au titre de l'Autorisation de Programme 2000, cinq nouvelles recherches.

Élaboration d'un modèle d'évaluation multimodale des risques dus au transport des marchandises dangereuses

Pour appréhender les risques liés au transport des marchandises dangereuses, il est nécessaire de disposer d'un outil d'aide à la décision dédié à différents modes de transport, et notamment le ferroviaire.

Ce programme de recherche se propose :

- de développer un modèle d'évaluation du risque dû au transport de marchandises dangereuses par le rail incluant les problématiques des tunnels, des passages à niveau et des gares de triage ;
- de créer une interface commune pour l'évaluation des risques routiers et ferroviaires, afin de comparer les risques relatifs à plusieurs itinéraires, indépendamment du mode de transport (fer/route ou ferroulage).

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

Cette recherche vise, à l'aide d'études théoriques et expérimentales et de modélisation, à caractériser le comportement d'une structure en béton susceptible d'être le siège d'une explosion interne, en caractérisant les modalités d'effondrement et, le cas échéant, la nature, la forme et la vitesse des projectiles engendrés.

Biomarqueurs précoces d'écotoxicité

La détection et l'évaluation précoces de l'impact des substances chimiques, particulièrement à faible concentration, sur les organismes vivants ont conduit à l'utilisation de marqueurs moléculaires d'effet biologique. Ces biomarqueurs constituent ainsi des révélateurs précoces capables de caractériser l'état de santé des individus vivant au sein d'écosystèmes. Cette recherche a pour objectif de mettre en évidence, pour chacune des grandes fonctions physio-

logiques qui caractérisent l'organisme, un ou plusieurs marqueurs biologiques susceptibles de témoigner des perturbations d'une fonction. L'objectif final est d'aboutir à la définition d'une batterie de biomarqueurs associée à des règles d'interprétation de leurs variations qui permette de détecter de façon précoce une toxicité sublétales.

Anomalies de l'appareil génital et de la reproduction provoquées par l'administration de toxiques pendant le développement gonadique

Les éthers de glycol (Eg) sont des substances largement répandues dans l'environnement (produits industriels, domestiques et agricoles). Ces Eg, ainsi que leurs métabolites, sont connus pour présenter un risque pour la santé humaine. Les effets toxiques de ces molécules touchent différents systèmes physiologiques et, pour certaines de ces substances, des atteintes de l'appareil reproducteur. L'Eg le plus toxique au point de vue des différents effets est l'éther méthylique de l'éthylène glycol (EGME). En revanche, l'éther méthylique du propylène glycol (PGME) est considéré comme n'ayant pas d'effet sur la reproduction.

Le programme de recherche proposé a pour objectif d'effectuer une étude comparative de l'atteinte (anatomique, histologique, physiologique) du développement gonadique génital chez le mâle et la femelle du rat ou de la souris, après traitement par l'EGME et le PGME pendant la période de formation de cet appareil génital.

Étude de l'adsorption de composés organiques lourds sur des adsorbants compatibles avec la thermodesorption : mise au point d'une nouvelle technique de prélèvement

Pour améliorer la connaissance de l'exposition individuelle des populations aux composés organiques semi-volatils (COSV), il est nécessaire de disposer de capteurs portatifs de faible dimension. La mise au point de ces dispositifs nécessite une phase de recherche poussée tant sur la technique de prélèvement par adsorption sur des supports spécifiques que sur l'analyse des COSV (ayant un point d'ébullition allant de 240 à 400 °C).

La mise au point de dispositifs légers, peu coûteux et fiables, permettra de conduire des études d'exposition individuelle et d'évaluation des risques.

La recherche européenne

Vingt-deux propositions de recherche avec participation de l'INERIS ont été présentées en 2000 dans le cadre du cinquième programme-cadre de recherche et de développement technologique (PCRD) ainsi que du programme LIFE-Environnement ; 9 ont été sélectionnées par les panels d'évaluateurs ; 5 ont reçu une décision de financement ; 3 évaluations étaient encore en attente fin 2000. Les thèmes concernent les risques d'explosion, le facteur humain et la gestion des risques, la sécurité des tunnels, la surveillance prédictive des falaises, etc. L'INERIS intervient dans plusieurs des groupes thématiques nationaux (GTN) animés par le ministère de la

Recherche pour assurer les liaisons avec les comités de programme correspondants du cinquième PCRD (Environnement, Croissance, etc.), et également pour élaborer et transmettre à la Commission les priorités françaises de recherche en environnement pour le sixième PCRD (www.cordis.lu/France).

L'INERIS contribue aussi aux échanges d'information sur les activités « Recherche » de la Commission et ses programmes, en activant ses réseaux de partenaires européens (ENERO, ESReDA) et grâce à sa participation au CLORA, qui rassemble à Bruxelles les organismes publics de recherche français.

Les congrès, colloques, symposiums et conférences

En 2000, 175 participations de chercheurs, ingénieurs et techniciens de l'INERIS ont été enregistrées à 127 manifestations scientifiques ou professionnelles, nationales ou internationales, parmi lesquelles :

- **congrès scientifiques à occurrence régulière**
– français : 29 ; internationaux : 26 ;
- **colloques, conférences, symposiums occasionnels**
– français : 45 ; internationaux : 27.

Les thèses à l'INERIS

En 2000, 23 thèses ont été préparées en liaison avec des laboratoires universitaires situés tant en région parisienne

(4) qu'en province (16) ou à l'étranger (3). Cinq thèses ont été soutenues au cours de l'année.

L'INERIS dans les sociétés savantes

L'INERIS est membre de 82 associations et sociétés savantes, dont 32 ont une vocation d'échanges scientifiques. Ces sociétés sont, pour 59 d'entre elles, des sociétés fran-

çaises, dont 9 à vocation strictement régionale. Par ailleurs, l'INERIS est membre de 14 sociétés savantes internationales, dont 7 européennes.

Les publications dans des revues scientifiques, congrès, conférences et colloques

En 2000, 93 publications écrites par les chercheurs de l'INERIS, seuls ou en tant que coauteurs. Elles se répartissent de la façon suivante :

- risques chroniques : 57 ;
- risques accidentels : 27 ;
- risques sol et sous-sol : 9.

L'INERIS entretient sa capacité d'expertise par les recherches, études, retours d'expérience assurés par ses équipes, et grâce aux réseaux au sein desquels il s'est impliqué.

Cette expertise est proposée aux industriels et aux collectivités territoriales dans le cadre de contrats de prestations. Elle est parallèlement proposée ou requise par les pouvoirs publics sous diverses formes.

Prestations pour l'administration

En 2000, l'INERIS a assuré 30 prestations, émanant pour 8 d'entre elles des administrations centrales des ministères chargés de l'Environnement et de l'Industrie et, pour les autres, des services déconcentrés, DRIRE pour la majorité. Parmi les prestations les plus marquantes, citons :

- la gestion des séquelles des anciennes exploitations minières en liaison avec les DRIRE Lorraine, Provence, Côte d'Azur et Bourgogne ;
- l'aide à l'établissement des Plans de Prévention des

Risques liés aux anciennes carrières pour le compte de la sous-direction des risques majeurs du ministère de l'Environnement ;

- à la demande de la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques de ce même ministère : l'organisation d'un colloque sur l'application de la directive Seveso, la formation et l'exercice d'entrée de données sur une base européenne (CARAT), l'évaluation du compartimentage des entrepôts et des équipements et paramètres importants pour la sécurité.

Prestations de tierce expertise

Les analyses critiques d'étude de dangers réalisées à la demande des pouvoirs publics ont concerné une soixantaine d'installations, celles du volet sanitaire des études d'impact,

aspect sols pollués et émissions, ont porté sur 7 cas différents. A ces analyses critiques, il convient d'ajouter un cas d'étude de dangers de tunnel routier.

Contributions à la normalisation

Les experts de l'INERIS participent de manière active à des instances de normalisation à l'échelle nationale, européenne et internationale. Cette participation représente environ 15 000 heures de travail par an et implique l'INERIS dans :

- 71 groupes AFNOR ;
- 20 comités techniques CEN/CENELEC/ISO/CEI.

Les pouvoirs publics attachent la plus grande importance

à cette participation, en particulier dans les domaines de la qualité de l'air et de l'écotoxicologie, mais aussi de la qualité des eaux et des sols et de la caractérisation des déchets. L'INERIS reste, bien entendu, très sollicité pour ses domaines de compétence plus anciens, tels que les substances explosives et dangereuses ou les matériels pour atmosphères explosives.

Interventions ponctuelles

A côté des apports d'expertise sur des sujets de fond, l'INERIS a également été sollicité pour des interventions ponctuelles déclenchées dans un contexte de crise face à des situations accidentelles :

- suivi des interventions touchant au *Levoli Sun* (navire chimiquier ayant sombré le 29 octobre 2000) ;

- analyse des conséquences de la pollution accidentelle suite au déversement d'un bassin de rétention (mine d'or) en Roumanie et en Hongrie ;

- divers accidents survenus en France dans des installations industrielles impliquant des émissions, des incendies et des explosions.

RISQUES CHRONIQUES

L'évaluation des risques présentés par les substances chimiques vis-à-vis de l'homme et de son environnement constitue l'axe principal d'activité autour duquel s'articulent les travaux destinés à en éclaircir certains aspects : la caractérisation des sources d'émission, la mesure des expositions, l'évaluation des effets sur certaines fonctions essentielles des espèces vivantes, l'intégration des entreprises dans leur environnement.

Essais interlaboratoires de mesures de polluants gazeux à l'émission
contact : Jean Poulleau

Hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant : six années d'expérience
contact : Eva Leoz

Étude pilote de l'exposition totale de populations urbaines aux aldéhydes
contact : Roman Meininghaus

Développement et validation d'un marqueur biologique des œstrogènes mimétiques : la vitellogénine
contact : Jean-Marc Porcher, François Brion

Évaluation de l'écotoxicité des déchets
contact : Pascal Pandard

Évaluation des risques sanitaires et environnementaux liés au naufrage de l'*Erika*
contact : André Cicolella

Apport méthodologique pour la réalisation de diagnostics environnementaux de zones d'activités
contact : Roger Puff, Denis Haxaire

[Retour sommaire](#)

■ L'INERIS a conçu une installation expérimentale permettant de simuler des effluents gazeux industriels pour la réalisation d'essais interlaboratoires de prélèvements et de mesure de polluants gazeux à l'émission. Depuis 1998, 23 laboratoires français et 5 organismes européens ont participé à des exercices d'intercomparaison. Les observations faites à cette occasion ont permis aux participants d'identifier les points sur lesquels des progrès restent à réaliser et de s'engager dans un processus d'amélioration de leurs pratiques d'assurance qualité.

Essais interlaboratoires de mesures de polluants gazeux à l'émission

La réglementation relative à la pollution atmosphérique impose des limites d'émission de divers polluants par des sources de toutes natures, mobiles ou fixes. La vérification du respect de ces limites, dans le cadre de l'autosurveillance ou dans celui du contrôle réglementaire, implique la mise en œuvre de méthodes d'échantillonnage des effluents gazeux et de mesure des polluants qu'ils contiennent. Ces opérations sont conduites par des prestataires qui doivent fournir à leurs donneurs d'ordre des résultats fiables, dont le domaine d'incertitude est quantifié, et doivent pour cela mettre en place une politique d'assurance qualité. Les essais interlaboratoires constituent un élément privilégié d'une telle politique, en permettant de qualifier et valider les méthodes de mesure et leur mise en œuvre. Ils sont d'ailleurs utilisés de façon systématique au niveau des groupes de travail européens pour la validation des normes élaborées dans le cadre du CEN (Comité européen de normalisation). La validation de tels essais en site industriel, sur effluent réel, est une opération extrêmement lourde, soumise aux aléas de la production et de portée limitée en raison du petit nombre de participants pouvant intervenir simultanément et de la gamme étroite de concentrations étudiée. Pour lever cette difficulté, l'INERIS a conçu en 1997, pour le compte du ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, avec l'aide de l'ADEME, une installation de simulation d'un effluent gazeux pollué permettant de réaliser des essais interlaboratoires en conditions contrôlées. Depuis 1998, l'INERIS a organisé plusieurs exercices portant sur la mesure en continu de O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2 et COVT et faisant intervenir 23 laboratoires français et 5 organismes européens.

Caractéristiques du banc d'essai

Les effluents sont générés à l'aide de deux chaudières d'environ 50 kW chacune, la première alimentée en gaz naturel, la seconde en fioul léger. Les gaz issus de cette combustion peuvent être ensuite, si nécessaire, réchauffés, humidifiés pour simuler des effluents

sortant d'une tour de lavage et les concentrations en certains polluants augmentées par l'ajout contrôlé de gaz en bouteilles (CO, NO, SO₂, HCl, etc.) ou de liquides (COV spécifiques). Le banc est équipé de 5 postes de prélèvement identiques et peut donc accueillir 5 intervenants simultanément.

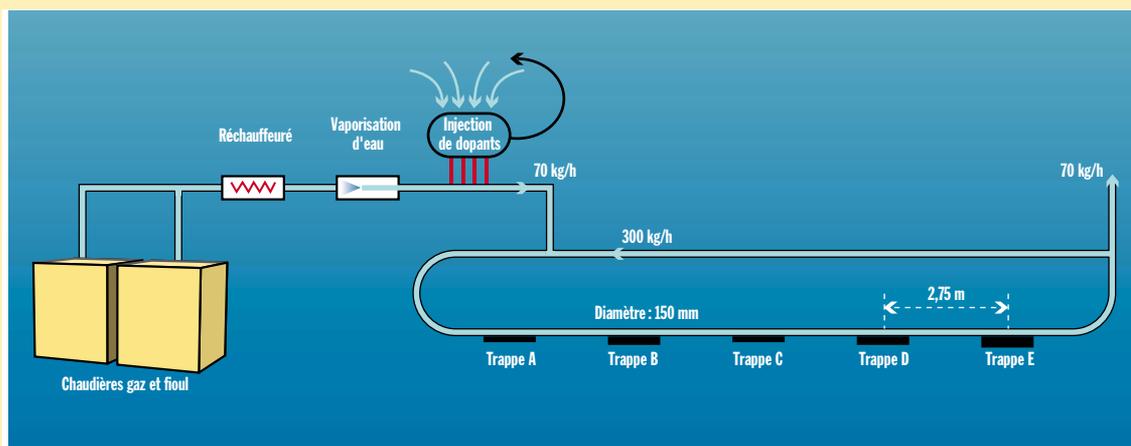
Les méthodes de mesure

Elles ont été différentes selon les objectifs des intercomparaisons. Les équipes françaises ont été invitées à intervenir, selon leur pratique habituelle, sans contrainte sur le choix des méthodes. Les essais européens ont été réalisés, en revanche, dans un contexte normatif, pour valider les méthodes de référence. Celles-ci ont donc été imposées aux opérateurs :

- SO₂ (0-2 000 mg/m³) : méthode au Thorin et chromatographie ionique ;
- NO_x (0-1 300 mg/m³ NO₂ equiv.) : chimiluminescence ;
- O₂ (3-12 %) : paramagnétisme ;
- CO (0-400 mg/m³) : absorption infrarouge ;
- H₂O : absorption et condensation.



Banc d'essai à l'émission.
A chaque trappe est affecté un équipement de mesure multipolluant.



Les autres conditions, en particulier celles qui concernent le prélèvement et le traitement des gaz avant analyse, étaient laissées au libre choix des opérateurs, dans le respect des normes existantes. Des essais d'une durée d'une demi-heure ont été réalisés, la plupart à des concentrations stables.

Quelques observations sur les pratiques

Le calibrage des appareils au moyen d'un mélange pour étalonnage en bouteille sous pression est une opération fondamentale, qu'il faut maîtriser.

L'incertitude sur les concentrations annoncée par les fournisseurs de gaz pour étalonnage est le plus souvent de ± 1 à 2 % relatif. Or, nous avons observé que, sur près d'un quart des bouteilles utilisées, les écarts excédaient, de façon anormale, les tolérances sur les concentrations annoncées. Ceci n'explique toutefois que très partiellement les écarts constatés sur les résultats de mesure entre les laboratoires participants

Pour le cas particulier des NO_x , beaucoup de laboratoires faisant l'économie du contrôle du NO_2 ou ne mesurant que les concentrations en NO , il nous semble nécessaire de préconiser l'utilisation :

- soit d'une bouteille mixte (NO et NO_2), avec une proportion significative de NO_2 pour pouvoir apprécier le rendement du four de conversion ;
- soit de deux bouteilles séparées, une première bouteille de NO permettant l'ajustage des deux voies NO et NO_x , une seconde bouteille de NO_2 permettant de calculer le rendement du four de conversion.

Pour l'analyse des composés organiques volatils totaux (COVT), nous avons pu observer que la moitié des laboratoires français calibraient leurs appareils avec du méthane, alors que le propane est requis par les procédures normalisées. Il s'ensuit des écarts de résultats, le rapport des facteurs de réponse entre méthane et propane n'étant en effet pas toujours égal à 1/3 sur tous les analyseurs.

Nous avons pu remarquer également que très peu de laboratoires français maîtrisaient le processus de correction des résultats de mesurage, lorsque des dérives d'analyseurs étaient constatées.

Bilan par polluant

Pour chaque campagne d'essais, un bilan par polluant a été établi. A la valeur moyenne mesurée pour chaque essai, nous avons pu

associer un intervalle de confiance, c'est-à-dire un indicateur de la dispersion des mesures.

Le tableau ci-dessous montre que les résultats obtenus lors de l'exercice européen sont meilleurs que ceux obtenus lors des essais organisés entre laboratoires français. Ceci n'a rien d'anormal, car :

- pour un même polluant, les laboratoires européens utilisaient le même principe de mesure ;
- les laboratoires de référence européens maîtrisent mieux leurs matériels et connaissent mieux les exigences normatives. Les contrôles d'étanchéité des lignes de prélèvement sont réalisés. Les dérives sont quantifiées, et les résultats corrigés lorsque cela s'impose ;
- les gammes des analyseurs utilisés et les bouteilles de gaz pour étalonnage associées sont adaptées aux domaines de mesure étudiés.

A l'issue de ces différentes campagnes de mesures, nous avons été amenés à faire les constats et recommandations suivants à l'intention des opérateurs français :

- les anomalies rencontrées sur certains gaz pour étalonnage doivent être corrigées ;

Tableau comparatif des principaux résultats des essais interlaboratoires à l'échelle française et européenne.

	Directives			Intervalles de confiance en % relatif de la valeur moyenne (Ic)					
	Domaine étudié	Valeur limite ⁽¹⁾	Ic maxi ⁽¹⁾	Interlabo français					Interlabo européen
				1	2	3	4	5	
O₂	4-13 %	-	-	0 - 3	0 - 3,9	0 - 3	2 - 14	1 - 3,9	0,6 - 1,1
CO₂	4-10 %	-	-	1 - 4	1 - 3	3 - 9	2 - 6,5	3,1 - 8,4	
NO_x	80 - 1000 mg/m ³	200 mg/m ³	20 %	2 - 8	5 - 10	3 - 13	11 - 82	1,4 - 12,3	1,4 - 2,6
CO	30 - 500 mg/m ³	100 mg/m ³	10 %	3 - 39	6 - 34	9 - 28	4,5 - 179	5,4 - 60	2,5 - 3,6
	10 - 30 mg/m ³			2 - 2,7	34 - 73	15 - 40	17 - 40	60 - 135	2,4
SO₂	300 - 1000 mg/m ³	200 mg/m ³	20 %	4 - 6	6,5 - 10,6	18 - 30	11 - 25	11 - 21	9 (IC/Thorin)
	70 - 300 mg/m ³			5 - 20	10,6 - 68	30 - 90	25 - 48	11 - 90	10 (IC/Thorin)
COV	5 - 40 mgC/m ³	20 mgC/m ³	30 %	9 - 25	10 - 75	12 - 50	16 - 44	10,3 - 47,3	

(1) Valeurs limites demi-horaires de la directive européenne sur les déchets.

(2) IC/Thorin : chromatographie ionique et méthode au Thorin.

- les laboratoires ne réalisent pas de calibrages suffisamment soignés. Un calibrage en tête de ligne, en se référant au signal enregistré par la chaîne de saisie et d'enregistrement des données, est préférable ;
- pour certains polluants, les intervalles de confiance tendent à croître rapidement à basse concentration. Les caractéristiques métrologiques des analyseurs doivent être préalablement déterminées, afin de réduire l'incertitude ;
- pour la mesure du SO₂, une attention toute particulière s'impose dans le choix du traitement des gaz pour éliminer la vapeur d'eau, dans la longueur des lignes et le choix des matériaux, dans la procédure de calibrage et dans le choix de techniques analytiques sélectives ;
- les gammes de concentrations des analyseurs doivent être choisies de manière à ce que la borne supérieure soit égale à environ deux fois la valeur limite réglementaire. Les appareils devraient être calibrés avec un gaz de concentration proche de la valeur limite réglementaire ;
- les résultats de concentrations en humidité, assez dispersés, montrent qu'il conviendrait également de tester l'efficacité des systèmes de condensation et l'étanchéité de la ligne d'échantillonnage avant chaque prélèvement ;
- pour la mesure des COVT, la géométrie et les réglages du brûleur étant des paramètres influents, il est indispensable que soient vérifiés les facteurs de réponse des analyseurs comme l'exigent les nouvelles normes européennes.

Conclusion

Ces essais interlaboratoires ont permis aux organismes participants :

- de faire le point sur la qualité de la mise en œuvre des procédures normalisées par leurs opérateurs ;
- d'améliorer la qualité de leurs matériels ;
- de s'engager dans des processus d'amélioration de leurs pratiques d'assurance qualité, en vue des accréditations qui seront obligatoires à compter de janvier 2002 pour procéder à des contrôles réglementaires.

De tels exercices, répétés avec une périodicité d'environ trois ans, devraient permettre de quantifier les progrès réalisés dans la maîtrise globale de la qualité des mesurages des effluents gazeux en France.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'air ambiant: six années d'expérience

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques constitués d'au moins deux noyaux benzéniques accolés, qui proviennent essentiellement de combustions incomplètes (échappement automobile, foyers domestiques...) ou de procédés pyrolytiques à haute température. Certains HAP sont classés par l'IARC dans le groupe 2A (probablement cancérigènes pour l'homme), par exemple le benzo(a)pyrène (BaP), composé très étudié du point de vue toxicologique. La directive européenne 96/62/CE prévoit que, en raison de cette toxicité, la concentration de ces substances dans l'air ambiant doit faire l'objet d'une limite à ne pas dépasser et d'une surveillance par les réseaux de mesure. Dans ce contexte, l'INERIS mène depuis 1995 différentes études relatives aux problèmes posés par la caractérisation de cette famille de polluants, ainsi que par leur prélèvement et leur dosage dans l'air ambiant. Ces travaux ont été menés pour la plupart d'entre eux dans le cadre du Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air (LCSQA).

Caractérisation chimique de la matière organique gazeuse et particulaire due aux moteurs Diesel

Les véhicules diesel représentent une des principales sources de HAP en milieu urbain. En raison de leur tension de vapeur, ces HAP peuvent se retrouver dans l'atmosphère sous forme gazeuse ou adsorbés sur les particules (phase particulaire), la répartition entre les deux phases étant fonction de la masse moléculaire du composé, de sa tension de vapeur et de la température ambiante.

Une étude a été entreprise en collaboration avec l'IFP pour caractériser les HAP et, plus généralement, la matière organique émise par un moteur Diesel. Les essais ont été réalisés sur un banc de dilution mis en place à l'INERIS, avec un véhicule et un carburant mis à disposition par l'IFP.

Le fait que les HAP soient répartis entre la phase gazeuse et la phase particulaire impose la mise en œuvre d'un système de prélèvement collectant chacune de ces phases.

■ Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des polluants atmosphériques émis par des processus de combustion incomplète.

Ils doivent faire l'objet d'une surveillance dans l'atmosphère en raison de leur caractère toxique. L'INERIS développe depuis plusieurs années un programme de recherche sur ce thème. Les travaux réalisés ont conduit à préciser les formes sous lesquelles ces substances peuvent se rencontrer à l'émission de moteurs Diesel et dans l'atmosphère urbaine, à attirer l'attention sur la présence de HAP oxygénés non pris en compte actuellement et à proposer une méthode de prélèvement et d'analyse adaptée au domaine de concentrations rencontrées en milieu urbain et applicables par les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air (AASQA).

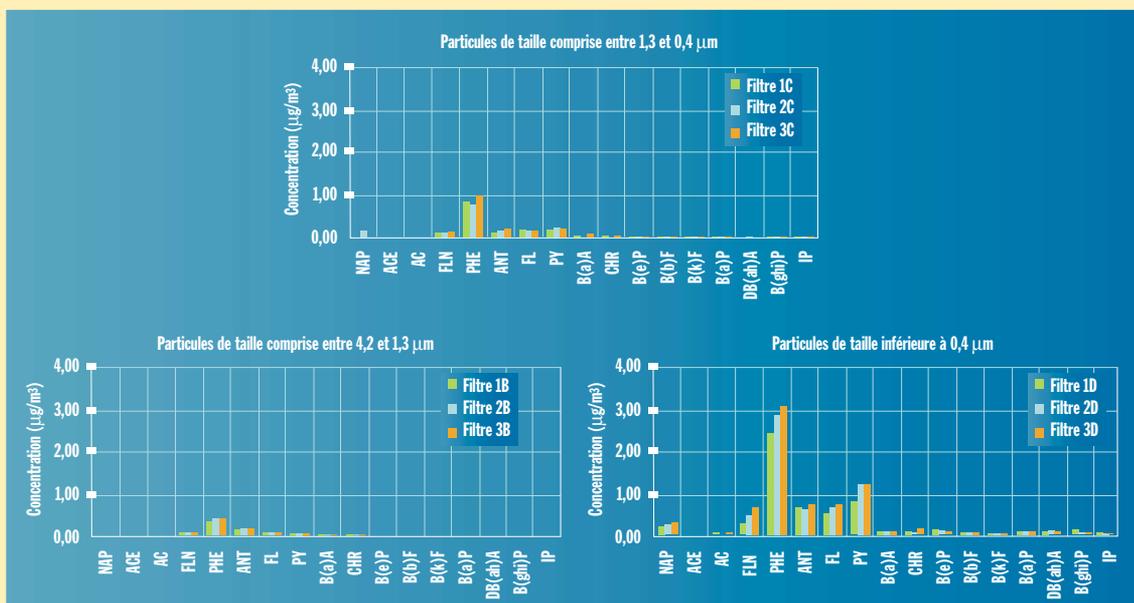


Figure 1 - Concentration des HAP par tranche granulométrique sur les particules diesel. Résultats de trois essais réalisés sur le banc de dilution.

Les résultats ont montré que les composés majoritaires en phase particulaire sont les alcanes, puis les HAP oxygénés et enfin les HAP ; en phase gazeuse on retrouve, par ordre d'importance, les alcanes, les HAP et les HAP oxygénés. On a constaté aussi que la concentration en phase gazeuse (bien souvent négligée dans ce type d'études) des différents composés étudiés est plus importante que leur concentration en phase particulaire.

L'étude granulométrique montre que les composés des trois familles étudiées se trouvent majoritairement adsorbés sur les particules de taille inférieure à 0,4 µm (figure 1). Ces particules appartiennent à la fraction alvéolaire et peuvent pénétrer, après inhalation, jusqu'aux voies aériennes non ciliées, véhiculant ainsi à l'intérieur de l'organisme les différents composés identifiés dans cette étude.

Une campagne de prélèvement a ensuite été effectuée à la porte d'Auteuil, à Paris, afin de compléter les travaux réalisés sur le banc de dilution. Nous avons constaté la difficulté d'estimer la contribution des véhicules diesel à la concentration totale, même si des profils similaires à ceux trouvés sur le banc de dilution ont été rencontrés.

Cependant, aussi bien pour l'étude sur le banc de dilution que dans l'air ambiant, le résultat le plus significatif est la mise en évidence des fortes concentrations en HAP oxygénés comme l'antraquinone

ou la fluorénone. Le rapport de concentration entre la somme des 4 HAP oxygénés dosés et la somme des 13 HAP habituellement pris en compte est de 30 sur le banc de dilution et de 10 dans l'air ambiant. Ceci est d'autant plus important que peu de données toxicologiques existent pour les HAP oxygénés, alors que certains d'entre eux sont des cancérigènes suspectés ou des mutagènes directs.

Étude de la réactivité des particules diesel vis-à-vis de l'ozone

Le faible niveau de concentration des HAP dans l'air ambiant impose des durées de prélèvement relativement longues et le passage de volumes d'air très importants à travers les filtres collecteurs de particules. On peut donc craindre que ces dernières réagissent avec des espèces gazeuses réactives présentes dans l'air ambiant comme l'ozone. Une étude a été menée pour évaluer l'importance de ce phénomène.

Une fois prélevées sur le filtre, les particules diesel ont été mises en contact avec différentes concentrations d'ozone et à différents temps d'exposition, tout en gardant constant le produit :

concentration d'ozone x durée d'exposition.

L'ozone a été généré à l'intérieur du banc de dilution et la concentration arrivant sur le filtre vérifiée en permanence et maintenue constante.

Les effets constatés pour les trois familles de composés (alcanes, HAP et HAP oxygénés) ont été très divers et, pour certains, différents de ce qui est indiqué dans la littérature. Alors que le BaP, considéré comme très réactif, semble être indifférent à la présence d'ozone, l'anthracène semble réagir en présence d'air ozoné pour former de l'antraquinone, mais cette réaction, contre toute attente, semble être plutôt fonction de la durée d'exposition que de la concentration d'ozone (figure 2).

Les résultats sont difficilement interprétables, mais ils semblent montrer que la présence d'ozone peut entraîner des changements dans la composition chimique des particules diesel. Les résultats de mesures de HAP en air ambiant en présence de concentrations élevées en ozone doivent donc être considérés avec circonspection.

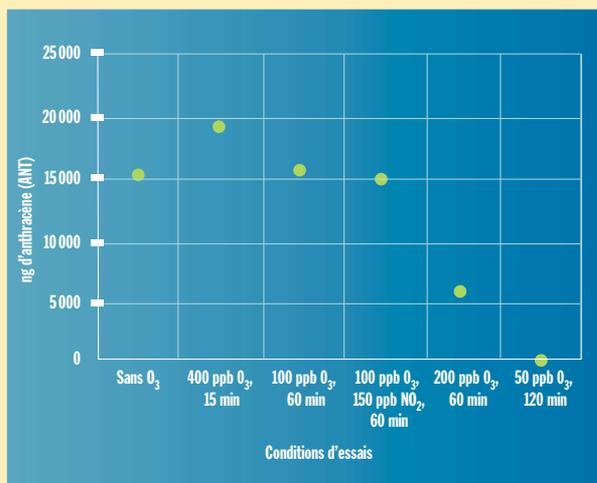


Figure 2 - Comportement de l'anthracène vis-à-vis de l'ozone en fonction du temps d'exposition. La quantité d'anthracène devient nulle après deux heures d'exposition.



Appareil de prélèvement grand volume (HVS).

Proposition d'une méthode pour la mesure des HAP, applicable par les AASQA

Depuis 1997, l'INERIS effectue des essais afin de proposer une méthode d'analyse efficace et adaptée à la mesure des HAP dans l'air ambiant. Parmi les aspects étudiés, une attention particulière a été portée sur la phase d'extraction des HAP des milieux de piégeage. Les méthodes retenues sont le soxhlet ou l'extraction à haute pression et haute température (ASE) avec du dichlorométhane. Cette extraction est suivie d'une évaporation sous flux d'azote. L'analyse est effectuée par HPLC avec un détecteur par fluorescence.

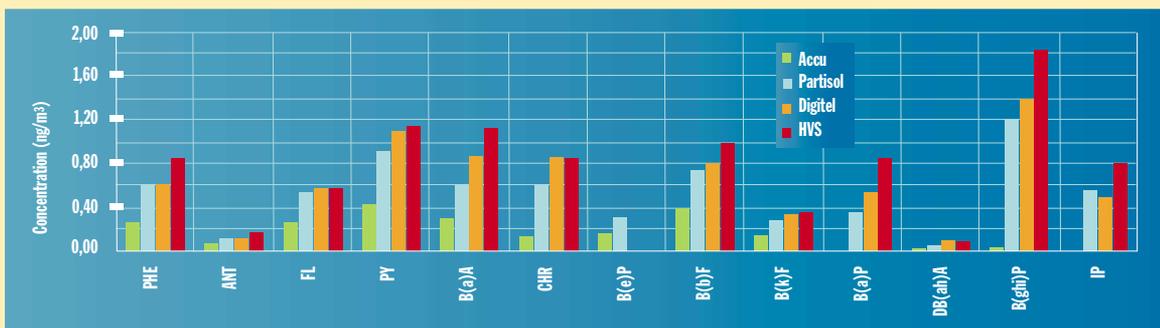
Des campagnes de prélèvements effectuées sur différents sites (Aéroports de Paris, tunnel de Fréjus) ont permis de vérifier le bon choix en matière analytique.

Lors des expériences réalisées au laboratoire et sur le terrain, on a pu constater l'influence de la température dans la partition gaz/particule des HAP, donc l'importance de mesurer les deux phases simultanément : la phase particulaire sur un filtre et la phase gazeuse sur des mousses en polyuréthane.

Différents appareils de prélèvement ont été comparés au cours de campagnes de mesure réalisées à Paris et à La Rochelle. A La Rochelle, nous avons comparé différents appareils fonctionnant à faible débit (1 m³/h) : Accu et Partisol, et à fort débit (16 m³/h) : HVS et Digital. Les résultats obtenus montrent (figure 3) une bonne corrélation entre les appareils à fort débit et on observe que les appareils à faible débit ont tendance à sous-estimer les concentrations des HAP d'environ 20 %.

Plusieurs campagnes d'intercomparaison avec le Laboratoire d'hygiène de la Ville de Paris (LHVP) ont permis de mettre en évidence la difficulté de ce type d'exercice. Les coefficients de variation sont

Figure 3 - Comparaison entre des appareils à faible débit (Accu et Partisol) et fort débit (Digital et HVS) à La Rochelle. HAP en phase particulaire.



néanmoins très voisins pour les deux laboratoires : ils sont très faibles lorsqu'il s'agit des solutions étalons, ils augmentent quand il s'agit de particules de référence et sont à leur maximum (autour de 15 %) pour les échantillons réels.

Conclusions et perspectives

Au terme de ces travaux, une méthode de prélèvement et d'analyse répondant aux exigences de la surveillance atmosphérique a pu être définie. La surveillance des HAP en France commencera début 2001 par une phase pilote, organisée par l'ADEME et qui mettra en jeu 9 AASQA associées à 9 laboratoires répartis dans tout le territoire. Une campagne d'intercomparaison sera organisée par l'INERIS avec ces 9 laboratoires.

En ce qui concerne les HAP oxygénés, des campagnes de prélèvement en milieu urbain ont été prévues pour essayer de mieux caractériser ces composés. En parallèle, une réflexion sera menée pour définir le besoin d'études approfondies sur la connaissance de leur toxicité.

Publications

- **Léotz-Gartziandia (E.) et al.** : Artifact Formation in High-Volume Sampling of VOCs and Solid Organic Compounds. *Second International Conference on Volatile Organic Compound in the Environment, London, 7-9 novembre 1995, p.107-116.*
- **Léotz-Gartziandia (E.)** : Caractérisation chimique de la matière organique gazeuse et particulaire due aux moteurs Diesel, à l'émission et dans l'air ambiant. *Thèse de doctorat, université Paris-VII, 1998.*
- **Tatry (V.) et al.** : Some Experiences of Atmospheric PAH Monitoring in France. *Fresenius Environmental Bulletin, vol. 8, n° 9/10, septembre/octobre 1999, p. 619-628.*
- **Léotz-Gartziandia (E.) et al.** : Sampling and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) and Oxygenated PAH in Diesel Exhaust and Ambient Air. *Polycyclic Aromatic Compounds, 2000, 20, p. 245-258.*
- **Léotz-Gartziandia (E.) et al.** : Sampling and Analysis of Organic Compounds in Diesel Particulate Matter. *Environmental Monitoring and Assessment, 2000, 65, p. 155-163.*

■ Les aldéhydes sont des polluants atmosphériques à fort potentiel toxique, présents à la fois dans l'air extérieur et dans l'air des locaux ou des habitations. L'évaluation des risques liés à ces substances implique la connaissance des expositions des populations. Un programme a été lancé dans ce but par l'INERIS pour évaluer, dans l'exposition individuelle totale mesurée sur un échantillon de 20 personnes, les contributions respectives de l'air extérieur et de celui des habitations. L'étude a montré que le formaldéhyde et l'acétaldéhyde constituaient l'essentiel du potentiel toxique et que l'exposition totale était fortement liée à la qualité de l'air intérieur.

Étude pilote de l'exposition totale de populations urbaines aux aldéhydes

Les aldéhydes sont des polluants atmosphériques dont la concentration doit être contrôlée en raison de leurs propriétés toxiques. Ils peuvent être en effet des irritants respiratoires, même à faibles concentrations, et certains d'entre eux sont classés comme cancérigènes probables ou possibles. Ils sont présents dans l'air extérieur en tant que polluants primaires ou en tant que polluants secondaires résultant de réactions photochimiques, et dans l'air intérieur des locaux et habitations où ils sont émis par divers matériaux. Des mesures, réalisées antérieurement à Nancy lors d'une étude pilote par l'INERIS en collaboration avec AIRLOR, ont montré que les populations urbaines sont généralement plus exposées au formaldéhyde et à l'acétaldéhyde à l'intérieur qu'à l'extérieur. Par rapport à cette première étude, l'objectif du présent travail est d'élargir la gamme des aldéhydes concernés et d'approfondir la connaissance de l'exposition des populations urbaines à ces aldéhydes. Les composés suivants ont été sélectionnés en fonction des principaux critères pertinents (toxicité, présence probable, possibilité d'analyse) : formaldéhyde, acétaldéhyde, butanal, pentanal, hexanal, heptanal, octanal, nonanal, benzaldéhyde, acroléine.

Système de prélèvement

Un système de prélèvement de type capteur passif a été utilisé. Ce dispositif fournit des concentrations moyennes représentatives sur la période d'exposition.

La vitesse de prélèvement pour chaque aldéhyde a été déterminée au laboratoire avant mise en place sur site. Les essais ont été réalisés en collaboration avec le Fraunhofer-Institut für Holzforschung-Braunschweig (Allemagne).

Le système de prélèvement a été validé lors de deux campagnes d'intercomparaison organisées respectivement par le Nederlands Meetinstituut (Pays-Bas) et le VITO (Belgique). La répétabilité moyenne, obtenue en exposant deux capteurs simultanément dans le même abri à plusieurs endroits, est d'environ 30 %.

Campagne de mesures

Une campagne de mesures en collaboration avec le réseau AIRLOR a été effectuée à Nancy avec 20 bénévoles, pendant deux périodes caractérisées par des conditions météorologiques différentes. Des mesures de concentrations en différents aldéhydes ont été réalisées d'une part dans l'air extérieur, en différents points représentatifs du milieu urbain, dont des sites très fréquentés (abords gare, rue piétonne, etc.), dans l'air intérieur des principaux lieux de vie des bénévoles (lieux d'habitation et bureaux) et, d'autre part, directement sur les personnes à l'aide de capteurs portatifs, afin d'appréhender l'exposition individuelle réelle.

Résultats de la campagne de mesures

On dispose d'un grand nombre de résultats expérimentaux. Afin de faciliter leur interprétation et de réduire l'information obtenue, nous avons choisi de les exprimer sous la forme d'un indice qui résume ces résultats.

Une approche simple consisterait à prendre la somme des concentrations. Mais pour prendre en considération les différentes propriétés toxiques des aldéhydes, on introduit des facteurs de pondération (w_i). Ici, on utilise les valeurs LCI (*Lowest Concentration of Interest*), proposée par la Commission européenne pour l'évaluation de la qualité de l'air intérieur (tableau 1).

$$K_{LCI} = \sum_{i=1}^n w_i c_i$$

Aldéhyde	LCI $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Formaldéhyde	10
Acétaldéhyde	40
Propanal à Décanal	400
Furfural	79

Tableau 1 - Valeurs des *Lowest Concentration of Interest* (LCI) de C1 à C10.

Tableau 2 - Concentrations pondérées K_{LCI} obtenues pendant les deux périodes de la campagne de mesures, à l'extérieur et à l'intérieur, et avec les capteurs portés par les bénévoles.

	Minimum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Moyenne ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Médiane ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maximum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Période I (4-8/09/00)	1,66	2,20	2,13	3,23
Période II (8-13/09/00)	3,67	8,85	9,00	14,37
Sites extérieurs très fréquentés (période I)	2,35	3,29	2,97	5,17
Bureaux (période I)	10,33	20,25	21,22	28,65
Chambres (période I)	9,02	35,92	21,84	138,19
Capteurs portés par les bénévoles (période I)	12,29	25,71	20,63	57,54

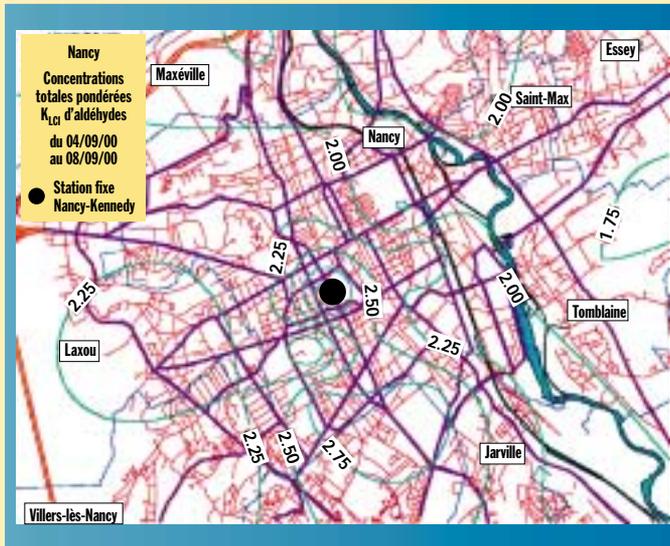
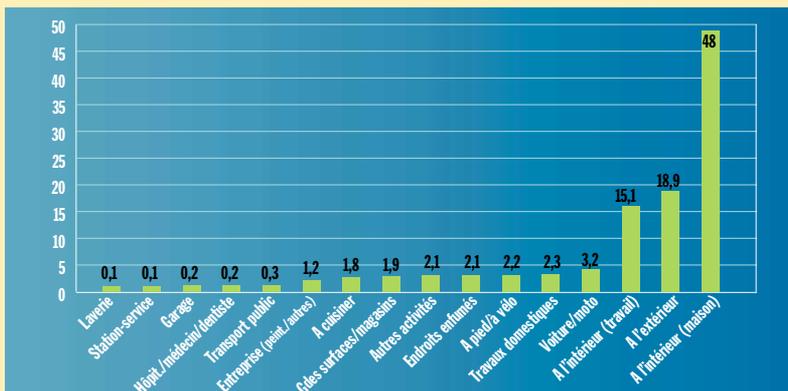


Figure 1 - Courbes des isoconcentrations de la somme pondérée des aldéhydes dans l'agglomération nancéienne (du 4/09/2000 au 8/09/2000). La zone de plus forte concentration se trouve proche de la station fixe Nancy-Kennedy.

Figure 2 - Budget espace-temps des 20 bénévoles ayant participé à l'étude.



Les facteurs de pondération w_i sont normalisés sur le formaldéhyde, de façon à obtenir des facteurs

$$w_{\text{formaldéhyde}} = 1, w_{\text{acétaldéhyde}} = 0,25\dots$$

On peut donc considérer K_{LCl} comme la concentration en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ d'un mélange d'aldéhydes exprimée en équivalents formaldéhyde.

Le tableau 2 présente les valeurs K_{LCl} qui caractérisent les environnements étudiés.

- Les conditions météorologiques des périodes I et II induisent des variations de concentrations significatives pour des sites dits "de fond" (jardins, cours...), éloignés des sources de pollution primaires.
- Tandis qu'on observe des concentrations faibles à l'extérieur, les concentrations sont beaucoup plus élevées à l'intérieur (habitats des bénévoles). Les concentrations obtenues sur les volontaires sont plus proches des concentrations mesurées à l'intérieur que de celles mesurées à l'extérieur.

- Les valeurs K_{LCl} , obtenues à l'extérieur pendant la première période, permettraient de tracer les courbes d'isoconcentrations (figure 1). Ces courbes sont obtenues par le procédé d'interpolation par krigeage dans un maillage géostatistique. La zone de plus fortes concentrations pondérées dans l'air extérieur se trouve principalement au centre-ville.

- Les effets des polluants sur la santé sont directement liés à l'exposition totale, c'est-à-dire à la somme des produits du temps passé dans un micro-environnement (à la maison, au bureau...) par la concentration correspondant à ce micro-environnement. La figure 2 montre le budget espace-temps de l'ensemble des participants : 100 % signi-

fié que les 20 personnes ont passé tout leur temps au même endroit. Le temps cumulé passé à l'intérieur (à la maison, au travail, dans les moyens de transport...) s'élève à environ 70 % du total. Étant donné les concentrations très élevées à l'intérieur, l'exposition totale à l'ensemble des aldéhydes étudiés est fortement liée à la qualité de l'air intérieur.

- La figure 3 montre une forte corrélation entre la somme des concentrations du formaldéhyde et de l'acétaldéhyde et la somme de toutes les concentrations pondérées des composés étudiés. On peut donc utiliser le formaldéhyde et l'acétaldéhyde comme traceurs pour l'ensemble des aldéhydes étudiés.

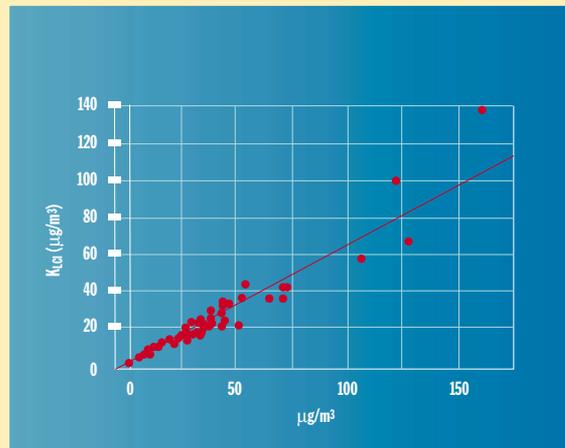


Figure 3 - Somme de toutes les concentrations pondérées des aldéhydes étudiés K_{LCI} en fonction de la somme des concentrations de formaldéhyde et d'acétaldéhyde.

Les deux composés peuvent servir de traceurs pour l'ensemble des aldéhydes étudiés.

Conclusion

Cette étude confirme que la surveillance de l'air extérieur ne rendra qu'imparfaitement compte de l'exposition totale des citoyens aux aldéhydes. L'analyse de l'air intérieur permettrait d'avoir une image de l'exposition totale plus proche de la réalité. Il resterait toutefois à élucider les raisons pour lesquelles les capteurs portatifs révèlent parfois des expositions individuelles très supérieures à celle qui correspond à l'air intérieur, et à identifier les micro-environnements responsables de cette situation.

Développement et validation d'un marqueur biologique des œstrogènes mimétiques: la vitellogénine

Il est aujourd'hui admis que de nombreuses substances chimiques présentes dans l'environnement aquatique sont potentiellement capables de perturber le système endocrinien des organismes, donc, potentiellement, d'agir sur des processus physiologiques divers tels que le maintien de l'homéostasie, la croissance, la différenciation sexuelle, la reproduction. Ces substances ont été regroupées sous le terme générique de perturbateurs endocriniens, et ont été définies

- La perturbation du système endocrinien des espèces vivantes par certaines substances chimiques peut avoir des conséquences graves sur les équilibres physiologiques au sein des organismes. La mise en évidence d'éventuels effets néfastes nécessite le recours à des biomarqueurs d'exposition. L'induction de la vitellogénine chez le poisson mâle constitue un tel indicateur d'exposition. L'INERIS a développé des méthodes de détection de la vitellogénine adaptées à différentes espèces de poissons

► et validé la pertinence de ce marqueur par des essais de laboratoire avec un œstrogène naturel (œstradiol) et une substance chimique aux propriétés œstrogènes mimétiques avérées (4-nonylphénol).

par l'OCDE comme « des substances exogènes qui provoquent des effets néfastes sur un organisme, ou sa descendance, à la suite de modifications de la fonction endocrine ».

Parmi ces substances, les plus étudiées sont les œstrogènes mimétiques qui exercent leur action toxique en interagissant avec le récepteur des hormones œstrogènes et sont capables de provoquer des réponses cellulaires, tissulaires similaires à celles des œstrogènes endogènes. Face au risque potentiel qu'elles exercent sur la capacité de reproduction des organismes aquatiques, il est important de développer des outils qui permettent de détecter précocement l'exposition des organismes à ces substances. Dans cette optique, on peut s'intéresser au développement de marqueurs biologiques de toxicité sublétales spécifiques des œstrogènes mimétiques. Les marqueurs biologiques correspondent à des mesures moléculaires, biochimiques ou histologiques et ont été utilisés pour caractériser les expositions ainsi que les effets biologiques liés aux contaminants de l'environnement.

La vitellogénine, marqueur biochimique des œstrogènes mimétiques

La vitellogénine est une protéine synthétisée par l'ensemble des vertébrés ovipares femelles au cours du cycle reproducteur. Elle est produite au niveau du foie, sécrétée dans la circulation sanguine et transportée jusqu'aux ovaires où elle s'accumule dans les ovocytes en croissance pour constituer le précurseur des réserves nutritives nécessaires au développement du futur embryon. La synthèse de cette protéine est sous dépendance des œstrogènes endogènes, et normalement produite par les femelles seulement durant le cycle reproducteur. Chez les individus non sexuellement matures et chez les mâles, le gène codant pour cette protéine ne s'exprime pas ou très peu. En revanche, il peut s'exprimer et induire la synthèse de la vitellogénine suite à l'exposition de ces organismes à des (xéno-)œstrogènes présents dans le milieu aqueux. Ainsi, la mesure d'une induction de la vitellogénine chez le mâle ou chez le juvénile peut être envisagée comme biomarqueur d'exposition aux œstrogènes. Toutefois, sa pertinence physiologique et écologique reste à démontrer et fait l'objet de nombreuses recherches.

Les études menées par l'INERIS en collaboration avec le CEMAGREF, dans le cadre du programme PNETOX, s'orientent autour de trois axes complémentaires :

- développer des méthodes de mesure fiables et sensibles de la vitellogénine chez différentes espèces de poissons ;
- mesurer des inductions de vitellogénine chez des poissons exposés à des substances modèles au laboratoire comme l'œstradiol et le nonylphénol ;
- interpréter l'induction de vitellogénine chez le mâle en termes d'effets avérés sur la reproduction des individus et des populations : analyses histologiques des gonades, *sex ratio*, capacité de reproduction, etc.

Quantification de la vitellogénine

Nous avons choisi de développer des méthodes immunologiques (ELISA) basées sur la reconnaissance de la vitellogénine à l'aide d'anticorps. Ces méthodes présentent l'avantage d'être spécifiques de la vitellogénine et de permettre la quantification de faibles niveaux de vitellogénine circulante (de l'ordre du ng/ml de plasma). Le développement de ces méthodes nécessite dans un premier temps de purifier la vitellogénine de l'espèce considérée, afin de disposer au minimum d'un standard spécifique. La variabilité des séquences d'acides aminés de la vitellogénine chez les poissons provoque des spécificités d'anticorps et empêche l'utilisation d'une méthode de mesure unique pour les différentes espèces. Par conséquent, pour chacun des modèles biologiques retenus, une méthode ELISA a été développée.

Purification de la vitellogénine

Une méthode chromatographique basée sur les propriétés de charge (chromatographie échangeuses d'anions) et de masse (gel filtration) de la protéine a été développée pour obtenir une protéine pure sous forme native. Cette double méthode chromatographique a été appliquée pour purifier la vitellogénine de salmonidés (truite) et de cyprinidés (chevaine, goujon). La purification a été réalisée, pour ces trois espèces, à partir d'échantillons plasmatiques de poissons induits par de l'œstradiol, et à partir d'un homogénat de poisson pour les espèces de petites tailles comme le poisson-zèbre ou l'épinoche. La figure 1 montre les profils chromatographiques obtenus lors de la purification de la vitellogénine de poisson-zèbre. La méthodologie développée nous a permis de purifier la vitellogénine de cinq espèces de poissons (*tableau 1*). L'analyse électrophorétique, en conditions

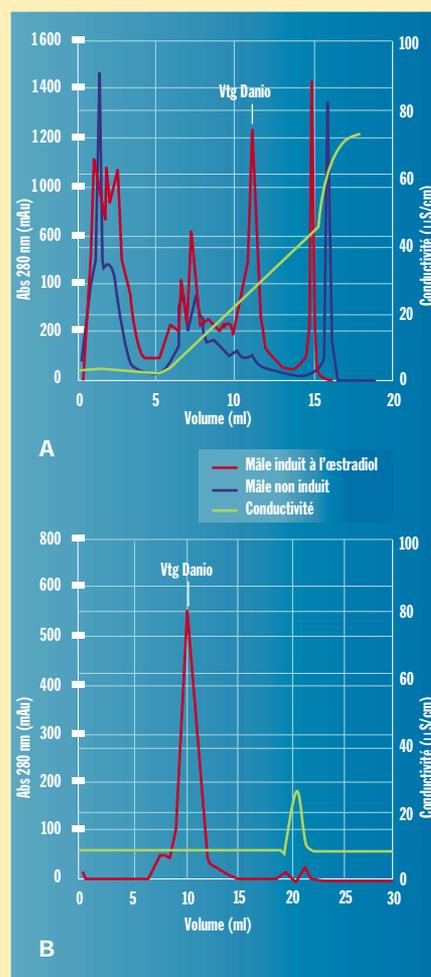


Figure 1 - Profils des protéines d'un homogénat de poisson-zèbre mâle non induit (courbe bleue) et induit à l'œstradiol (courbes rouges) en chromatographie échangeuse d'anions (A) et gel filtration (B).

RISQUES CHRONIQUES

Tableau 1 - Espèces pour lesquelles la vitellogénine a été purifiée.

Famille	Espèces	Nom commun	Matrice	Type d'étude
Salmonidés	<i>Onchorynchus mykiss</i>	Truite arc-en-ciel	Plasma	Étude en laboratoire
Cyprinidés	<i>Gobio gobio</i>	Goujon	Plasma	Étude <i>in situ</i>
Cyprinidés	<i>Leuciscus cephalus</i>	Chevaine	Plasma	Étude <i>in situ</i>
Cyprinidés	<i>Danio rerio</i>	Poisson-zèbre	Homogénat	Étude en laboratoire Reproduction
Gastérostéidés	<i>Gasterosteus acculeatus</i>	Épinoche	Homogénat	Étude en mésocosme – dynamique de population

natives, de la solution obtenue après les deux étapes de chromatographie permet de s'assurer de la pureté de la protéine et de la caractériser (figure 2).

Tableau 2 - Caractéristiques des méthodes ELISA développées.

ELISA	Vtg standard	Anticorps	Limite de détection (ng/ml)	Gamme de linéarité (ng/ml)
Truite arc-en-ciel	Truite	Anti-Vtg de saumon	7,8	15-110
Goujon	Carpe	Anti-Vtg de carpe	1	1-50
Chevaine	Carpe	Anti-Vtg de carpe	1	1-50
Poisson-zèbre	Poisson-zèbre	Anti-Vtg de <i>Danio</i>	0,3	1-30

Développement et validation de méthodes ELISA

Dans les étapes de développement, les conditions optimales des différents réactifs ont été déterminées afin d'obtenir une méthode permettant de détecter de faibles quantités de vitellogénine, d'avoir une gamme de calibration la plus large possible et de disposer d'une méthode répétable et reproductible. Le tableau 2 résume les principales caractéristiques des méthodes développées pour les différents modèles biologiques ; les coefficients de variations de répétabilité et de reproductibilité sont inférieurs à 10 % pour les trois méthodes.

Nous avons utilisé soit des anticorps disponibles sur le marché, soit, dans le cas du poisson-zèbre (figure 3), des anticorps polyclonaux et monoclonaux développés à partir de vitellogénine purifiée au laboratoire – en collaboration avec le laboratoire Biosense (Bergen, Norvège).

Mise en évidence du potentiel œstrogénique d'une substance : étude de l'induction de la vitellogénine au laboratoire

L'OCDE préconise le développement et la validation de tests *in vivo* pour détecter les substances susceptibles de perturber le système endocrine des vertébrés aquatiques. Parmi les mesures préconisées, des marqueurs biochimiques spécifiques tels que la vitellogénine sont recommandés, en association avec l'histologie des gonades ou l'indice gonado-somatique.

Les études en laboratoire permettent, dans des conditions expérimentales simplifiées et contrôlées, d'exposer des organismes à une substance chimique et d'établir des relations doses-effets entre la concentration du toxique et la réponse biologique mesurée. A titre d'exemple, des truites juvéniles (génétiquement mâle et femelle) ont été exposées en continu durant trois semaines à 10, 50 et 100 µg/l de 4-n-nonylphénol et à 250 ng/l d'œstradiol (témoin positif). Après 10 et 21 jours d'exposition, du sang a été prélevé pour chacun des individus et la mesure de la vitellogénine a été réalisée dans le plasma par la méthode ELISA développée pour la truite. Une induction significative de la vitellogénine chez les truites exposées à l'œstradiol et à la plus forte concentration de 4-n- nonylphénol (*figure 4*) a été observée après 21 jours.

Les concentrations en vitellogénine sont 30 000 fois et 400 fois plus importantes chez les poissons exposés respectivement au stéroïde naturel et au nonylphénol, comparativement aux groupes contrôles. Ainsi, la quantification de la vitellogénine après exposition nous a permis de mettre en évidence le potentiel œstrogénique du nonylphénol. Comparativement à l'œstradiol, ce potentiel œstrogénique est faible et lié, en partie, à sa plus faible affinité pour le récepteur œstrogène.

Pertinence physiologique et écologique de l'induction de vitellogénine

L'induction de vitellogénine chez les poissons mâles et chez les juvéniles témoigne d'une exposition à un œstrogène exogène. La

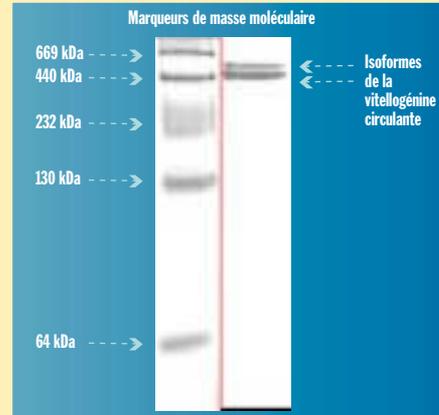


Figure 2 - Profil électrophorétique en conditions non dénaturante et non réductrice de la solution de vitellogénine de *Danio* obtenue après les deux étapes de purification. Aucune autre protéine n'est colorée, ce qui montre la pureté de la fraction isolée.

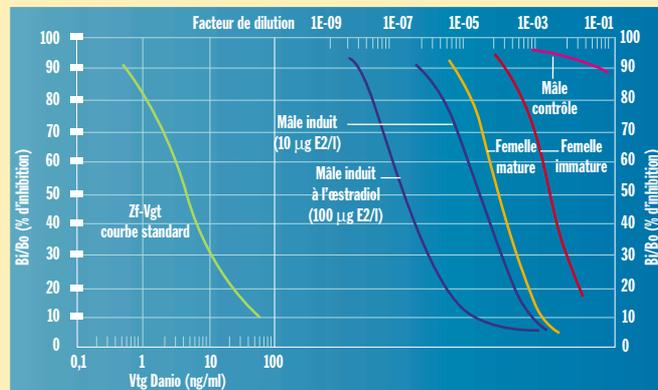


Figure 3 - Méthode ELISA compétitive développée pour le poisson-zèbre : courbes de compétitions obtenues par dilutions séquentielles d'homogénats de poisson mâle et femelle (E2: œstradiol).

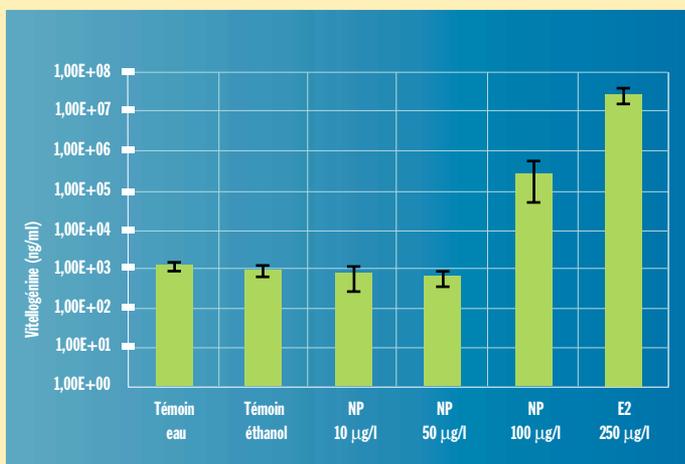


Figure 4 - Concentrations en vitellogénine plasmatique (ng/ml) chez la truite arc-en-ciel après 21 jours d'exposition.

pertinence physiologique et écologique de cette induction doit être recherchée au moyen d'indicateurs d'effet dans des expérimentations *in vivo*.

Induction de la vitellogénine et perturbations du métabolisme

Chez des poissons exposés à de l'œstradiol, nous avons pu mesurer une augmentation massive des protéines totales et du calcium total circulant dans le sang, témoignant des perturbations métaboliques qu'engendre une induction massive de vitellogénine. La mobilisation des réserves calciques (os et écailles) vers le sang a été

associée par certains auteurs à un risque accru des organismes vis-à-vis des maladies. De plus, la synthèse massive de vitellogénine représente un coût énergétique important, la vitellogénine pouvant représenter la moitié des protéines totales circulantes. Cette allocation d'énergie pour synthétiser une protéine non essentielle pour l'organisme peut se traduire par un retard de croissance. Chez les poissons exposés au nonylphénol, aucune de ces modifications n'a pu être observée. En revanche, nous avons pu mettre en évidence, par la mesure de marqueurs biochimiques hépatiques (alanine aminotransférase et aspartate aminotransférase), une toxicité de la substance vis-à-vis du foie, organe cible privilégié de nombreux xénobiotiques en raison de ses capacités de métabolisation.

Induction de la vitellogénine et effets sur la reproduction

Actuellement, une série d'expérimentations est réalisée sur le poisson-zèbre (*Danio rerio*), espèce qui atteint sa maturité sexuelle rapidement (trois mois) et se reproduit à intervalles réguliers (tous les trois ou quatre jours). Ainsi, il est possible d'étudier les réponses biologiques à des degrés de complexité différents : au niveau biochimique (induction de vitellogénine), tissulaire (histopathologie des gonades mâles et femelles) et des individus (succès reproducteur). Ces expériences visent à mieux interpréter la mesure d'une induction de vitellogénine en termes d'effets sur le développement et la reproduction des organismes. Existe-t-il des relations entre la

mesure de la vitellogénine et des effets sur la reproduction ? La mesure d'une induction de vitellogénine chez des organismes immatures peut-elle être prédictive d'effets sur leur capacité future à se reproduire ? Pour tenter de répondre à ces questions, des expérimentations ont été réalisées sur des poissons zèbres exposés au 17- β -œstradiol à différents stades de leur cycle de vie (stade embryo-larvaire, stade juvénile, stade adulte), afin de prendre en compte les phases critiques de leur développement sexuel : différenciation sexuelle, développement et acquisition de la maturité sexuelle, reproduction proprement dite à l'âge adulte. Les premiers résultats montrent que les effets biologiques sont différents selon le stade de développement. Durant le stade embryo-larvaire, l'exposition à 100 ng/l d'œstradiol se traduit par une féminisation de la population : inversion complète du *sex ratio* comparativement au groupe contrôle. Une exposition à un stade ultérieur (stade juvénile), se traduit par un retard de ponte, témoignant probablement d'un retard dans l'acquisition de la maturité sexuelle. Chez ces mêmes poissons, le nombre d'œufs pondus décroît en fonction de la concentration d'œstradiol.

Conclusion

Ces recherches ont permis d'acquérir, dans un premier temps, des méthodes de mesures fiables et sensibles de la vitellogénine dans différentes espèces de poissons. Au laboratoire, nous avons pu mettre en évidence des inductions de vitellogénine chez des poissons exposés à deux substances modèles (œstradiol et nonylphénol) et, parallèlement, observer des altérations histologiques au niveau des gonades. Si aujourd'hui la vitellogénine est considérée à juste titre comme un marqueur biologique sensible et spécifique des œstrogènes mimétiques, il n'en reste pas moins que la pertinence écologique de sa mesure reste à démontrer. Nos expériences vont dans ce sens et seront complétées par l'étude en mésocosmes de l'impact du nonylphénol sur la population d'épinoche, où différents biomarqueurs sont envisagés, dont la vitellogénine.

Les œstrogènes mimétiques ne représentent qu'une catégorie de substances pouvant potentiellement agir sur la reproduction et il sera indispensable de développer d'autres marqueurs biologiques permettant de prendre en compte les autres modes d'action possibles des xénobiotiques sur la reproduction des vertébrés aquatiques.

Publications

Ce travail a fait l'objet de plusieurs publications et communications.

- **Brion (F.), Rogerieux (F.), Noury (P.), Migeon (B.), Flammarion (P.), Thybaud (E.), and Porcher (J.M.):** Two-Step Purification Method of Vitellogenin from Three Teleost Fish Species : Rainbow Trout (*Onchorynchus mykiss*), Gudgeon (*Gobio gobio*) and Chub (*Leuciscus cephalus*). *Journal of Chromatography B*, 2000, 737, p. 3-12.
- **Flammarion (P.), Brion (F.), Palazzi (X.), Garric (J.), Migeon (B.), Noury (P.), Thybaud (E.), and Tyler (C.R.):** Estrogenic Effects in Chub (*Leuciscus cephalus*): Induction of Vitellogenin and Alterations in Testicular Structure. *Ecotoxicology*, 2000, 9, p. 127-135.
- **Brion (F.), Palazzi (X.), Flammarion (P.), Thybaud (E.), Porcher (J.M.):** Estrogenic and Non-Estrogenic Effects of 4-n-Nonylphenol in Juvenile Rainbow Trout (*Onchorynchus mykiss*). *Soumis*.
- **Brion (F.), Nilsen (B.M.), Eiden (J.K.), Goksoyr (A.) and Porcher (J.M.):** Development and Validation of an ELISA to Measure Vitellogenin in Zebrafish (*Danio rerio*). *Soumis*.

Communications orales

- **Brion (F.), Porcher (J.M.), Bazzon (M.), Gondelle (F.), Cornu (L.), Gillet (C.), Garric (J.), Flammarion (P.), Thybaud (E.):** Vitellogenin Induction in Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) after Water Exposure to 4-Nonylphenol and 17- β -Estradiol. *Conférence internationale sur les perturbateurs endocriniens, Nantes, SEFA, octobre 1999*.
- **Flammarion (P.), Brion (F.), Palazzi (X.), Babut (M.), Forraz (M.), Garric (J.), Migeon (B.), Noury (P.), Porcher (J.M.), Thybaud (E.), Maddix (S.), and Tyler (C.):** Estrogenic Effects on Cyprinid Fish. *Conférence internationale sur les perturbateurs endocriniens, Nantes, SEFA, octobre 1999*.
- **Brion (F.), Triffault (G.), Palazzi (X.), Garric (J.), Laillet (B.), Porcher (J.M.), Thybaud (E.), Tyler (C.R.), Flammarion (P.):** Biological Effects of Exposure of Various Life Stages of Zebrafish to Environmental Concentrations of 17-Beta-Estradiol. *11th Annual Meeting of SETAC Europe. Madrid, Spain, 6-9 May 2001*.
- Quatre posters, dont trois à la SETAC, ont été présentés dans des congrès internationaux.

Évaluation de l'écotoxicité des déchets

La directive 91/689/CEE du 12 décembre 1991 relative aux déchets dangereux établit les règles générales applicables à la gestion des déchets dangereux dans l'Union européenne.

Les déchets dangereux sont définis dans cette directive comme :

- des déchets présentant une ou plusieurs des 14 propriétés de danger listées de H1 à H14 dans l'annexe III ;
- des déchets contenant l'un des constituants énumérés à l'annexe II et présentant eux-mêmes une ou plusieurs propriétés de danger.

Ainsi, le caractère dangereux d'un déchet est défini par référence à une liste de propriétés de danger (propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques) ou par référence à sa composition.

Pour la détermination des caractéristiques de danger correspondant aux différents critères H, certaines méthodes d'essai développées pour les substances chimiques (directives 88/302/CEE et 92/69/CEE) sont directement transposables ; en revanche, en ce qui concerne le critère H14 "écotoxique", il n'existe aucune méthode spécifique immédiatement applicable. Ce besoin méthodologique concernant l'évaluation de ce critère "écotoxique" est encore renforcé par les modifications récentes du catalogue européen des déchets, décidées au cours de l'année 2000, qui font apparaître un nombre important d'entrées miroir dans la nomenclature (possibilité de classer un même type de déchet comme dangereux et non dangereux vis-à-vis de l'environnement).

Pour combler cette lacune, le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Bureau de la gestion et du traitement des déchets) a mis en place un groupe de travail chargé d'élaborer une stratégie d'évaluation de ce critère H14. Les travaux ont abouti à la publication d'un document de travail intitulé « Critères et méthodes d'évaluation de l'écotoxicité des déchets » qui propose une méthodologie de caractérisation schématisée sur la figure 1.

Mise en œuvre de la méthodologie

Cette méthodologie a pour principe l'application d'une batterie de tests d'écotoxicité de laboratoire au déchet lui-même (tests phase

■ L'Union européenne a établi des critères permettant de classer certains déchets dans la catégorie des déchets dangereux soumis à une réglementation particulière. Parmi ces critères figure l'écotoxicité (critère H14), pour lequel aucune méthode d'essai n'a été préconisée jusqu'à présent. Après avoir contribué à l'élaboration d'une telle méthode au niveau national, l'INERIS a testé son application à un ensemble de déchets. Les résultats de six bioessais différents, en phase solide et en phase aqueuse, appliqués aux déchets bruts et aux éluats, ont été soumis à une analyse en composantes principales ; celle-ci a mis en évidence des corrélations qui permettent de proposer une réduction du nombre d'essais tout en conservant la même signification des résultats.

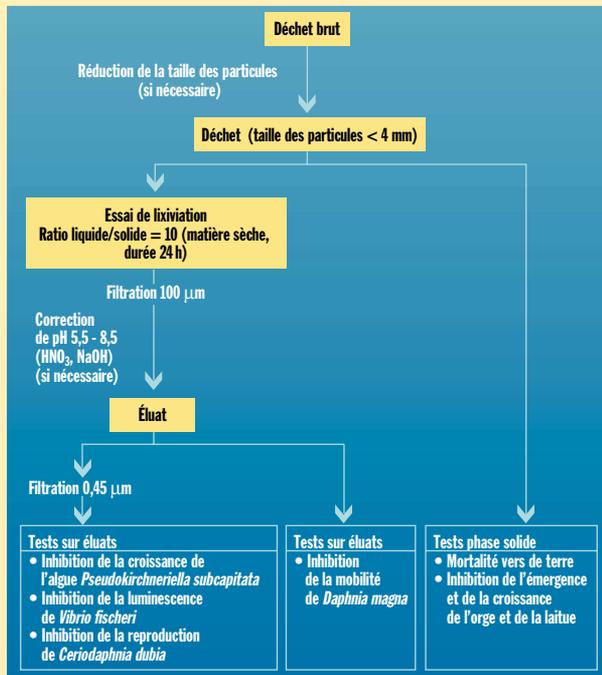
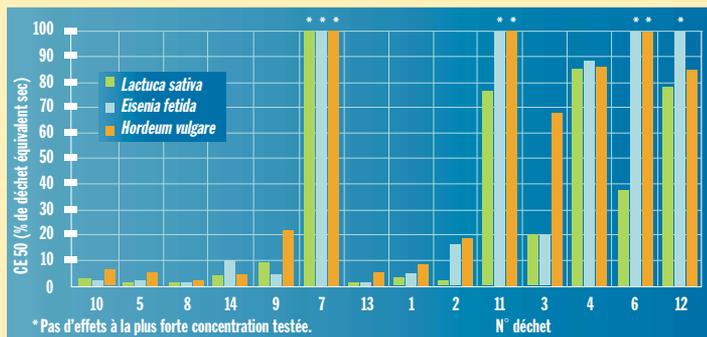


Figure 1 - Méthodologie d'évaluation de l'écotoxicité des déchets.

Figure 2 - Résultats des essais d'écotoxicité terrestre réalisés sur la phase solide des déchets.



solide) et à des éluats du déchet, préparés dans des conditions bien définies (tests sur éluats). L'INERIS a appliqué cette démarche pour caractériser une série de 14 déchets, en majorité des déchets inorganiques issus de procédés thermiques de l'industrie des métaux ferreux et non ferreux (tableau 1).

Les résultats sont exprimés sous forme de CE50 pour les essais d'écotoxicité aiguë et de CE20 pour les essais d'écotoxicité chronique (concentrations entraînant respectivement 50 % et 20 % d'effet pour la population soumise à essai).

Les figures 2 et 3 permettent de constater que ces résultats sont très contrastés. Ils ont été soumis à une analyse en composantes principales (ACP), afin de mettre en évidence les corrélations entre les différents essais et d'évaluer la possibilité de regrouper les déchets en groupes homogènes en fonction de leurs propriétés écotoxiques.

Résultats de l'analyse en composantes principales

L'ACP a permis l'extraction de deux composantes principales qui expliquent plus de 93 % de la variabilité des données. Le premier axe (axe horizontal des figures 4 et 5) représente 80 % de la variabilité et permet d'identifier les déchets qui sont toxiques pour tous les essais aquatiques ou terrestres (déchets 1, 2, 5, 8, 9, 10, 13 et 14) et ceux qui ne le sont pas (déchets 4, 6 et 12). Le second axe représente 13 % de la variance et permet de distinguer les déchets

qui ne sont toxiques que pour une catégorie d'essais.

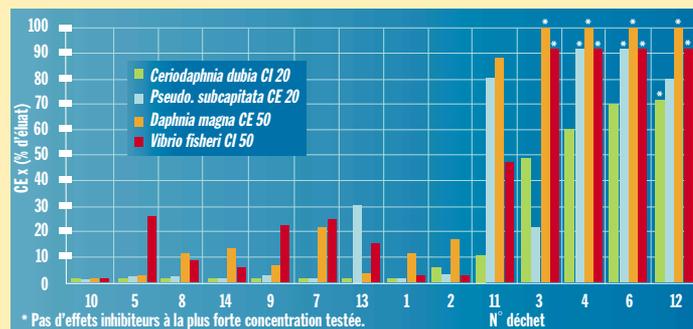
La spécificité du déchet 7, qui n'a présenté aucun effet toxique à la suite des essais sur le déchet brut mais des effets inhibiteurs importants sur la reproduction de *Ceriodaphnia dubia* et sur la croissance de *Pseudokirchneriella subcapitata*, apparaît clairement sur la figure 4. L'analyse chimique effectuée en parallèle a essentiellement révélé la

Identification des déchets	Catalogue européen des déchets	Description
1	04 01 06	Boue contenant du chrome (effluents de l'industrie du cuir)
2	04 01 06	Boue contenant du chrome (effluents de l'industrie du cuir)
3	10 03 10	Traitement des scories salées (pyrométallurgie de l'aluminium)
4	10 02 01	Laitier de haut fourneau (industrie sidérurgique)
5	10 02 03	Poussières d'aciérie électrique (industrie sidérurgique)
6	10 02 05	Boue de laminoir (industrie sidérurgique)
7	10 02 04	Boue provenant de l'épuration des fumées (industrie sidérurgique)
8	10 03 11	Poussières de filtration des fumées (pyrométallurgie de l'aluminium)
9	10 03 12	Fines de broyage de crasses blanches (pyrométallurgie de l'aluminium)
10	10 09 04	Poussières de four de fonderie (déchet de fonderie de métaux ferreux)
11	03 03 05	Boue de désencrage provenant du recyclage du papier
12	08 01 04	Déchet de peinture en poudre
13	05 01 03	Boue de fond de cuve (raffinage du pétrole)
14	08 01 05	Peintures et vernis séchés

présence de zinc (concentration de l'ordre de 2,5 mg/l). Ce composé, connu pour sa forte toxicité vis-à-vis de la croissance algale, apparaît vraisemblablement à l'origine des effets inhibiteurs observés. Le déchet 11, qui n'a entraîné que de faibles effets inhibiteurs sur la reproduction de *Ceriodaphnia dubia*, se situe dans la même partie de la figure 4 que le déchet 7. Il est cependant moins corrélé avec l'axe F2 que ce dernier. On peut donc le considérer comme faiblement toxique. Le déchet 3, provenant du traitement des scories salées, pour lequel des effets toxiques de faible intensité n'ont été constatés que sur organismes terrestres (laitue et vers de terre), se situe logiquement à l'opposé des essais terrestres sur le second axe. Étant donné les niveaux de toxicité mesurés et l'absence d'effets sur les autres organismes, il peut être considéré par jugement d'expert comme non toxique.

Tableau 1 - Liste des déchets testés.

Figure 3 - Résultats des essais réalisés sur les éluats des déchets.



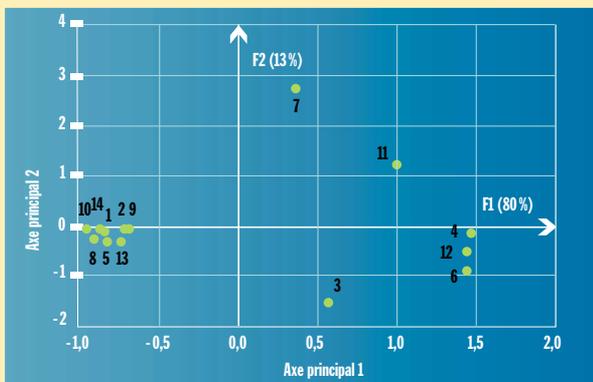


Figure 4 - Représentation, sur le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales, des coordonnées des déchets; ceux-ci sont identifiés par des numéros de 1 à 14 indiquant l'ordre de présentation dans le tableau 1.

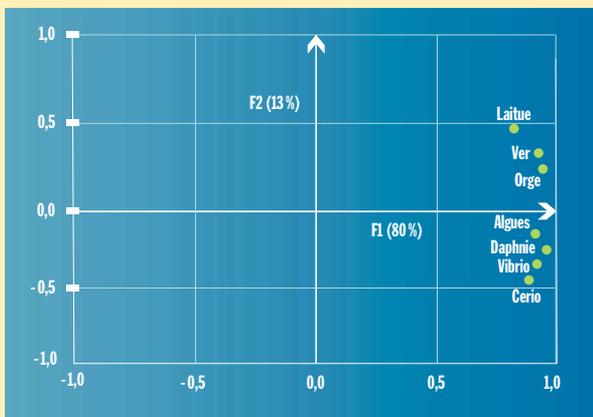


Figure 5 - Représentation, sur le premier plan factoriel de l'analyse en composantes principales, des coordonnées des essais considérés.

Toutes les coordonnées des essais considérés sont situées dans la même partie du diagramme de corrélation (figure 5), ce qui montre que les essais d'écotoxicité répondent globalement de la même façon. Les deux groupes d'essais (tests sur organismes terrestres et tests sur éluats) apparaissent néanmoins séparés sur ce diagramme et les corrélations, deux à deux, confirment ces observations (tableau 2).

L'analyse statistique des données de cette étude a mis en évidence que les essais terrestres étaient peu corrélés avec les essais aquatiques, confirmant ainsi

une certaine complémentarité entre ces deux types d'essais.

Parmi les essais vis-à-vis des organismes terrestres, une sensibilité plus élevée de la laitue a été observée par rapport à celle de l'orge ou du ver de terre (figures 2 et 5). Cette différence est plus particulièrement marquée pour le déchet 2, appartenant à la catégorie 04 01 06.

En ce qui concerne les essais vis-à-vis des organismes aquatiques, sur l'ensemble des déchets considérés dans cette étude, l'inhibition

de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia* s'est révélée globalement le paramètre le plus sensible. Aucune prédominance de l'un des deux tests aigus n'a pu être mise en évidence, la sensibilité respective de chacun variant selon les déchets. Les corrélations deux à deux font également apparaître que ces deux essais – inhibition de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia* et inhibition de l'émergence et de la croissance de la laitue – sont les moins corrélés (tableau 2).

Proposition d'optimisation de la stratégie d'évaluation du critère H14

Les fortes corrélations observées entre les différents essais permettent de proposer une réduction significative du nombre de tests à mettre en œuvre par rapport à la stratégie initiale. En effet, sur le jeu de données étudié, il semble que l'association d'un essai aquatique et d'un essai terrestre puisse être suffisante pour caractériser l'écotoxicité d'un déchet.

	Cériodaphnies CI 20	Algues CE 20	Daphnies CE(i) 50	<i>V. fischeri</i> CI 50	Laitue CI 50	Vers de terre CL 50	Orge CI 50
Cériodaphnies CI 20	1,00	0,81**	0,91**	0,94**	0,48	0,64*	0,66*
Algues CE 20	-	1,00	0,86**	0,81**	0,63*	0,79**	0,74**
Daphnies CE(i) 50	-	-	1,00	0,94**	0,63*	0,75**	0,82**
<i>V. fischeri</i> CI 50	-	-	-	1,00	0,58*	0,68**	0,76**
Laitue CI 50	-	-	-	-	1,00	0,92**	0,89**
Vers de terre CL 50	-	-	-	-	-	1,00	0,94**
Orge CI 50	-	-	-	-	-	-	1,00

* Corrélation significative au niveau 0,05 (bilatéral).

** Corrélation significative au niveau 0,01 (bilatéral).

L'association regroupant les deux essais les plus sensibles et les moins corrélés (inhibition de la reproduction de *Ceriodaphnia dubia*, et inhibition de l'émergence et de la croissance de la laitue) pourrait permettre d'identifier le caractère toxique d'un déchet aussi sûrement que la batterie complète proposée. Toutefois, il est important de rappeler que cette réflexion a été menée sur la base des résultats correspondant à 14 déchets, dont la représentativité paraît limitée par rapport à l'ensemble des catégories définies dans le Catalogue européen des déchets (C.E.D.). La majorité des échantillons testés correspond, en effet, à des activités industrielles liées à l'utilisation des métaux (ferreux ou non ferreux). Afin de confirmer ces premières conclusions et d'évaluer la pertinence de la batterie d'essais proposée, les essais seront renouvelés sur d'autres déchets représentant de façon la plus large possible les différents types identifiés : déchets organiques, déchets liquides miscibles ou non miscibles à l'eau...

Communication

- **Pandard (P.), Poulsen (V.), Magaud (H.), Lhenry (M.C.) et Thybaud (E.)**: Ecotoxicological Characterisation of Wastes. 3rd SETAC World Congress, Brighton, 21-25 mai 2000 [Poster].

Tableau 2 - Corrélations entre les différents essais d'écotoxicité.

■ Les conséquences sanitaires et environnementales du dépôt d'hydrocarbures sur les plages suite au naufrage du pétrolier *Erika* ont fait l'objet d'une étude selon la méthodologie de l'évaluation des risques préconisée par l'Union européenne. La présence de HAP cancérigènes représente bien un danger, mais le risque lié à l'exposition des opérateurs de la pollution est très faible en raison du court temps de présence sur les sites. De même, les risques résiduels pour les estivants fréquentant les plages dépolluées sont faibles, aussi bien à court qu'à long terme, et gérables par l'application de consignes de bon sens.

Évaluation des risques sanitaires et environnementaux liés au naufrage de l'*Erika*

L'INERIS a été sollicité à deux reprises pour évaluer les conséquences du naufrage du pétrolier *Erika*. Par lettre du 11 février 2000, le ministère de l'Aménagement du Territoire demandait de réaliser une évaluation de l'impact sur les personnes exposées ainsi que sur les écosystèmes. Le 3 avril 2000, les ministères chargés de l'Environnement et de la Santé saisissaient l'INERIS, conjointement avec l'InVS (Institut de Veille Sanitaire). L'objectif de la saisine était d'apporter aux autorités des informations permettant d'évaluer l'efficacité des efforts de dépollution d'un point de vue sanitaire et d'éclairer leurs décisions concernant l'ouverture ou la fermeture des plages.

Évaluation des risques sanitaires et environnementaux résultant du naufrage de l'*Erika* et des opérations de nettoyage des côtes

La méthodologie suivie a été celle de l'évaluation des risques telle qu'elle est préconisée par l'Union européenne. Pour l'évaluation des risques sanitaires, celle-ci comprend trois phases :

- l'identification des dangers a été faite pour les substances identifiées par l'analyse des produits prélevés sur les plages ;
- l'exposition des populations a été estimée à partir de scénarios raisonnablement maximisants d'exposition, en tenant compte des voies d'exposition (respiratoire, orale et cutanée). Des mesures ont été effectuées sur site pour évaluer l'exposition pendant certaines phases qui avaient été identifiées comme susceptibles d'être polluantes. Des essais en laboratoire ont été menés pour compléter ces mesures et estimer l'exposition par inhalation due aux émissions de composés volatils : COV (composés organiques volatils) et HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) ;
- l'évaluation des risques sanitaires a été conduite en prenant appui sur les indices de référence de la banque de données IRIS de l'EPA aux États-Unis (*Integrated Risk Information*).

L'évaluation des risques écologiques a été faite également en utilisant la méthodologie préconisée par l'Union européenne.

Sept rapports sectoriels ont été rédigés, correspondant aux différentes phases du processus :

- analyse de produits ;
- risques liés aux soins apportés aux oiseaux ;
- toxicologie ;
- émissions de COV lors d'essais en laboratoire ;
- évaluation des expositions lors des dépollutions ;
- évaluation du risque sanitaire ;
- évaluation du risque écologique.

La conclusion principale est qu'il existe un **danger** lors des opérations de nettoyage, dans la mesure où la présence des HAP cancérigènes a été mise en évidence dans les rejets à une concentration en équivalent benzo(a)pyrène largement supérieure à 50 ppm. Celui-ci est considéré comme cancérigène de référence, et on calcule un indice global en affectant un poids à chaque HAP en référence à la toxicité du benzo(a)pyrène. La valeur de 50 ppm est celle retenue par l'Union européenne pour le classement comme can-

cérigène des dérivés du charbon et du pétrole. **Le risque** lié aux HAP pour les ramasseurs de déchets (le risque est la probabilité de survenue d'un effet suite à une exposition à un danger) est cependant limité pour ce qui est du risque de cancer cutané, dans la mesure où le temps d'exposition n'a été que de quelques jours. Il en est de même pour les risques liés aux COV, notamment au benzène. Cette substance représente un **danger**, car elle est effectivement leucémogène, mais les concentrations mesurées induisent un niveau de **risque très faible**. Une incertitude subsistait pour les nettoyeurs d'oiseaux qui ont pu être amenés à les manipuler à mains nues. Des effets du type irritation des yeux, de la gorge et de la peau, des



Équipe de ramassage sur un site de dépollution.



Échantillonnage des HAP durant le poste de «décontamination».

maux de tête étaient vraisemblables, compte tenu de ce qui avait été déjà décrit à ce sujet dans la littérature scientifique. Ceci a été confirmé par l'étude effectuée par la suite par l'InVS. En raison du danger des substances manipulées, des mesures de protection –essentiellement cutanées– paraissaient justifiées pour les volontaires, tout comme l'exclusion des enfants et des femmes enceintes de cette activité. Pour les professionnels exposés plus longtemps, lors des opérations de décontamination des rochers

ou de nettoyage des matériels, le risque de cancer justifiait des mesures de protection respiratoire et cutanée.

L'évaluation des risques écologiques montre qu'il existe un risque en exposition locale de type aigu et chronique pour les substances solubles. Le risque à l'échelle régionale apparaît négligeable. Pour les substances insolubles comme les HAP, susceptibles de contaminer les sédiments, les estimations restent peu réalistes, et seul un dispositif de surveillance permettra d'évaluer véritablement l'impact écologique sur le long terme.

Évaluation du risque sanitaire résiduel pour les populations fréquentant les plages polluées par le fioul, après dépollution

Le travail s'est appuyé sur une campagne de prélèvements et d'analyses chimiques *in situ* pour répondre à la question suivante :

- «Quels sont les risques sanitaires, à court et long terme, encourus par des adultes et des enfants qui vont fréquenter, durant la prochaine période estivale, les plages du littoral affectées par le fioul du pétrolier *Erika*, après les travaux de dépollution ?».

Il ne s'agissait donc pas de mener une étude exhaustive de la

pollution de toutes les plages ayant fait l'objet d'un nettoyage, ni de décider de la salubrité de chaque plage investiguée.

Cette évaluation du risque sanitaire résiduel montre que les risques sont faibles, tant à court terme qu'à long terme. Concernant les effets immédiats, l'effet léthal est improbable, mais des troubles tels que fatigue, douleurs abdominales, diarrhée et anémie réversible ne sont cependant pas à exclure, en particulier dans l'hypothèse d'un enfant ingérant une boulette de fioul résiduelle. Par ailleurs, il existe un risque de réactions cutanées si la peau souillée par les résidus de fioul est exposée au soleil. Une vigilance normale des personnes et l'application de consignes simples (nettoyage de la peau souillée) doivent permettre d'empêcher la survenue de ces effets aigus.

Les risques de cancer et d'effets tératogènes encourus par les populations sur les plages dépolluées ne présentent pas de différences majeures avec ceux encourus sur les plages témoins, sauf lorsque les travaux de dépollution n'ont pu être menés à bien complètement, ce qui a été observé sur certaines zones de rochers. Ainsi, bien que cette étude n'ait pas été conduite pour répondre à cette autre question, on peut imaginer que le risque associé à la situation de plages non encore décontaminées ou récemment atteintes par de nouvelles plaques de fioul serait significatif, ce qui devrait conduire à leur fermeture provisoire. Elle conforte ainsi la validité des critères d'ouverture des plages fondés sur une appréciation visuelle, par les autorités sanitaires locales, du résultat des travaux de dépollution.

Publications

- **Cicolella (A.)** : Évaluation des risques sanitaires et environnementaux résultant du naufrage de l'*Erika* et des opérations de nettoyage des côtes. *Rapport de synthèse et sept rapports sectoriels*. Rapports disponibles sur le site Internet de l'INERIS www.ineris.fr.
- **Cicolella (A.), Bonnard (R.), Dujardin (R.) [INERIS], Dor (F.), Gourier-Fréry (C.), Zmirou (D.) [InVS]** : Évaluation du risque sanitaire résiduel pour les populations fréquentant les plages polluées par le fioul rejeté par l'*Erika*, après dépollution.
- **Boudet (C.), Chemin (F.), Bois (F.), Cicolella (A.)** : The *Erika* Oil Spill: a Health Risk Assessment Case Study in an Evolving French Environmental Health Context. *10th Annual Conference of the International Society of Exposure Analysis, Monterey, 24-27 octobre 2000 [Poster]*.

■ Les aménageurs et les animateurs de zones d'activités sont de plus en plus sensibles à la qualité des relations de ces zones avec leur environnement. L'INERIS a élaboré une méthodologie de diagnostic environnemental qui permet d'évaluer ces relations. Ce diagnostic repose sur un questionnaire mettant en évidence la perception de leur environnement par les entreprises et sur des investigations de terrain pour caractériser chaque site. La méthode a été mise en œuvre et validée sur quatre zones différentes d'une agglomération de 180 000 habitants.

Apport méthodologique pour la réalisation de diagnostics environnementaux de zones d'activités

Un besoin affirmé d'inscrire les zones d'activités dans une perspective de développement durable

La France compte aujourd'hui plus de 20 000 zones d'activités ⁽¹⁾ (ZA). Depuis quelques années, les collectivités et les établissements publics territoriaux attachent une importance accrue à la gestion environnementale de celles-ci, de manière à favoriser leur intégration dans le tissu social et économique et à les rendre attractives pour les acteurs économiques, tout en souscrivant aux principes du développement durable. De nombreuses démarches collectives, plus ou moins approfondies, ont d'ores et déjà été engagées comme :

- l'application d'un cahier des charges architectural et environnemental à la construction d'une nouvelle zone ;
- l'adoption d'une charte de qualité environnementale, avec souvent l'application des principes développés par l'association Haute Qualité Environnementale (HQE) ;
- la mise en place d'actions collectives améliorant la maîtrise des impacts environnementaux, par une chambre de commerce et d'industrie (CCI) ou une collectivité : traitement des eaux usées, gestion collective de déchets, production d'énergie... ;
- la certification d'un système de management environnemental, ce qui nécessite toutefois que la ZA soit animée par un gestionnaire ;
- une démarche d'écologie industrielle par recherche de synergie interentreprises.

Cependant, quel que soit le type de démarche envisagée, un diagnostic environnemental des zones d'activités est nécessaire afin d'identifier les interactions entre les activités exercées et le cadre environnemental dans lequel elles s'insèrent. Une demande de la communauté d'agglomération Amiens-Métropole et de la chambre

(1) Il n'existe pas de définition juridique précise : c'est le rassemblement de bâtiments à usages tertiaire et industriel (technopoles, ports, aéroports, centres commerciaux, zones logistiques, artisanales, de loisirs, multiplexes, etc.).

de commerce et d'industrie d'Amiens, qui ont en charge le développement de l'agglomération amiénoise et plus particulièrement des zones d'activités, a permis à l'INERIS de développer une méthodologie de réalisation des diagnostics environnementaux de zones d'activités et de la valider en la mettant en œuvre sur une agglomération de plus de 175 000 habitants.



Photo Didier Cxy

La méthodologie

Pour chaque zone d'activités étudiée, une plaquette de communication spécifique a permis de promouvoir la démarche et incité les entreprises à collaborer. Par ailleurs, un questionnaire a été mis au point afin de mieux connaître les entreprises implantées sur la zone d'activités. La perception par les entreprises de leur environnement et des impacts qu'elles ont sur lui, ainsi que leurs possibles implications dans des actions communes, pouvaient ainsi être identifiées.

L'une des quatre zones étudiées sur l'agglomération amiénoise : l'Espace Industriel Nord.

Ces outils ont ensuite été validés par la visite d'entreprises représentatives de la zone étudiée.

En parallèle, une investigation sur le terrain, portant sur l'environnement de la zone, a été réalisée. Elle avait pour but de recueillir des données sur les sols, la qualité de l'eau, de l'air et du paysage, les transports, les équipements collectifs existants, les nuisances, ainsi que sur les milieux et les populations sensibles.

Le questionnaire validé a été envoyé à l'ensemble des entreprises concernées, afin de réaliser des estimations quantitatives sur les consommations, rejets et nuisances au sein de la zone, d'avoir une approche de l'impact global de la zone et d'identifier les principaux sujets environnementaux qui les intéressent.

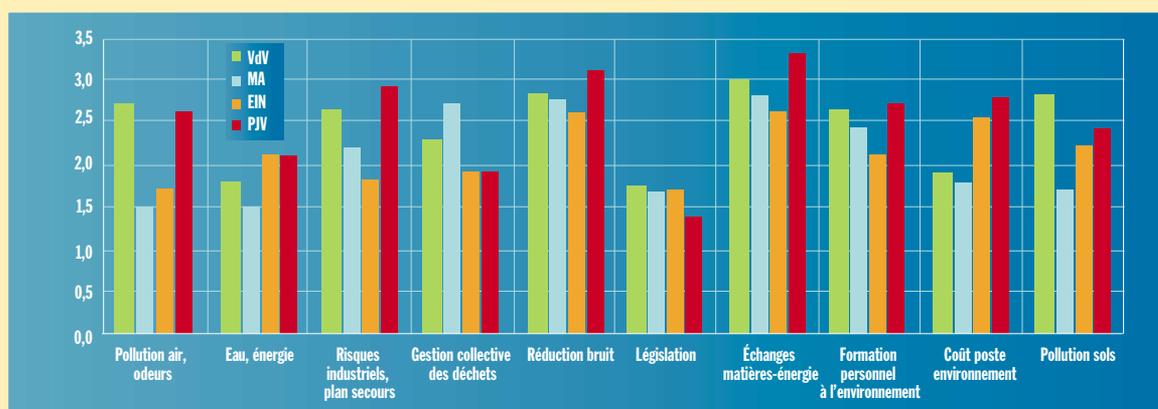
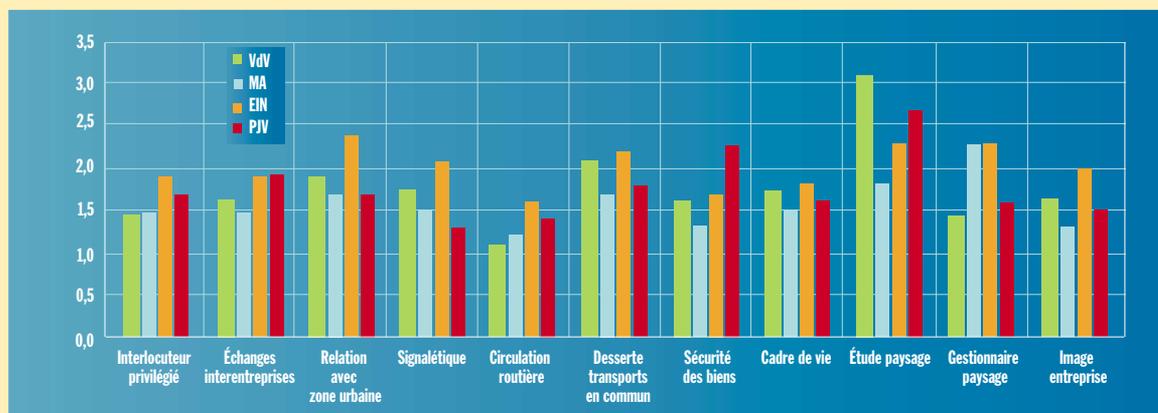
Diagnostic environnemental d'un ensemble de zones d'activités à Amiens

L'INERIS a réalisé le diagnostic environnemental d'un ensemble de zones d'activités en collaboration étroite avec Amiens-Métropole et la CCI d'Amiens. L'étude a bénéficié de l'aide du conseil régional de Picardie, du conseil général de la Somme et de l'ADEME Picardie et s'est déroulée sous le contrôle d'un comité de pilotage.

Les quatre zones concernées présentaient l'intérêt d'être d'ancienneté, d'affectations, de conceptions et d'organisations différentes :

- une zone **industrialisée dès la fin du XVIII^e siècle**, relancée dans les années 50, proche du centre-ville à réhabiliter : Montières Activités (MA) ;
- une zone **d'industrie lourde** développée dans les **années 70** en bordure de la ville, en cours de rénovation (photo) : Espace Industriel Nord (EIN) ;
- une zone **d'activité tertiaire, commerciale et logistique, récente**, située en bordure de la ville, conçue dans un esprit de respect de l'environnement : Pôle Jules-Verne (PJV) ;
- une zone **mixte, tertiaire et habitat, récente**, en entrée de ville, conçue dans un esprit de quartier avec une charte architecturale stricte : Vallée des Vignes (VdV).

Le fort taux de réponse des entreprises au questionnaire – 21 % sur 355 entreprises – a permis de comparer, de façon fiable, les attentes des entreprises selon la typologie des différentes zones et d'obtenir des résultats représentatifs quant aux impacts globaux de la zone sur l'environnement.



Les figures 1a et 1b illustrent les réponses à la partie spécifique du questionnaire en 21 points, consacrée aux attentes des entreprises cotées de 1 (très important) à 4 (sans intérêt).

L'exploitation de ces réponses a notamment montré que les entreprises attachaient généralement la plus grande importance à la signalétique et à la circulation, et qu'elles souhaitent avoir un interlocuteur bien identifié, par exemple un gestionnaire de zone, ce qui n'est pas le cas pour la plupart d'entre elles. Selon les zones d'activités, la réduction des impacts environnementaux négatifs et le respect de la réglementation sont considérés comme plus ou moins importants. En revanche, les démarches vers une synergie et la mise en commun de moyens et de services sont encore éloignées des préoccupations immédiates des entreprises. Enfin, les entreprises du secteur tertiaire commencent à se préoccuper d'environ-

Figures 1a et 1b - Comparaison de 21 points environnementaux pour les quatre zones d'activités étudiées.

nement, surtout sous l'angle du cadre de vie, mais n'ont pas encore la même attitude volontaire que nombre d'entreprises industrielles, souvent déjà engagées à titre individuel dans des démarches de management environnemental ou qui ont déjà un système de management environnemental certifié ISO 14001.

Conclusions

En ce qui concerne la méthode proprement dite, cette expérience a permis d'envisager quelques améliorations du questionnaire. En effet, il a montré qu'il manquait de pertinence pour les commerces, surtout les plus petits ; un questionnaire différent, moins dense, peut être élaboré. De même, certaines questions méritent d'être affinées, comme celles traitant des souhaits. Enfin, certains termes demandent à être explicités. Par exemple, "populations sensibles" est souvent interprété comme "populations délinquantes" et non comme "sensibles" sur le plan santé.

Cependant, la mise en œuvre de la méthode permet déjà de tirer des conclusions d'application générale :

- l'utilité d'une charte de qualité environnementale appliquée à l'ensemble des zones d'activités d'une agglomération. Cette charte permettrait le développement harmonieux de l'agglomération et éviterait que la création de nouvelles zones fasse perdre aux plus anciennes toute attractivité, avec à terme une dégradation de qualité ;
- la nécessité de mettre en place un gestionnaire de zone pour assurer aux entreprises un interlocuteur unique pour le cadre de leur développement, et des opérations collectives – au besoin des installations d'intérêt général ;
- l'importance pour le gestionnaire de mettre en place un système de management environnemental pour les activités dont il a la responsabilité avec, éventuellement, certification ISO 14001 de ce système ;
- l'intérêt de structures de concertation entre gestionnaire, entreprises, collectivité territoriale, administration et habitants pour traiter en commun des problèmes de vie de la zone, notamment sous l'angle de la qualité de l'environnement.

Bien entendu, des améliorations, générales pour l'agglomération d'Amiens et ponctuelles pour chacune des quatre zones afin de répondre aux besoins spécifiques exprimés par les entreprises concernées, ont été proposées au vu des résultats particuliers de cette étude.

RISQUES ACCIDENTELS

La connaissance des phénomènes accidentels développée depuis plusieurs années ne met pas à l'abri des accidents. L'exploitation du retour d'expérience sur ces accidents conduit à des programmes de recherche sur les effets liés à des sinistres particuliers, sur la caractérisation des équipements et de leur environnement physique ou organisationnel. La maîtrise des risques progresse ainsi par l'adoption de mesures de prévention et de protection.

Feux industriels en milieu confiné

contact : Guy Marlair

Caractérisation de l'environnement

électromagnétique industriel

contact : Dominique Charpentier

Méthodologie d'analyse des risques
d'appareil pour atmosphères explosives

contact : Jean-Philippe Pineau

Intégration de l'aspect organisationnel
dans l'évaluation des risques majeurs

contact : Olivier Salvi

Effets du séisme d'Izmit
sur les infrastructures
et les installations industrielles

contact : Jean-Philippe Pineau

■ Facteur aggravant dans un incendie, le confinement induit bien souvent un contrôle du développement du feu par la ventilation. L'INERIS a développé une méthode de caractérisation des effets, tant toxiques que thermiques, des feux sous-ventilés. Celle-ci comprend, pour l'essentiel, une application révisée des lois calorimétriques permettant de déterminer le débit calorifique, et le recours à l'utilisation du calorimètre de Tewarson pour la quantification des propriétés au feu en fonction du facteur d'enrichissement en combustible. L'utilisation du code de calcul *ChemFire* ainsi que des essais de validation à plus grande échelle permettent d'affiner la méthode.



Essais de feu sous-ventilé de TDI au moyen du calorimètre de Tewarson (FPA).

Feux industriels en milieu confiné

L'actualité récente a cruellement rappelé le rôle aggravant du confinement dans le déroulement d'un scénario accidentel de type incendie. Ce confinement, outre la limitation des accès au foyer d'incendie qu'il induit, perturbe grandement l'intervention et l'évacuation des personnes présentes, notamment en raison des effets d'accumulation de chaleur.

Ces effets se superposent à la production et à la concentration de gaz toxiques et à une réduction drastique de la visibilité. Par ailleurs, la limitation de l'aérage du foyer d'incendie peut modifier considérablement les conditions d'évolution par rapport au scénario d'un incendie librement ventilé.

L'INERIS mène depuis 1996 des études sur cette thématique et a plus particulièrement orienté ses travaux vers le développement d'une méthode de caractérisation des feux industriels sous-ventilés, principalement axée sur une approche expérimentale. La finalité est de permettre une qualification des impacts environnementaux potentiels de tels feux.

Un nouvel équipement pour l'étude expérimentale des incendies

Un équipement d'essai de laboratoire polyvalent permettant, entre autres, l'étude de ces feux, et complétant les équipements de grande taille disponibles à l'INERIS pour l'évaluation du risque incendie, a été implanté (*photo*). La mise en service de cet appareillage d'essai de laboratoire, calqué sur le concept du calorimètre d'Archibald Tewarson (FPA⁽¹⁾) de Factory Mutual Research, a eu lieu en 1997 (*voir Rapport Annuel et Scientifique [RAS] 1997, p. 55-58*).

Une de ses applications a été illustrée par la mesure des émissions de dioxine lors de la combustion de câbles électriques (*voir RAS 1999, p. 26-29*).

(1) Fire Propagation Apparatus : nouvelle appellation du calorimètre de Tewarson dans les normes ASTM E2058 et NFPA 287.

Évaluation des débits calorifiques dans les incendies sous-ventilés de produits chimiques

Le débit calorifique est reconnu comme une donnée essentielle dans le processus d'évaluation des différents impacts d'un incendie.

Capacité première revendiquée par les calorimètres incendie de laboratoire, la mesure du débit calorifique repose sur la mesure de la consommation d'oxygène, méthode dite "OC", induite par l'incendie expérimental, ou sur le calcul des flux de production d'oxydes de carbone associés, méthode dite "CDG"⁽²⁾. Ces données sont bien entendu directement reliées aux énergies libérées par les réactions chimiques de combustion. Elles sont par ailleurs plus faciles à mettre en œuvre que l'établissement du bilan thermique, qui suppose l'évaluation des pertes thermiques.

Une première réflexion de l'INERIS a montré la nécessité d'affiner les équations couramment utilisées par la communauté scientifique pour la mise en application des méthodes OC ou CDG, afin de conserver la pertinence de cette mesure clé en cas de sous-ventilation. Ainsi, pour des produits combustibles autres que les hydrocarbures simples, il convient de déterminer les coefficients calorimétriques vrais traduisant les rapports entre unité d'oxygène consommé (ou unités de CO₂ et CO produits) et énergie dissipée par le feu. Dans le même temps, l'INERIS a identifié, en collaboration avec la faculté polytechnique de Mons (travail de thèse), la nécessité d'introduire un terme correctif pour tenir compte de la production de suies. Plusieurs communications sur ce thème ont reçu un accueil très favorable de la communauté scientifique, et la nécessité d'introduire cette correction vient également d'être reconnue par une équipe de recherche américaine, dans le cas précis du bois.

(2) CDG : Carbon dioxide generation.

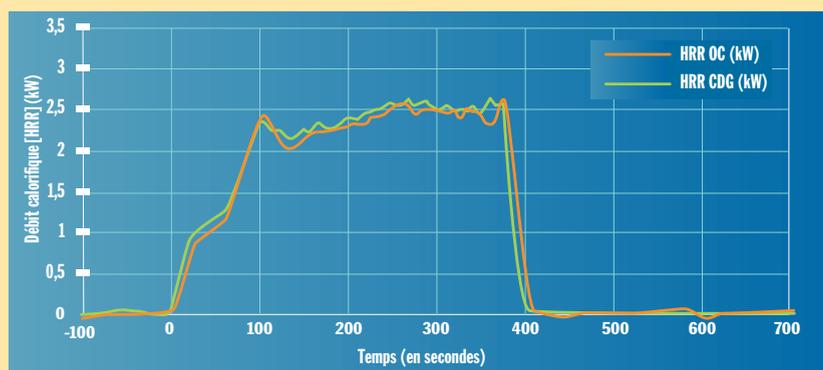


Figure 1 - Détermination du débit calorifique d'un feu de chlorobenzène par les méthodes OC (consommation d'oxygène) et CDG (oxydes de carbones associés).

La figure 1 illustre la détermination du débit calorifique pour un feu de chlorobenzène, pratiquée de manière redondante avec les deux méthodes évoquées.

Le calorimètre de Tewarson : un appareil adapté à la qualification des feux sous-ventilés

L'une des raisons de notre choix de cet équipement est sa capacité, démontrée par l'inventeur dès 1993, à étudier de manière pertinente les feux sous-ventilés de certains types de matériaux (matières plastiques), par simple ajustement des paramètres d'essai (flux d'air comburant). Menés dans le prolongement de ces premiers travaux, ceux de l'INERIS ont permis des avancées intéressantes pour des applications industrielles.

- La méthode est généralisable à tout produit liquide ou solide à l'état massif ou à l'état divisé (poudres industrielles ou agroalimentaires).

Constituant	Matériel utilisé	Échelles de mesure
CO ₂	Analyseur IR non dispersif MAHIAK modèle UNOR 610	0-0,3 % ajustable à 0-6 %
CO	Analyseur IR non dispersif MAHIAK modèle UNOR 610	0-200 ppm ajustable à 0-4000 ppm
O ₂	Analyseur paramagnétique MAHIAK UNOR 610	0-25 %
NO _x (NO, NO ₂)	Analyseur COSMA model TOPAZE 2020 (chimiluminescence)	0-10 ppm/0-100 ppm 0-1 000 ppm
HCl	Analyseur COSMA modèle GRAPHITE 655 FID (détecteur à ionisation de flamme) méthaniques/non méthaniques	0-10 ppm/0-100 ppm 0-1 000 ppm 0-10 000 ppm
H ₂ O	Analyseur Rosemount IR modèle BINOS (deux voies)	0-20 %
SO ₂	Analyseur IR non dispersif MAHIAK modèle UNOR 610	0-200 ppm ajustable à 0-2 000 ppm
HCN	Analyseur prototype Rosemount IR (chauffé, deux voies) et titrimètre automatique, utilisant l'agent titrant AgNO ₃ (méthode potentiométrique)	0-500 ppm Limite de détection : 1 ppm
HCl	Titrimètre automatique, utilisant l'agent titrant AgNO ₃ (méthode potentiométrique)	Limite de détection : 1 ppm
Suies	Opacimètre – mesures multispectrales de l'atténuation optique d'un faisceau lumineux (4 longueurs d'onde)	(nd)

Tableau 1 - Moyens de mesure en ligne du calorimètre FPA de l'INERIS.

- Une prédiction détaillée des produits de pyrolyse-combustion est possible sous réserve de doter l'équipement de base de moyens de mesure additionnels (tableau 1).
- Le facteur global d'enrichissement en combustible d'un incendie (caractérisé par le facteur ϕ ⁽³⁾) n'est pas le seul paramètre à prendre en compte pour la détermination précise des effets chimiques de tels feux. La concentration du flux comburant en oxygène est également un paramètre (indépendant) important, lui aussi aisément contrôlable dans le protocole d'essai reposant sur l'utilisation du FPA. En effet cet appareillage d'essai dispose d'un tube en quartz qui délimite physiquement la zone de combustion et qui offre la possibilité – prévue par conception – d'y introduire un fluide appauvri en oxygène.

La méthode de caractérisation des feux sous-ventilés repose sur la réalisation de quatre à huit essais par matériau ou produit à tester à différents débits d'air, les données de caractérisation des impacts chimiques et thermiques du feu pouvant être reliées entre elles après traitement des données en fonction du facteur d'enrichissement en combustible par une formule empirique de forme générale :

$$\frac{f_i}{f_{i,w.u.}} = 1 + \frac{\alpha}{\exp\left(\frac{\phi}{\beta}\right)^\zeta}$$

où f_i représente une propriété du feu ⁽⁴⁾ déterminée pour un facteur d'enrichissement en combustible ϕ donné et $f_{i,w.u.}$ la valeur caractéristique de cette même propriété du feu dans le cas d'un feu

(3) ϕ est aussi appelé "equivalence ratio" et constitue un indicateur global du taux de ventilation effectif dans un incendie.

(4) Par exemple, un facteur d'émission de polluant.

Figure 2 - Influence du taux de ventilation sur le rendement de la combustion – feu d'heptane, coupelle 88 mm.

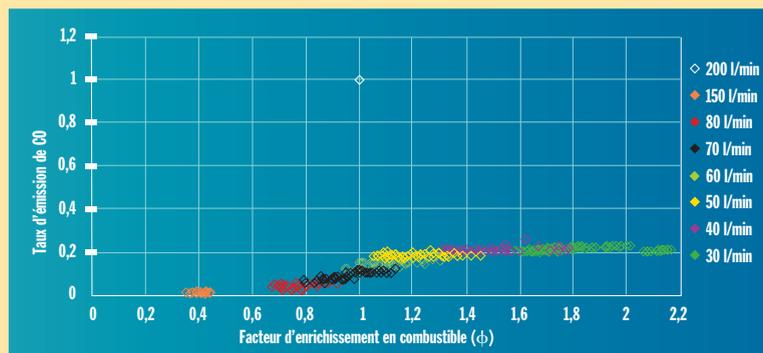
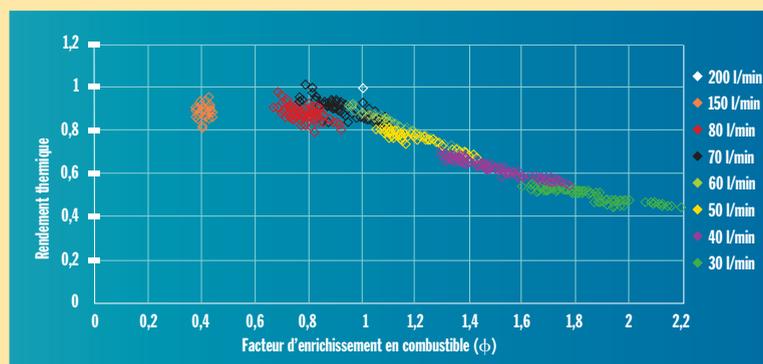


Figure 3 - Détermination des émissions de monoxyde de carbone selon le taux de ventilation – feu d'heptane, coupelle 88 mm.

Tableau 2 - Valeurs des paramètres de corrélation pour la caractérisation des impacts chimiques et thermiques de l'isoproturon (pesticide $C_{12}H_{18}N_2O$).

Produit	$f_{i,w.v.}$	α	β	ζ
CO ₂	2,19	-1,0	2,72	1,2
CO	0,036	3,9	0,99	2,3
Suies	0,052	2,6	2,2	1,7
HCT	0,0096	72	2,2	1,2
NO	0,013	-0,88	0,7	3,3
HCN	0,0053	14	1,4	1,7

bien ventilé ($\phi \ll 1$). Le paramètre α traduit l'amplitude de la variation de la propriété f_i induite par l'effet de sous-ventilation. Cette amplitude peut représenter, selon les propriétés considérées (émissions d'hydrocarbures totaux ou d'HCN, par exemple), plusieurs ordres de grandeurs de différence entre les types de feux extrêmes (bien ventilés, sous-ventilés). Le tableau 2 donne un exemple des paramètres α , β et ζ pour l'isoproturon (pesticide). Les figures 2 et 3 illustrent les effets de la ventilation sur certains paramètres déterminant les impacts thermiques ou chimiques des feux.

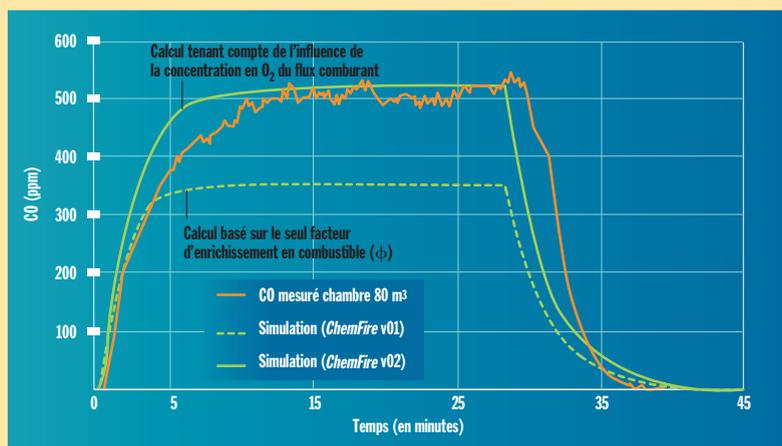


Figure 4 - Application du logiciel ChemFire à l'étude d'un feu de pyridine.

Essais à grande échelle et logiciel ChemFire

Le travail de thèse, réalisé en partenariat avec la faculté polytechnique de Mons, a en particulier porté sur la validation des résultats obtenus avec le calorimètre. Pour ce faire, des essais ont été réalisés en chambre 80 m³ (photo 2) et un code à zone de nouvelle génération, baptisé ChemFire, décrivant plus finement le terme source

que par une simple loi de type "débit calorifique en fonction du temps", a été développé. Les premières comparaisons calculs/résultats d'essais à petite et grande échelle sur de la pyridine (molécule azotée) ont ainsi permis de confirmer qu'une prise en compte précise des effets de sous-ventilation devait intégrer les deux paramètres ϕ et concentration en O₂ du fluide comburant (figure 4).

Conclusions et perspectives

Une méthodologie de caractérisation des feux sous-ventilés, susceptibles de constituer le phénomène prépondérant en cas d'incendie en milieu confiné, a été élaborée et validée par des essais portant sur une série de produits liquides ou en poudre, tels que pyridine, heptane, isoproturon, atrazine, adiponitrile, TDI, etc. Cette méthodologie nous permet de caractériser, dans le cadre des études de dangers, les impacts thermiques et toxiques liés aux scénarios de feux sous-ventilés.

Les essais au calorimètre de Tewarson offrent bien d'autres potentialités que la seule caractérisation des feux sous-ventilés, et les applications déjà réalisées ont largement dépassé ce qui était envisagé à l'origine du projet. L'INERIS travaille actuellement au développement de nouveaux protocoles expérimentaux à même de simuler, à l'échelle du laboratoire, des conditions de développement de feux de grande dimension, afin de faciliter l'extrapolation des résultats à des scénarios de feux librement ventilés de taille industrielle.

Enfin, compte tenu des utilisations conventionnelles de l'appareillage – homologation de matériaux pour différents usages tels que matériaux autorisés en salles blanches, câbles électriques, bandes de convoyeurs, etc. –, l'INERIS envisage de développer des méthodes de validation des performances de comportement au feu de matériaux industriels pour vérifier la pertinence de leur utilisation dans certaines installations classées ICPE.

Publications

- **Marlair (G.), Costa (C.), Gautier (B.), Ledoux (H.), Brohez (S.) :** On-Going Fire Research and Testing in France Using Test Rigs Derived from the Tewarson Apparatus. *6th International Symposium of Fire Safety Science, Poitiers, 5-9 juillet 1999, p. 1216 [poster].*
- **Marlair (G.), Mouilleau (Y.) :** Modélisation des effets toxiques d'un feu sur l'environnement d'un site industriel : importance des hypothèses relatives à la thermique. *Journée de la Société française des Thermiciens « Dispersion des effluents dans l'atmosphère », Paris, 18 mars 1998, p. 17-37.*
- **Brohez (S.), Delvosalle (C.), Marlair (G.), Tewarson (A.) :** Accurate Calculations of Heat Release in Fires. *13th International Congress of Chemical and Process Engineering (2nd Symposium on Environmental and Safety Engineering, CHISA '98), Prague, 23-28 août 1998.*



Feux de pyridine.
Essais en chambre 80 m³.

- **Marlair (G.), Cwiklinski (C.), Tewarson (A.):** An Analysis of Some Practical Methods for Estimating Heats of Combustion in Fire Safety Studies. *Interflam'99, Edinburgh, 29 juin-1^{er} juillet 1999, p. 201-212.*
- **Brohez (S.), Delvosalle (C.), Marlair (G.), Tewarson (A.):** Soot Generation in Fires, an Important Parameter for Accurate Calculation of Heat Release, *6th International Symposium of Fire-Safety Science, Poitiers, 5-9 juillet 1999, p. 265-276.*
- **Marlair (G.):** Experimental Approach of the Fire Hazard in Closed Spaces : Laboratory and Full-Scale Tests, *International Congress Fire Safety in Hazardous Enclosed Spaces-Tunnels, Underground Spaces Parkings, Storages, CNPP-INERIS, Vernon, 8-9 novembre 1999.*
- **Brohez (S.), Delvosalle (C.), Marlair (G.), Tewarson (A.):** The Measurement of Heat Release from Oxygen Consumption in Sooty Fires. *Journal of Fire Sciences, vol. 18, septembre-octobre 2000, p. 327-353.*
- **Marlair (G.), Bertrand (J.-P.), Brohez (S.):** Use of the ASTM E 2058 Fire-Propagation Apparatus for the Evaluation of the Under-Ventilated Fires. *7th Int. "Conf. Fire and Materials", janvier 2001, San Francisco (CA), États-Unis.*

■ Les perturbations électromagnétiques dans un site industriel nécessitent une analyse globale, afin d'évaluer la sûreté de fonctionnement des équipements de sécurité électroniques. Pour cela, l'INERIS a développé un système d'acquisition des perturbations industrielles appelé SAPIN. Ce logiciel enregistre l'ensemble des signaux électriques sur une longue durée. Les données collectées sur les différents sites industriels sont comparées aux exigences des normes existantes, afin d'adapter au mieux les essais. Cette démarche permet d'augmenter le niveau de confiance des équipements électroniques de sécurité.

Caractérisation de l'environnement électromagnétique industriel

La certification des équipements électroniques ayant des fonctions de sécurité s'appuie principalement sur les textes réglementaires : directives, normes. Certains systèmes complexes nécessitent une étude approfondie, et parfois la mise au point de nouvelles méthodes d'évaluation.

Deux niveaux d'évaluation sont possibles dans la certification d'un équipement de sécurité :

- le matériel a un fonctionnement nominal jusqu'à un seuil. Au-delà, le fonctionnement reste sûr, l'équipement ne se met pas dans un état de défaillance dangereuse ;
- le matériel a un fonctionnement nominal jusqu'à un seuil normatif, sans exigence au-delà du seuil. Il est alors important de connaître

le niveau des perturbations électriques pour évaluer le risque de dysfonctionnement du matériel en fonction de l'utilisation.

L'INERIS a développé un logiciel appelé SAPIN (Système d'acquisition des perturbations industrielles) permettant de faire des mesures *in situ* de l'environnement électromagnétique industriel, afin d'apprécier la pertinence des essais de qualification.

Le système d'acquisition

La caractérisation d'un site industriel consiste à mesurer les perturbations électriques sur les lignes et à identifier les sources d'émissions (machines perturbatrices, effets indirects de la foudre). Le système enregistre les parasites électriques dont l'amplitude est supérieure à un seuil préalablement fixé. Le réglage du seuil et la transmission des données sont effectués par modem depuis le centre de traitement des données.

Le traitement *a posteriori* des données est mieux adapté à l'analyse de signaux très variables, dont la forme et la durée sont inconnus. Des études antérieures utilisaient un système d'acquisition avec un prétraitement local et une transmission de paramètres calculés (amplitude maximale, durée). Cette configuration était une source importante d'erreur.

Le système SAPIN mesure des signaux électriques transitoires rapides avec un temps de montée minimal de 0,7 ns. Une sonde de mode commun mesure les signaux entre un conducteur et la terre électrique. Une sonde de mode différentiel mesure les perturbations entre deux conducteurs. Ces différentes mesures nous permettent d'analyser les modes de propagation et le couplage entre câbles.

La chaîne d'acquisition est calibrée avec un générateur de transitoire rapide en salve, conforme à la norme CEI 1000-4-4.

Le traitement des données

Nous sommes intervenus sur huit sites industriels, choisis en fonction de l'activité industrielle susceptible de générer des perturbations électriques. La durée d'observation est de l'ordre de six semaines par site. Nous avons enregistré 30 000 parasites électriques.

Le traitement statistique est effectué à partir des signaux temporels analysés, pour en déduire les paramètres caractéristiques et la confiance associée. Dans une première phase, il consiste à déterminer la probabilité d'apparition des parasites industriels en fonction de

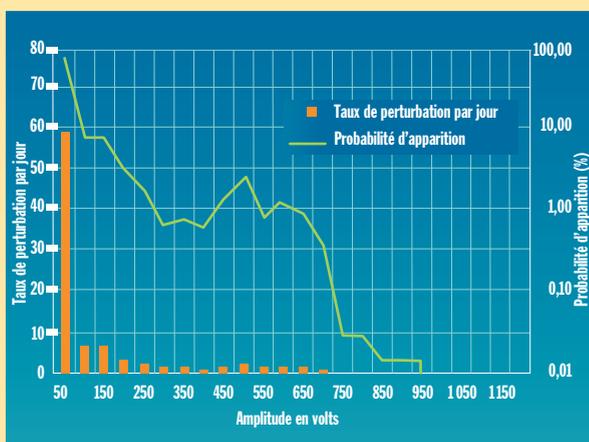


Figure 1 - Probabilité d'apparition des perturbations électriques sur 8 sites industriels.

l'amplitude et de définir le taux de perturbations par jour en fonction de l'amplitude des signaux (figure 1). Dans une deuxième phase, l'analyse consiste à déterminer la densité spectrale moyenne des perturbations (figure 2), l'atténuation des perturbations en fonction de la configuration et du site, et l'analyse par variogramme pour déterminer l'origine des perturbations (analyse de la récurrence en fonction du temps).

Conclusions et perspectives

Cette étude montre que :

- les perturbations industrielles sont nettement différentes des signaux normalisés utilisés pour la qualification des équipements vis-à-vis de la directive CEM 89/336/CEE ;
- les perturbations ont des amplitudes maximales assez faibles (inférieures à 1 000 V) mais durent suffisamment longtemps pour que l'énergie soit importante ;
- la norme CEI 1000-4-5 "onde de choc" attribuée aux effets de la foudre serait plus pertinente que la norme CEI 1000-4-4, en l'adaptant éventuellement à des niveaux plus faibles.

Nous poursuivons nos investigations, afin d'accroître notre base de données, et développons un système d'acquisition similaire pour la caractérisation des champs rayonnés. Ce système permettra de mieux connaître l'environnement électromagnétique des sites industriels, ainsi que les niveaux d'exposition des personnes habitant à proximité d'une antenne de réémission de téléphonie mobile.

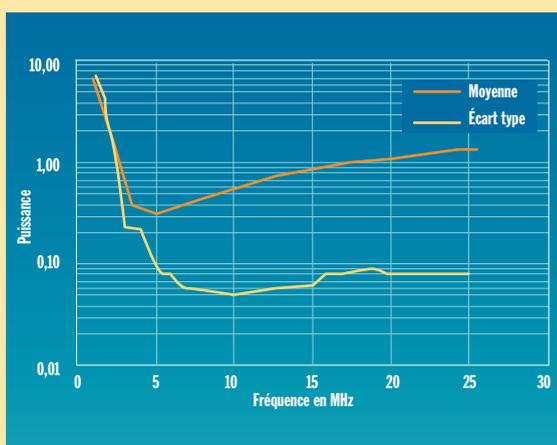


Figure 2 - Densité spectrale moyenne des perturbations pour un site industriel.

Publications

- **Charpentier (D.), Gruet (P.)** : Outil de caractérisation d'un environnement électromagnétique :
 - ASTELAB'99, Paris, 3-5 mai 1999.
 - Essais industriels, n° 10, septembre-octobre 1999, p. 4-7.
- **Charpentier (D.), Branka (R.)** : Susceptibilité d'inflammateurs électriques aux champs électromagnétiques. *Journée technique « Rayonnements électromagnétiques et sécurité pyrotechnique », Le Haillan, 8 juin 2000.*

Méthodologie d'analyse des risques d'appareil pour atmosphères explosives

Les directives Machines (89/392/CE) et ATEX 100A(94/9/CE), contiennent des exigences essentielles de sécurité qui doivent être appliquées par les constructeurs d'appareils et de systèmes de protection, destinés à être utilisés en atmosphères explosives. Dans ce contexte, les constructeurs doivent effectuer une analyse de risques pour identifier les phénomènes dangereux qui peuvent survenir pendant l'utilisation de leurs appareils et leur permettre de prendre des mesures appropriées.

Un projet européen (RASE ⁽¹⁾) a permis d'établir une méthodologie pour l'appréciation de ce type de risques, afin d'assurer l'application des exigences essentielles de sécurité de ces directives.

Outre l'INERIS, ce projet a impliqué divers partenaires européens : Inburex (Allemagne), FSA (Allemagne), Christian Michelsen Institute (Norvège), HSE (Royaume-Uni) et Niro (Danemark).

Un questionnaire pour connaître les besoins des constructeurs

L'INERIS a été chargé d'établir un questionnaire (en français, anglais, allemand, danois et norvégien) afin d'effectuer une enquête auprès des fabricants et des utilisateurs, dans le but de connaître leur(s) méthodologie(s) d'appréciation des risques. Les principaux chapitres du questionnaire concernent :

- la description de l'entreprise ;
- l'expérience des utilisateurs ou des constructeurs/fournisseurs/bureaux d'ingénierie concernant les réglementations nationales, normes, bonnes pratiques, etc., l'occurrence de situations dangereuses (accidents survenus), le choix des mesures de sécurité, les informations et instructions pour l'utilisation, l'efficacité, la fiabilité, l'automatisation des appareils, la maintenance, le niveau de formation des opérateurs ;

(1) RASE : *Appréciation des risques des appareils et des systèmes de protection – contrat CE, STM4 – CT97 - 2169.*

■ L'intégration de l'évaluation des risques dès la conception d'un appareil ou d'un équipement est une phase importante pour réduire les risques sur une installation.

Les directives européennes « Machine et atmosphère explosive » imposent cette évaluation, mais les fabricants sont, à ce jour, insuffisamment sensibilisés à une telle approche.

Le projet européen RASE a permis de mettre en place une méthodologie d'analyse des risques d'appareils pour atmosphères explosives. Cette méthodologie simple devrait permettre de faciliter les échanges entre les fabricants et les utilisateurs, avec, pour objectif final, la sécurité d'exploitation.

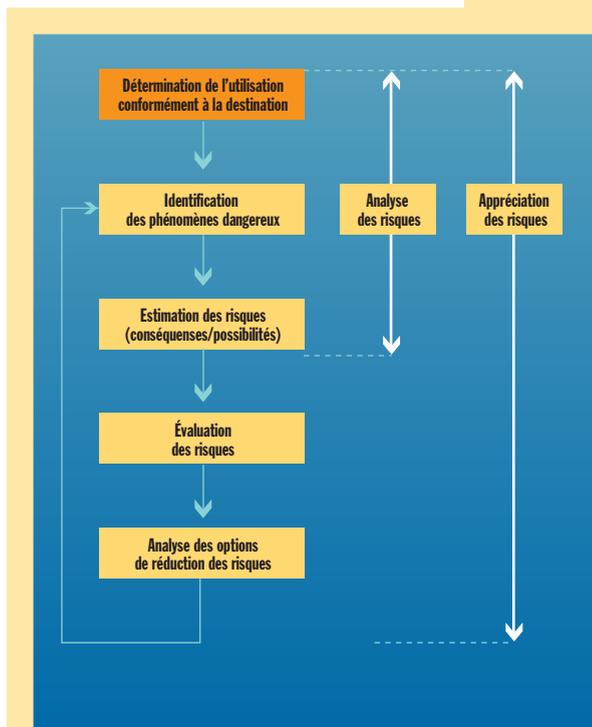


Figure 1 - Étapes fondamentales de l'appréciation des risques.

- l'utilisation d'une méthodologie d'évaluation de risques.

Les réponses (71 pour les constructeurs, 65 pour les utilisateurs) ont été reçues de cinq pays différents et ont permis de mettre l'accent sur les améliorations à apporter en ce qui concerne l'efficacité et la fiabilité. L'évaluation des risques est à ce jour surtout basée sur l'intégration des spécifications du client (79 % des entreprises), les normes ne sont prises en compte que pour 50 à 70 % des constructeurs, et la réglementation nationale par moins de 50 % (grande variabilité selon les États : 25 à 90 %).

Au niveau des utilisateurs, l'évaluation des risques est basée principalement sur la prise en compte des informations fournies par le constructeur (84 % des réponses), la législation nationale étant utilisée dans 63 % des cas et les normes dans 42 % des cas.

La définition d'une méthodologie d'évaluation des risques

Les méthodologies d'évaluation des risques sont très diversifiées et, apparemment, la moitié seulement des constructeurs les utilisent.

Une revue des différentes méthodologies existantes a permis de déterminer la démarche générale utilisée. Les quatre étapes constituant l'appréciation des risques ont été identifiées :

- identification des phénomènes dangereux ;
- estimation des risques ;
- évaluation des risques ;
- réduction des risques.

Pour chaque étape, des listes types, des logigrammes ou des grilles sont proposés.

Au vu des résultats des questionnaires, il est apparu indispensable d'ajouter une étape supplémentaire afin de prendre en compte les spécifications propres au contexte d'utilisation. Cette étape, baptisée « Détermination de l'utilisation conformément à la destination », s'appuie sur la mise en œuvre d'une analyse fonctionnelle ou d'état, qui permet d'assurer que l'utilisation conformément à la destination est correctement définie. Pour chaque opération unitaire, cette

approche permet de spécifier les conditions de fonctionnement de l'appareil, notamment en ce qui concerne les niveaux d'énergie (température, pression, etc.) ainsi que l'état physique de la substance. La figure 1 illustre le déroulement de la méthodologie.

L'application de la méthodologie

Neuf fabricants, sur l'ensemble des fabricants contactés, ont été intéressés pour appliquer la méthodologie. L'INERIS a choisi de la mettre en œuvre sur un système de transport pneumatique. La figure 2 donne un exemple d'analyse fonctionnelle d'un système de déchargement pneumatique. Différents types d'appareils (cabine de pulvérisation de peinture, unité d'extraction d'huile de graines oléagineuses, tour d'atomisation de lait, porte jouant le rôle d'évent d'explosion et échappement de moteur à gaz) ont donc été étudiés par les autres partenaires. Suite à ces divers travaux, une version finale de la méthodologie en anglais a été établie. Elle peut être chargée à partir du site www.safetynet.de.

Conclusion

La méthodologie établie et validée au cours de ce projet peut maintenant être utilisée par les fabricants en collaboration avec les utilisateurs pour analyser les risques lors de l'emploi d'un appareil conformément à sa destination.

Le rapport final a constitué le document d'entrée pour le sous-groupe 3 du groupe technique 4 « Terminologie et méthodologie » du comité technique 305 du CEN, qui a pour mandat d'élaborer, d'ici fin 2003, une norme concernant l'appréciation des risques.

Références

- Conférence sur l'analyse de risque. *Séminaire TREX, Lille, 24-25 juin 1998.*
- Conférence sur les aspects normatifs concernant les atmosphères explosives poussiéreuses. *Séminaire Euroforum, Paris, 6 octobre 1998 et 16 novembre 1999.*



Figure 2 - Analyse fonctionnelle/d'état d'un système de déchargement pneumatique.

- Conférence sur les avancements dans la normalisation et la recherche prénormative sur les atmosphères explosives. *Réunion d'information à l'AFNOR, Paris, 5 novembre 1998 et 18 novembre 1999.*
- **Rogers (R.L.)** : The RASE Project : Development of a Standard for the Risk Assessment of Equipment and Unit Operations for Use in Potentially Explosive Atmospheres. *Séminaire européen sur les explosions de poussières, Metz, 13-15 avril 1999.*
- **Pineau (J.-P.)** : Stratégie sectorielle sur les atmosphères explosives (ATEX). *AFNOR, Paris, séances des COS : « Construction mécanique », 6 mai 1999 et « Hygiène et sécurité », 31 mai 1999.*
- Séminaire ATEX au CEN, Bruxelles, 23 novembre 1999.
- **Rogers (R.) et al.** : Risk Assessment of Equipment – A Manufacturer's Obligation, the RASE Project, Process Safety and Industrial Explosion Protection, *International EMSG Symposium 2001, Nürnberg, 27-29 mars 2001.*

■ Ces dernières décennies, les améliorations au niveau de la sécurité sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) ont principalement porté sur l'amélioration des dispositions techniques. La directive « Seveso II » impose que la maîtrise des risques intègre les aspects organisationnels.

La mise en place d'un système de gestion de la sécurité (SGS) sur les sites présentant des risques majeurs n'offre un réel intérêt pour améliorer la sécurité que si des méthodes d'analyse des risques sont appliquées au préalable et si ces systèmes prennent en compte la culture sécurité de l'entreprise.

L'INERIS développe des méthodes d'analyse des risques intégrant ces aspects techniques et organisationnels. Des outils simplifiés sont proposés pour aider les industriels dans la mise en place d'un SGS.

Intégration de l'aspect organisationnel dans l'évaluation des risques majeurs

Introduction

Partant du constat que la majorité des accidents majeurs trouvent leur origine dans des défaillances organisationnelles (53 % de cas mentionnés dans un document européen), la directive 96/82/CE, dite « Seveso II », entrée en application dans les États membres de l'Union européenne, a introduit des exigences concernant cet aspect.

Les exploitants d'établissements à risques doivent démontrer qu'ils ont fait une analyse des risques et qu'ils ont mis en place les outils de gestion appropriés : politique de prévention des accidents majeurs (PPAM) et système de gestion de la sécurité (SGS) proportionnés aux risques de l'établissement. Cependant, si les objectifs décrits dans la directive sont clairs, des questions persistent : comment atteindre ces objectifs ? Comment apprécier l'impact des mesures de prévention, notamment l'influence du système de gestion de la sécurité ? Comment en tenir compte dans l'évaluation du niveau de risque ?

Apporter des réponses à ces questions aidera à la mise en place de SGS et de PPAM, contribuant réellement à améliorer la maîtrise des risques tout en répondant à la demande réglementaire.

Depuis plusieurs années, l'INERIS s'intéresse aux difficultés spécifiques rencontrées dans la prise en compte des aspects organisationnels, notamment dans les PME-PMI, et a mis au point une démarche d'évaluation des risques intégrant les aspects techniques et organisationnels dans le cadre général de l'application des systèmes de management.

Importance de l'analyse des risques

L'analyse des risques est un outil clé à intégrer dans la mise en place d'une politique de prévention des accidents majeurs et d'un SGS. Elle intervient aussi bien dans la phase d'identification des scénarios d'accident que dans celle de définition des mesures de prévention. Dans le contexte français, l'ensemble de ces points doit être intégré dans l'étude des dangers.

Dans le domaine des risques d'accident majeur, l'identification des scénarios s'appuie généralement sur une démarche déterministe forfaitaire. Mais on assiste aujourd'hui à la généralisation de l'utilisation de méthodes d'analyse des risques *a priori*. Ces dernières sont mises en œuvre pour recenser en même temps les scénarios d'accident et les éléments de réduction des risques ou barrières de défense. Ces barrières se déclinent de diverses manières : prévention à la source, atténuation des conséquences potentielles, mesures d'intervention (figure 1). Elles permettent de prévenir des événements initiateurs (EI) ou courants (EC), ou d'éviter des événements redoutés (ER) ainsi que les événements majeurs (EM).

Par ailleurs, on a pu constater que le recours aux méthodes d'analyse

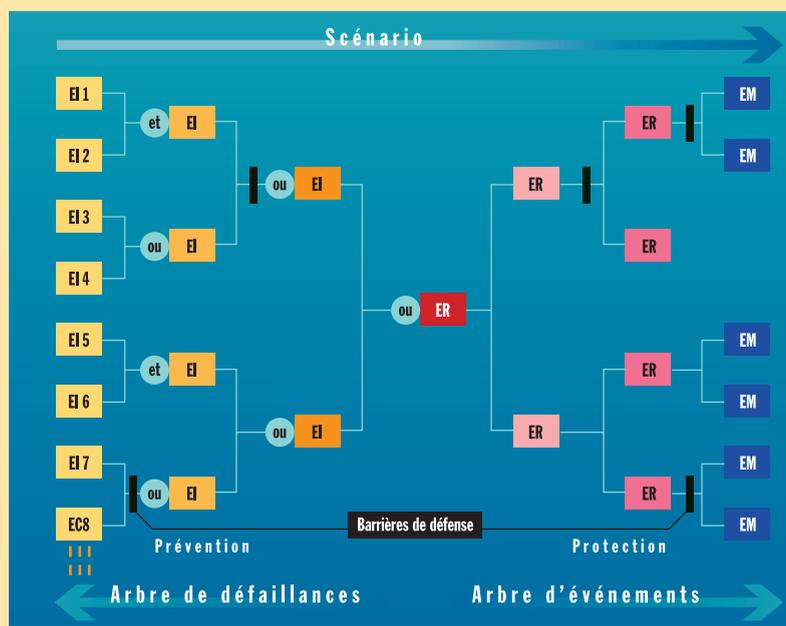


Figure 1 - Analyse des scénarios d'accident majeur et des barrières de défense : démarche « nœud-papillon ».

des risques dans le cadre d'un groupe de travail associant analystes de risques, concepteurs, chargés de maintenance, qualité et sécurité, etc. permet de garantir une certaine exhaustivité et homogénéité dans le choix des éléments de réduction des risques. C'est ainsi qu'une culture sécurité partagée par tous les acteurs peut se développer et être prise en compte dans le management. L'analyse des risques intègre alors aussi bien des éléments organisationnels que des éléments techniques.

Le rôle des hommes

La problématique des organisations est apparue notamment avec les systèmes de management de la qualité. Les entreprises industrielles ont modifié leur organisation afin d'optimiser leur productivité. Certaines ont pris l'initiative de la certification, d'autres y ont été contraintes par leurs clients. Les systèmes de management de la qualité ont ainsi pu se développer, en particulier selon l'ISO 9000. De même, certaines entreprises ont adopté la norme ISO 14000 pour valoriser leur image environnementale. Cependant, bien que les entreprises aient souvent intégré les exigences réglementaires visant à maîtriser les risques d'accident majeur, elles n'ont pas encore adopté la démarche concernant l'aspect organisationnel. La directive «Seveso II» les oblige maintenant à prendre en compte cet aspect-là. Lors de la mise en place d'un SGS, le risque est grand de plaquer un système formel traitant de la sécurité sur le système de production, sans tenir compte des spécificités de l'entreprise, qu'elles soient d'ordre technique (type de produits fabriqués, installations) ou humain (histoire des hommes dans l'entreprise, types d'activités spécifiques). Puisque l'objectif du système de gestion de la sécurité est de modifier, en l'améliorant, le comportement des hommes pour éviter que des "erreurs humaines", en particulier organisationnelles, conduisent à l'accident majeur, il est important de connaître l'état initial de l'organisation.

Deux éléments entrent en ligne de compte : la connaissance du travail accompli quotidiennement par les hommes à tous les niveaux de l'organisation, et la connaissance de la représentation et de la perception qu'ont les acteurs de leur propre travail et de celui des autres. En ayant une bonne connaissance de l'état initial et des actions à mener, le SGS pourra agir sur le comportement des hommes dans l'entreprise.

L'analyse technique et organisationnelle des risques

La maîtrise des accidents majeurs est liée à la mise en place d'équipements ou d'opérations. Ces équipements et ces opérations permettent d'agir sur les événements redoutés et initiateurs dangereux, et doivent répondre à des exigences en termes d'efficacité et de disponibilité. Pour assurer ces qualités, il convient de vérifier que le système de gestion de la sécurité fonctionne correctement (*figure 2*). Ce raisonnement conduit à définir deux niveaux d'évaluation. Le premier niveau permet d'évaluer les caractéristiques techniques exigées pour des équipements ou les opérations. Le deuxième niveau concerne l'évaluation de l'organisation sur le plan formel et informel.

Perspectives

L'INERIS a engagé des travaux qui s'attachent à traiter l'influence de la gestion de la sécurité sur le niveau global de risque d'une installation. La démarche proposée se base sur une analyse des risques intégrée, effectuée selon une approche ni purement déterministe ni purement probabiliste, et associe la prise en compte des aspects techniques et organisationnels. Cette démarche s'appuie sur des méthodes associant analyse des risques et évaluation des organisations. A ce jour, des démarches simplifiées peuvent être mises en place pour aider les industriels dans la formalisation ou l'évaluation d'un SGS. Des travaux de recherche, menés en parallèle, devraient permettre d'affiner les méthodologies utilisées pour que l'organisation et la culture sécurité soient mieux prises en compte dans la maîtrise des risques d'une installation.

Publications et communications

- Communication à la conférence Seveso 2000 : Réflexions sur les difficultés rencontrées dans la mise en place d'un système de gestion de la sécurité (SGS), Bordeaux, juin 2000.
- Cours à l'École des Mines d'Alès : La mise en place de systèmes de gestion de la sécurité (SGS) en application de la directive « Seveso II », Alès, décembre 2000.

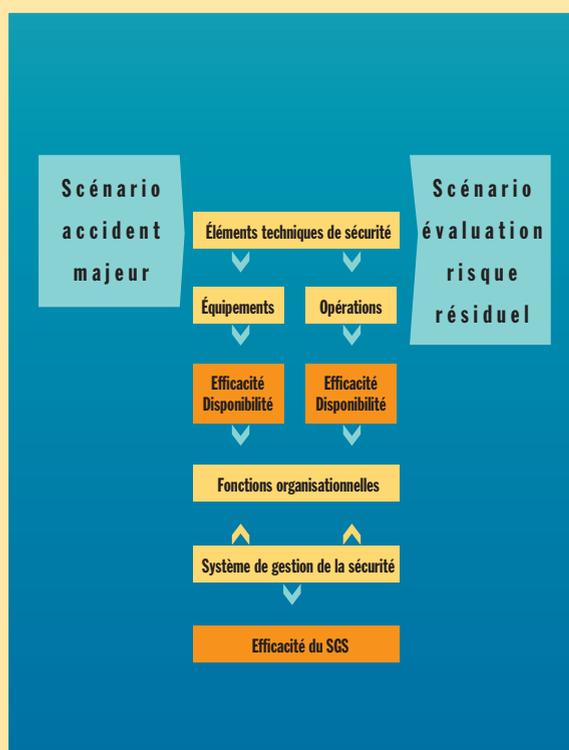


Figure 2 - Maîtrise des risques impliquant les barrières de défense techniques et organisationnelles.

- Table ronde : La maîtrise des risques majeurs par la connaissance approfondie des organisations, Paris, novembre 2000.
- **Salvi (O.), Vuidart (I.), Caumont (M.), Prats (F.)** : Safety Management Systems in Application of the Seveso II Directive – Lessons learnt from Implementation in SMEs. *10th International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. 19-21 juin 2001, Stockholm, Sweden (à paraître).*
- **Salvi (O.)** : Taking into Account Preventive Measures in the French Approach for Risk Assessment, Implementing Seveso II – The Control of Major Accident Hazards – *Conference Forum, 6-8 novembre 2000, Aldgate East, London E1.*
- **Salvi (O.), Gaston (D.)** : Why Changing the Way to Measure the Risk ? *9th Annual Conference Risk Analysis : Facing the New Millennium, Rotterdam, 10-13 octobre 1999, p. 263-267.*
- **Gaston (D.)** : Quelques réflexions sur les difficultés rencontrées dans la mise en place d'un système de gestion de la sécurité (SGS). *EFE, Paris, mai 2000.*

■ L'incidence des risques naturels sur l'environnement industriel doit être prise en compte dans la conception, l'exploitation et la gestion des infrastructures et des installations industrielles en situation d'urgence. Le retour d'expérience de catastrophes naturelles est riche d'enseignements qu'il est important de consigner dans le but d'améliorer les analyses des risques en appréhendant, d'une part, les différences interactions possibles et, d'autre part, les accidents potentiels. Le séisme d'Izmit (Turquie), survenu le 17 août 1999, est un exemple de catastrophe naturelle affectant une zone géographique où sont implantées de nombreuses installations industrielles. Les dégâts et les conséquences observés témoignent de la complexité des éléments à prendre en compte pour estimer l'incidence d'un séisme sur les installations industrielles.

Effets du séisme d'Izmit sur les infrastructures et les installations industrielles

Les séismes peuvent engendrer des dommages importants dans les installations industrielles : incendies, explosions, fuites, etc.

A la suite du séisme d'Izmit, en Turquie, le ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement a demandé à l'INERIS un retour d'expérience sur :

- l'intervention en situation d'urgence dans le cadre de l'incendie de bacs d'hydrocarbures liquides à la raffinerie d'Izmit ;
 - les effets du séisme dans des installations industrielles de la région.
- Ce retour d'expérience pourra être transposé à des installations de même conception, à condition de prendre en compte l'aléa sismique adapté.

Quelques données sur le séisme

Le séisme de magnitude 7,4, survenu le 17 août 1999 à Izmit

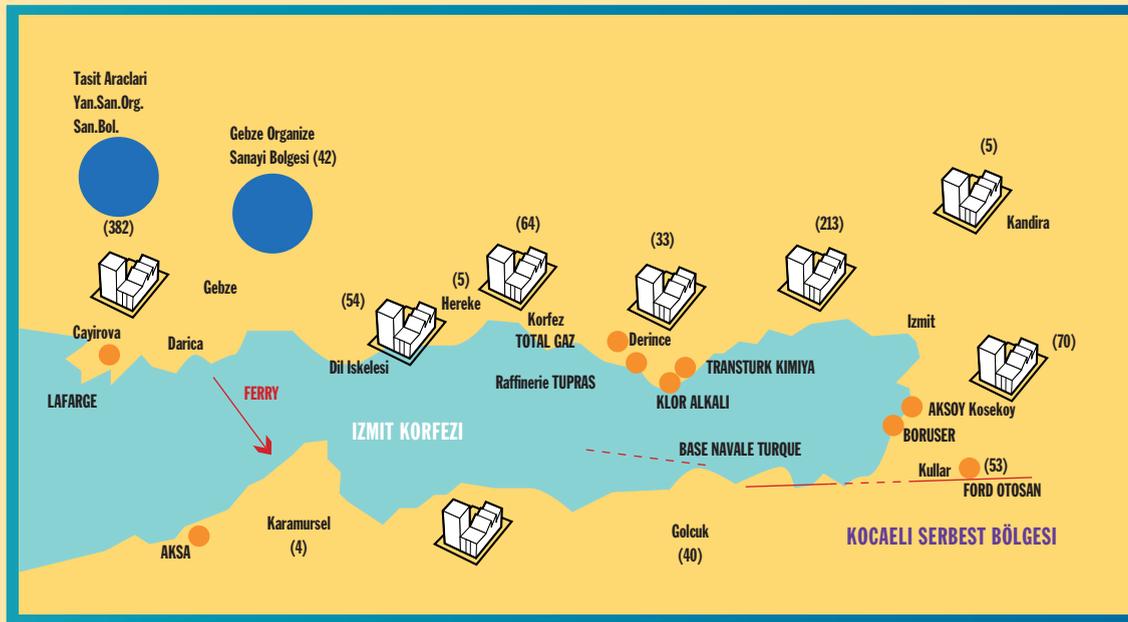


Figure 1 - Implantations des 9 installations industrielles visitées en septembre 1999.

(Kocaeli), n'est pas exceptionnel dans cette région (sept séismes de magnitude supérieure à 7 depuis 1939). Les accélérations au sol, comprises entre 0,2 g et 0,4 g dans les zones sinistrées, sont plutôt modérées compte tenu de la magnitude. Tous les types d'effets classiques pour de tels séismes ont été constatés :

- effondrements et glissements de terrains ;
- liquéfaction de sols.

La zone affectée, située au sud-est d'Istanbul, à proximité de la mer de Marmara, s'étend sur 200 km de longueur et 50 km de largeur dans une région à forte densité de population et d'installations industrielles (13 % de la production industrielle de la Turquie). Le plus grand dommage industriel a concerné une raffinerie de pétrole, arrêtée pour plusieurs mois, essentiellement à la suite de la chute d'une cheminée sur des installations et de l'incendie de bacs de produits pétroliers.

Vulnérabilité des installations industrielles

Les installations visitées (figure 1) étaient toutes situées au voisinage de la mer de Marmara, souvent sur des terrains alluviaux ou sur des remblais (à l'exception d'une cimenterie).



Conséquences de l'incendie d'un nuage de gaz, amorcé par deux camions suite à une fuite d'une canalisation provenant d'une raffinerie.

L'ensemble des observations faites sur **les bâtiments** – y compris industriels – montre que, lorsque ceux-ci étaient construits en béton armé (portiques avec plaques en béton armé, souvent préfabriqués, ou portiques et remplissage en maçonnerie), **des effondrements plus ou moins totaux** se sont produits.

Les structures élancées, à l'exception d'une cheminée de 130 m de haut de la raffinerie, se sont généralement bien comportées, de même que les canalisations aériennes et leurs supports.

Des canalisations enterrées de gaz et d'eau se sont parfois rompues, mais **les réservoirs sphériques et cylindriques** de GPL sous pression se sont tous bien comportés.

Les réservoirs atmosphériques ont pu conduire soit à une fuite massive de leur contenu – 6 500 t de produit toxique provenaient de la rupture guillotine de trois piquages à la base des réservoirs –, soit à l'absence de fuite mais à des déformations “en patte d'éléphant” de leur base ou à des déformations de leurs toits.

Globalement, **les équipements de process** ont subi peu de dégâts et les groupes de secours ont fonctionné.

Les appontements ont parfois disparu sur une partie de leur longueur au fond de la mer.

Enfin, ont été notés les effets de mouvements de terrain (mais rarement dans la zone des installations industrielles visitées, sauf pour l'usine automobile en construction), mais surtout de **glissement de terrains sous-marins** très importants au voisinage du bord de mer en face de certaines installations industrielles visitées.

Des “suraccidents”

Ces effets ont entraîné quelques suraccidents ⁽¹⁾ typiques.

Une raffinerie a souffert pendant cinq jours d'un incendie ayant concerné au total six réservoirs de naphta, incendie qui ne s'est heureusement pas propagé à d'autres réservoirs ou installations compte tenu des dispositifs fixes et mobiles mis en œuvre afin de refroidir les équipements et installations environnants.

Dans une installation de fabrication de polymères acryliques, une fuite de 6 500 t d'acrylonitrile a conduit à la mort de la faune à proximité en raison de la formation d'un nuage toxique. Ce produit s'est écoulé de trois réservoirs à la suite d'une rupture guillotine de la canalisation de soutirage, en formant une nappe de liquide dans les cuvettes de rétention. Une pollution des sols s'est aussi produite du fait de fissures apparues au cours du séisme dans ces cuvettes.

Une canalisation de gaz de pétrole liquéfié reliant la raffinerie à des sphères de stockage d'une installation voisine s'est rompue au cours du séisme. Cette rupture a conduit à la formation d'un nuage qui a été enflammé par un camion traversant le nuage (*voir photo*) et à l'incendie d'un atelier de peintures voisin ainsi qu'à celui de camions, avec deux morts : les conducteurs de deux camions.

Vulnérabilité des infrastructures

L'alimentation électrique a disparu peu après la survenue du séisme du fait de dommages dans une sous-station 380 kV ; d'autres sous-stations ainsi que 172 transformateurs (principalement à la suite de destruction d'immeubles) ont été endommagés.

L'alimentation en eau a subi des dommages relativement mineurs, à l'exception d'un barrage réservoir de 60 millions de mètres cubes de capacité, qui ne s'est cependant pas rompu.

(1) Suraccident : aggravation du risque liée à la présence d'installations industrielles de type ICPE.

Les routes et infrastructures routières ont subi des dommages là où elles franchissaient une faille. A part ce fait, la majorité des ouvrages routiers s'est bien comportée lors du séisme.

La distribution de gaz dans les habitations et le réseau a subi des dommages notables, notamment en raison de la chute d'immeubles, mais les responsables du réseau ont été en mesure d'arrêter la distribution. Une fuite s'est produite sur une canalisation sous forte pression.

Le réseau téléphonique a subi des dommages allant du noyage d'une station à des ruptures de batteries et à des sectionnements de câbles.

Les hôpitaux de la région sinistrée n'ont pas connu de dommages. Une caserne de pompiers s'est effondrée, faisant 20 victimes. Des bâtiments d'une base navale ont été endommagés, causant ainsi la mort de centaines de personnes.

Les leçons tirées

De l'ensemble de ces observations, on peut noter les pertes sévères dans les industries du secteur géographique touché par le séisme. Ces pertes sont liées à la fois à des effondrements de bâtiments et à des défaillances sur des process. Aucun phénomène accidentel inconnu ne s'est produit. Ces constatations imposent que, dans les zones à risque sismique important, une évaluation des dégâts possibles soit préalablement faite par des spécialistes des structures et des process, notamment afin d'étudier les possibilités de suraccident.

Dans le cadre de ces études, l'évaluation des risques doit prendre en compte :

- les possibilités de renforcement des ondes sismiques compte tenu de la nature des sols, remblais et alluvions pouvant induire des liquéfactions de sols ;
- la gravité des dommages potentiels ;
- les mesures de sécurité à appliquer ;
- les effets domino ;
- la planification des situations d'urgence.

Une attention toute particulière est à porter aux installations portuaires.

Les fuites massives de produits chimiques pouvant durablement polluer sols et eaux sont aussi à prendre en considération.

RISQUES SOUS-SOL

Le creusement d'ouvrages souterrains, l'exploitation ou l'arrêt de mines ou de carrières sont à l'origine de phénomènes divers qui peuvent se révéler dangereux et qu'il faut maîtriser. De même, la pollution du sol de certains sites et les modifications des écoulements de surfaces, les remontées de nappe . . . , peuvent constituer une menace pour la qualité des eaux souterraines et de surface. Il faut donc prévoir de manière fiable, par modélisation et par surveillance, l'ensemble de ces risques potentiels.

Optimisation de la localisation des sources microsismiques liées au creusement d'ouvrages souterrains
contact : Pascal Bigarré, Gloria Senfaute

Impact des sites pollués sur les eaux souterraines : modélisation de la migration des polluants
contact : Hafid Baroudi

Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines
contact : Christophe Didier

■ Le creusement de tout ouvrage souterrain modifie les conditions d'équilibre hydro-mécanique des terrains environnants. L'endommagement du massif dans les zones surcontraintes, caractérisé par une fracturation mécanique des terrains, peut en résulter et générer une émission d'événements microsismiques. Garantir la sécurité de l'exploitation suppose de maîtriser ces manifestations dynamiques, donc d'en comprendre les mécanismes initiateurs et de pouvoir localiser dans l'espace les foyers microsismiques. L'optimisation de l'implantation et de la géométrie du réseau de surveillance microsismique, la mesure précise du temps d'arrivée des ondes et l'établissement d'un modèle de vitesse de propagation réaliste sont autant de facteurs déterminants pour une localisation spatiale fiable des foyers de la microsismicité induite par les excavations souterraines.

Optimisation de la localisation des sources microsismiques liées au creusement d'ouvrages souterrains

Le creusement d'ouvrages souterrains modifie l'équilibre des terrains autour de la zone d'exploitation. L'endommagement du massif dans les zones de surcontraintes se caractérise généralement par une fracturation mécanique des terrains, qui elle-même génère une émission d'événements microsismiques. Dans un souci majeur de contrôle de ces phénomènes, la technique de surveillance par écoute microsismique est couramment utilisée. Pour l'acquisition des données, un réseau d'écoute permanent est généralement installé dans un périmètre restreint autour de la zone concernée. Un des résultats fondamentaux de l'analyse microsismique est la localisation spatiale des foyers ; l'interprétation générale des événements enregistrés en dépend étroitement. La méthode la plus utilisée pour cette localisation est basée sur une formulation non linéaire du problème, et son application plus adaptée aux structures géologiques complexes. La localisation optimale repose essentiellement sur trois conditions :

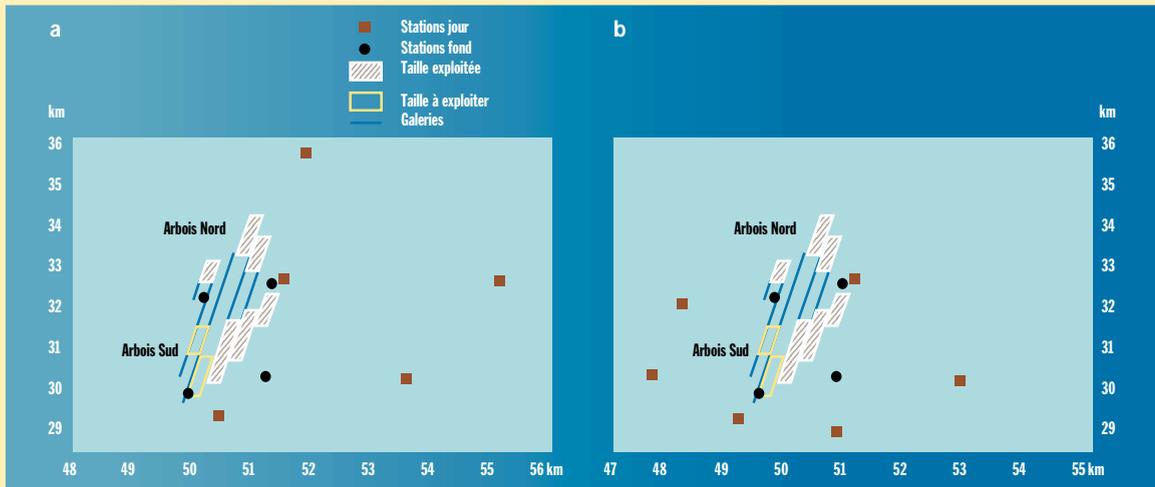
- une bonne couverture spatiale de la zone auscultée par les stations d'enregistrement du réseau microsismique ;
- une bonne précision de l'estimation des temps d'arrivée de l'onde considérée sur un nombre suffisant de stations du réseau ;
- un modèle de vitesse de propagation des ondes, réaliste pour la zone d'étude.

Les moyens techniques et la méthodologie d'étude mis en œuvre par l'INERIS pour la maîtrise de ces facteurs contribuent à la caractérisation de l'activité microsismique, notamment dans les unités d'exploitation minière.

Optimisation de la géométrie d'un réseau microsismique

La géométrie d'un réseau d'écoute doit être adaptée à la zone d'étude suivant des critères définis au préalable. Généralement, pour le choix de la configuration optimale du réseau, deux phases d'étude sont réalisées :

- une phase de reconnaissance des sites favorables pour l'installation



des capteurs. Les sites potentiels doivent offrir une bonne couverture azimutale de la zone d'étude et présenter la configuration la plus adaptée à une localisation optimale des foyers sismiques ;

- une phase de simulation numérique permettant de tester, parmi les sites possibles, différentes configurations du réseau.

Le réseau d'écoute, dont un exemple est illustré sur la figure 1a, enregistre en continu les événements microsismiques induits par les travaux miniers. L'exploitation d'un gisement ou le creusement des galeries minières ne s'effectue pas toujours dans la même zone. Le transfert de l'exploitation d'une zone à l'autre peut remettre en cause la géométrie choisie du réseau. Dans ce cas, une reconfiguration du réseau est nécessaire pour l'adapter à l'écoute microsismique de la nouvelle zone d'exploitation. Un exemple d'une telle reconfiguration effectuée en juillet 2000 à l'Unité d'Exploitation Provence (UEP), disposant d'un réseau permanent de 10 stations, est présenté sur la figure 1b.

Temps d'arrivée des ondes

L'estimation des temps d'arrivée pour la localisation des foyers sismiques s'effectue après identification des différentes phases de l'onde. Les temps d'arrivée sont estimés, dans la mesure du possible (rapport signal/bruit satisfaisant), à partir des signaux enregistrés par toutes les stations (*figure 2*). Les mesures ne sont pas parfaitement exactes : elles comportent souvent des erreurs provenant, par exemple, d'une mauvaise identification de l'onde ou d'une erreur de lecture de l'opé-

Figure 1a - Configuration du réseau d'écoute microsismique de l'Unité d'Exploitation Provence installée en 1991.

Figure 1b - Nouvelle configuration du réseau d'écoute microsismique de l'Unité d'Exploitation Provence. Les stations d'enregistrement de surface ont été rapprochées de la zone d'exploitation actuelle (quartier Arbois Sud).

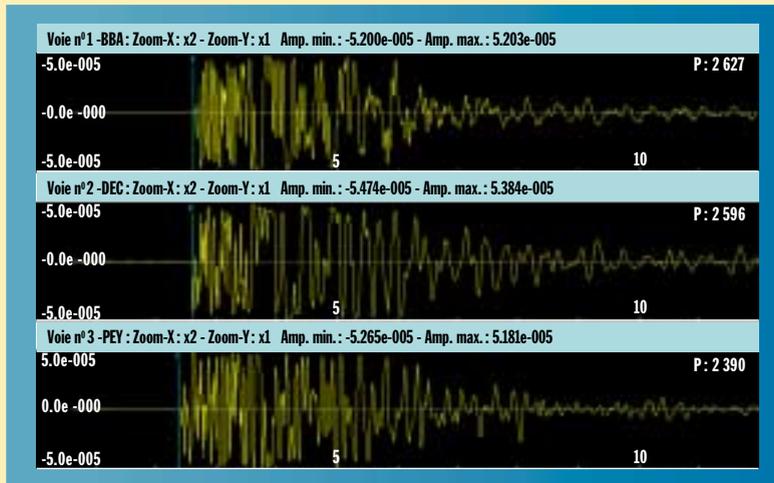


Figure 2 - Exemple de signaux sismiques enregistrés sur trois stations. Événement microsismique de magnitude 3,0 enregistré par le réseau local de l'Unité d'Exploitation Provence.

Conception d'un modèle de vitesse de propagation d'ondes

Généralement, pour une approche réaliste de la structure, un modèle de vitesse "moyen" est déterminé. Pour ce faire, des mesures géophysiques basées sur des méthodes sismiques (sismique réflexion, carottage sismique, tirs de carrière, etc.) ainsi qu'une reconnaissance géologique par sondages sont utilisées pour déterminer les vitesses de propagation des ondes et les épaisseurs des couches constituant le modèle. Le rôle dominant du modèle de vitesse dans la localisation des foyers sismiques apparaît dans la procédure de calcul des temps théoriques de la propagation de l'onde. La position en X,Y,Z du foyer d'une secousse donnée est estimée par une minimisation de la différence entre les temps d'arrivée mesurés et les temps d'arrivée calculés. Si on considère que la géométrie du réseau d'écoute et la précision des temps mesurés sont optimales, les résidus de la fonction de minimisation auront un contrôle direct sur la validation du modèle de vitesse. Autrement dit, le minimum des résidus temporels est atteint pour un modèle de vitesse optimal.

La reconfiguration d'un réseau microsismique nécessite souvent la conception d'un nouveau modèle de vitesse pour le restreindre à la

rateur ; ces erreurs entraînent des imprécisions sur la localisation. Pour le dépouillement systématique des secousses microsismiques, la technique du "pointé automatique"⁽¹⁾ est souvent utilisée, notamment dans les exploitations minières profondes. Pour assurer une bonne précision des temps d'arrivée, un paramétrage adapté de la procédure du "pointé automatique" est nécessaire pour chaque site à partir d'un jeu de données représentatif.

(1) Extraction automatique des temps d'arrivée par le moyen d'une procédure informatique.

nouvelle zone d'intérêt. Cette approche a dû être effectuée lors de la reconfiguration du réseau d'écoute microsismique à l'UEP (figure 3).

Analyse d'une localisation des foyers microsismiques basée sur un modèle de vitesse complexe

Il est communément admis que la complexité d'un modèle de vitesse traduit une approche réaliste de la structure géologique. Théoriquement, la localisation des foyers sismiques à partir d'un tel modèle de vitesse devrait être meilleure. Cette interprétation a été confirmée par les résultats d'une étude réalisée pour l'UEP. En effet, la conception d'un nouveau modèle de vitesse a été nécessaire suite à la reconfiguration du réseau (figures 1b et 3). Une population d'événements liée à l'exploitation du charbon au niveau d'une taille (massif rocheux) a été localisée à partir du nouveau modèle de vitesse dont les caractéristiques (nombre de couches, épaisseurs, vitesses, etc.) sont plus complexes que celles d'un modèle précédemment utilisé (Senfaute *et al.*, 1994). La figure 4a illustre la position des foyers attribués à l'exploitation d'une taille selon les deux modèles de vitesse. La localisation basée sur le nouveau modèle situe le nuage des foyers sismiques au centre de la taille. La majorité des secousses, et plus particulièrement les secousses à forte magnitude, sont localisées à l'avant du front de taille.

Ce résultat est en accord avec :

- les observations effectuées en chantier ;
- l'analyse des champs de contraintes estimés par modélisation numérique ;
- les résultats d'une étude de distribution spatiale des microséismes par rapport au front de taille réalisée par Senfaute *et al.* (1997).

Dans le cas de la localisation réalisée avec l'ancien modèle de vitesse (figure 4a), le nuage des foyers microsismiques est décalé vers l'ouest de la taille, et la plupart des secousses se situent à l'arrière du front.

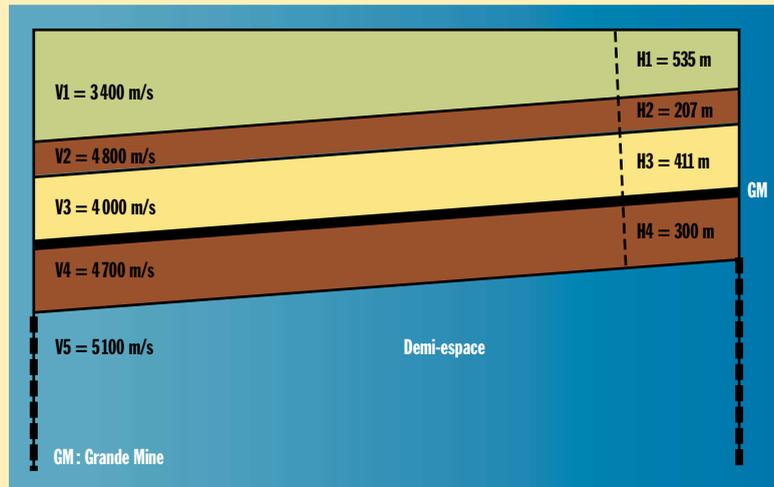


Figure 3 - Modèle de vitesse obtenu à partir de l'interprétation des mesures géophysiques et géologiques. Ce modèle est actuellement utilisé pour la localisation des microséismes à l'Unité d'Exploitation Provence.

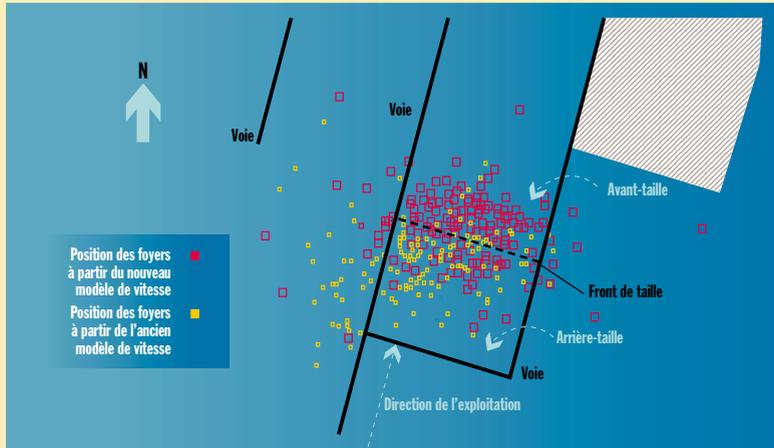


Figure 4a - Localisation en X,Y des foyers microsismiques à partir de deux modèles de vitesse. Localisation à partir d'un modèle complexe (carrés rouges) et d'un modèle homogène (carrés oranges).

foyers à une profondeur irréaliste de 200 m au-dessus de la couche de charbon exploitée.

Conclusion

L'optimisation de la localisation représente une approche réelle de la compréhension et l'interprétation des mécanismes de rupture affectant le massif. Par conséquent, il est indispensable de maîtriser les facteurs déterminants qui contrôlent la localisation spatiale des sources génératrices de ces mouvements. L'exemple cité sur l'optimisation de la localisation par conception d'un modèle de vitesse plus réaliste à l'UEP montre bien l'intérêt d'une telle démarche. En effet, le nouveau modèle de vitesse calculé a permis d'améliorer la localisation des foyers microsismiques dans

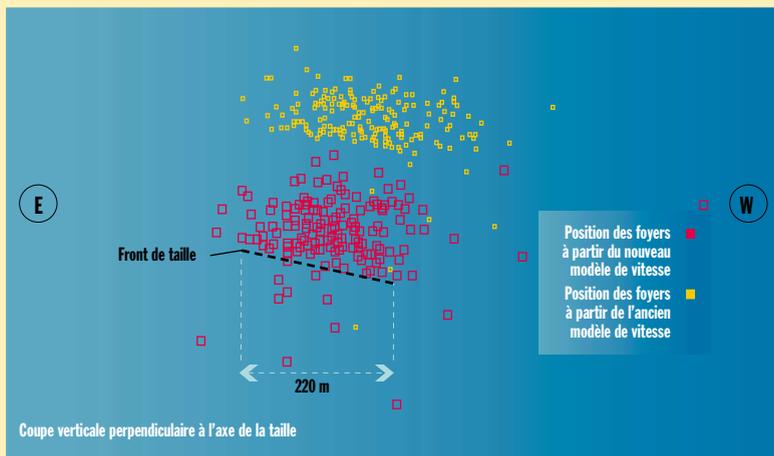


Figure 4b - Localisation en profondeur des foyers microsismiques à partir de deux modèles de vitesse. Localisation à partir d'un modèle complexe (carrés rouges) et d'un modèle homogène (carrés oranges).

les directions X et Y, et de façon remarquable dans la direction Z (profondeur). Ce nouveau modèle de vitesse, évalué à partir des données de sondages géologiques ainsi que de sismique réflexion, présente une complexité importante. Cependant, un modèle hétérogène et complexe peut entraîner une détérioration de la

précision sur la position des foyers. Pour pallier cet inconvénient, la procédure de localisation doit s'appliquer à une base de données importante pour diminuer les résidus temporels et augmenter la précision. Il est également conseillé d'appliquer des corrections statiques aux stations d'enregistrement pour s'affranchir des variations topographiques de surface.

Publications

- **Senfaute (G.), Bigarré (P.), Josien (J.-P.):** Real-time Microseismic Monitoring : Automatic Wave Processing and Multilayered Velocity Accurate Event Location. *Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Delft, 29-31 août 1994, p. 631-638.*
- **Senfaute (G.), Chambon (C.), Bigarré (P.), Guise (Y.) and Josien (J.-P.):** Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relationship to Rockburst Hazard. *Pure and Applied Geophysics, 1997, 150, p. 451-459.*

Impact des sites pollués sur les eaux souterraines: modélisation de la migration des polluants

Dans la démarche de diagnostic et d'évaluation détaillée des risques que présentent les sites pollués, la connaissance du devenir des polluants dans les sols, les eaux et l'environnement est indispensable. Cette connaissance repose sur les résultats d'investigations approfondies à un instant donné, sur les résultats d'un suivi de l'évolution des concentrations dans différents milieux au cours du temps et sur une modélisation numérique des phénomènes de migration. Les transferts de polluants vers et dans les eaux souterraines sont particulièrement visés, car ces dernières constituent à la fois une cible, en tant que ressource à sauvegarder, et un vecteur de transfert vers d'autres cibles : homme et environnement.

Dans la pratique, les approches utilisées par les spécialistes, selon les données disponibles et les objectifs recherchés, sont très variables. Il s'ensuit un manque de méthodologie fiable et consensuelle, permettant

■ L'évaluation des risques présentés par un sol contaminé vis-à-vis des eaux souterraines repose en grande partie sur des modèles de transfert permettant de simuler l'évolution des concentrations au cours du temps. Les pratiques dans ce domaine sont extrêmement diversifiées et les résultats des modélisations peuvent être très variables. L'INERIS a lancé le projet TRANSPOL, exercice d'intercomparaison des approches de différentes équipes spécialisées. Les premiers résultats obtenus sur un cas réel de pollution par les HAP ont mis en évidence les points de désaccord et permis de préciser les données supplémentaires à acquérir pour réduire les écarts.

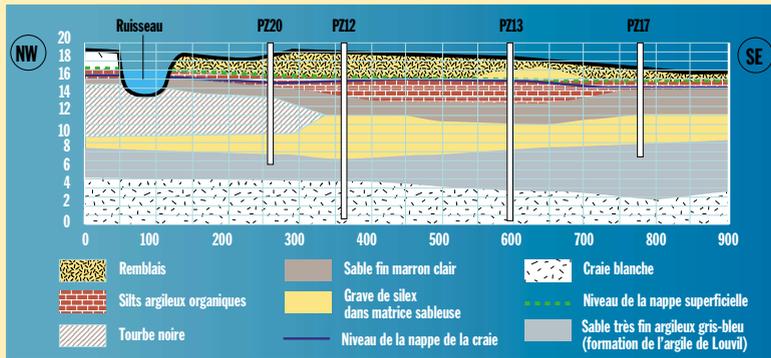


Figure 1 - Coupe géologique NO-SE du site choisi dans le cadre du programme TRANSPOL, illustrant les positions relatives des nappes.

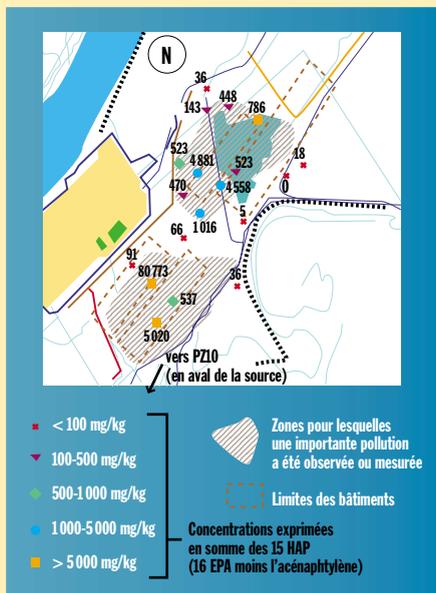


Figure 2 - Cartographie de la pollution du sol en HAP pour des profondeurs comprises entre 3 m et 6 m.

de garantir une meilleure qualité d'expertise pour les maîtres d'ouvrages et les pouvoirs publics. Dans ce contexte, l'INERIS a mis en place un programme de recherches TRANSPOL, basé sur une approche innovante d'inter-comparaison de modèles mis en œuvre par différentes équipes, pour aboutir à l'élaboration de guides de bonnes pratiques par famille de polluants.

La démarche retenue

La démarche retenue en vue d'élaborer un guide de bonnes pratiques pour la modélisation de la migration des polluants dans les eaux souterraines est basée sur l'intercomparaison des méthodes et des modèles utilisés à cette fin. Cette démarche dépasse l'aspect de validation des codes, car les résultats des modélisations pour un site donné dépendent de la qualité des paramètres et des données introduites, mais aussi de la manière d'utiliser le modèle et d'interpréter les résultats en maîtrisant les erreurs commises. La comparaison des résultats et la recherche des causes des différences éventuellement constatées doivent permettre de déterminer les caractéristiques du sol, des nappes et des polluants à prendre au minimum en compte dans la modélisation.

L'intercomparaison proposée s'appuie sur une fédération d'équipes qui traiteront des cas identiques en suivant leur démarche propre, avec les modèles dont ils disposent. Chaque cas fait l'objet d'un cahier des charges détaillé avec les données disponibles relatives au site ainsi que le format des résultats attendus.

Intercomparaison de modèles pour une pollution par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)

Le premier cas réel étudié dans le cadre du programme TRANSPOL traite d'une pollution de sol et d'eaux souterraines par les HAP au droit d'une ancienne cokerie. Le site, en bordure d'une rivière, couvre une superficie de 10 ha. L'hydrogéologie est caractérisée par la présence de deux nappes : une nappe superficielle d'une puissance

de 6 m et une nappe captive confinée par une couche d'argile de 2 m d'épaisseur. Une coupe géologique et un plan du site avec les sources de pollution sont présentés en figures 1 et 2.

Un diagnostic composé de reconnaissances visuelles et de 40 prélèvements de sol, a permis de définir et de délimiter la zone source de pollution. Les concentrations mesurées au droit de la source sont comprises entre 3 et 80 000 mg/kg en HAP totaux. Le réseau de surveillance des deux nappes est constitué de 19 piézomètres. Les concentrations en HAP totaux pour les deux nappes sont respectivement comprises entre 0,1 et 40 000 mg/l.

Quatre équipes ont travaillé indépendamment sur le cahier des charges fourni par l'INERIS : localisation et extension des zones polluées, concentration dans les sols et les eaux souterraines, etc. Les résultats ont ensuite été mis en commun.

Paramètres et hypothèses de modélisation

Le tableau 1 synthétise l'ensemble des paramètres (autres que ceux définis dans le cahier des charges) et hypothèses considérés par les équipes participantes. La figure 3 montre un exemple de comparaison des résultats avec calage des modèles pour un point de mesure et fait apparaître des différences considérables dans les concentrations prévues à long terme.

Résultats

La première synthèse des résultats de modélisation menées par les différentes équipes permet des conclusions partielles.

Écoulement et paramètres hydrodynamiques

L'absence de données de débit et de sollicitation des aquifères conduit à une incertitude sur le couple (perméabilité, recharge) obtenu à l'issue du calage. Un doublement des valeurs de ces paramètres, impliquant un doublement des flux convectifs, est par exemple sans

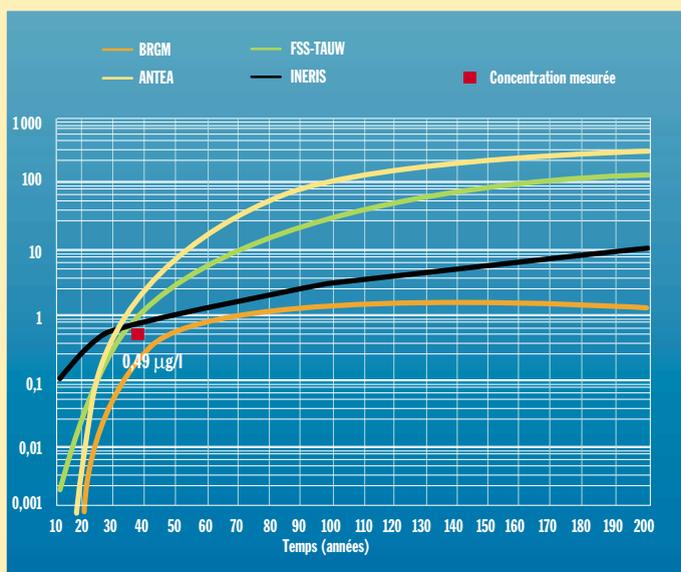


Figure 3 - Simulation de l'évolution des concentrations en naphtalène au point PZ 10.

		INERIS	BRGM	FSS-TAUW	ANTEA	CNRSSP
Code utilisé		MODFLOW couplé à MT3D sous GMS 2.1	MISP (Modèle analytique de l'Impact des Sources de Pollution)	Visual MODFLOW (MT3DMS)	MARTHE v5.4	FEFLOW v4.7
Traceur modélisé		Naphtalène				
Hypothèse utilisée pour le terme source		Source continue (solubilité du naphtalène)			Concentration d'équilibre fixée au droit des sources	
Dimensions de la zone source (m)		300 x 80	100 x 50	50 x 30, 80 x 40	100 x 100, 30 x 30	40 x 40, 60 x 20, 110 x 25
Hypothèse pour simuler le transfert à travers la couche d'argile		2 couches – Drainance sur tout le domaine de calcul	2 couches – Drainance uniquement au droit de la source	3 couches	3 couches	3 couches
Coefficient de retard au transfert [R]	Graves alluvions	23,7	7,5	25,3	1,6	31,6
	Argile	–	–	46,5	1,63	78,0
	Craie	37,0	9,2	5,5	43,3	49,6
Prise en compte de la recharge lors de la simulation des écoulements		Non	Non	Uniquement au droit de la source	Sur l'ensemble du modèle	Sur l'ensemble du modèle
Perméabilité de la couche d'argile (m/s)		5 10 ⁻⁹	5 10 ⁻⁸	3 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹	5 10 ⁻⁹
Dispersivité longitudinale D _L (m)	Alluvions	40	35	40	40	20
	Argile	–	0,25	5	0,4	1
	Craie	70	70	70	70	10

Tableau 1 - Paramètres et hypothèses choisis par les différents organismes pour l'intercomparaison de modèles appliqués à un cas réel de pollution par les HAP.

effet sur les piézométries calculées. Pour réduire l'incertitude sur les flux de drainance de la nappe superficielle vers la nappe captive, un essai de pompage a été réalisé dans deux piézomètres voisins captant les deux nappes, avec mesure en continu des rabattements.

Paramètres de transfert

Les résultats de l'intercomparaison ont montré une incertitude élevée liée aux valeurs du coefficient de partage (K_d) du naphtalène dans les différentes formations stratigraphiques de la géologie locale du site étudié. Les calages réalisés par les équipes ont montré que les valeurs disponibles dans la littérature ne permettent pas le calage des concentrations dans les piézomètres. Pour réduire l'incertitude sur ce paramètre, l'INERIS envisage de réaliser des mesures de coefficient de partage selon les recommandations de l'OCDE (lignes directrices 106 adoptées le 21 janvier 2000) pour les trois formations principales présentes au droit du site.

Définition du terme source

Les variations importantes du nombre et des surfaces de sources

considérées par les équipes pour un diagnostic identique ont conduit à la remarque suivante, directement appliquée aux évaluations détaillées des risques (EDR) pour la ressource en eaux. Pour limiter les incertitudes relatives au terme source, les modélisations des transferts devront être réalisées par un expert également impliqué dans le diagnostic du site (cas où le diagnostic et l'EDR sont réalisés par le même organisme), ou bien le diagnostic devra clairement délimiter la source lorsque les deux opérations seront menées par deux organismes différents.

Difficultés numériques

Le contexte à simuler (front abrupt de pollution) introduit des phénomènes de diffusion numérique, pouvant conduire à des erreurs ou artefacts dans les résultats, surtout pour les faibles concentrations calculées.

Prise en compte de la biodégradation

La dégradation du polluant dans le milieu souterrain n'a pas été prise en compte, faute de données disponibles pour la dégradation des HAP en milieu anaérobie. Or cette dégradation joue directement sur le comportement à long terme de la pollution, en particulier sur les pics de concentration. Au-delà d'une étude de sensibilité avec différentes valeurs des constantes de dégradation introduites dans les modèles, il s'avère nécessaire de mener des investigations pour estimer cette dégradation *in situ*. La piste qui sera explorée est l'approche isotopique basée sur le dosage de ^{12}C et ^{13}C .

Le choix du traceur

L'ensemble des équipes a choisi le naphthalène comme traceur de la pollution pour la modélisation. Ce composé, le plus mobile des HAP, est généralement présent en concentrations significatives dans ce genre de pollutions ; il peut donc servir de base à la validation des modèles. Néanmoins, ce traceur ne fait pas partie des six HAP de l'OMS qui servent de référence et dont les critères de qualité existent pour les eaux. L'interprétation des résultats pour le naphthalène et leur extrapolation pour les autres HAP, et notamment ceux prévus par l'OMS, devront faire l'objet d'une démarche spécifique et consensuelle entre les équipes. Elle sera basée notamment sur les coefficients de retard relatifs des différents composés des HAP par rapport au naphthalène.

Conclusion et perspectives

La nouvelle version du cahier des charges, issue des résultats du premier cas réel étudié, intègre de nouvelles campagnes d'analyses sur les piézomètres. Les essais de pompage et de mesure de la drainance ainsi que des valeurs du coefficient de partage (K_d) permettront de réduire les incertitudes et les écarts relevés entre les simulations réalisées par les différentes équipes impliquées dans l'étude.

L'intercomparaison de démarches de modélisation, telle qu'elle a été mise en œuvre pour le cas de la pollution par les HAP, a démontré la validité de l'approche contribuant à l'élaboration d'un guide de bonnes pratiques spécifique à une famille de polluants. Le processus d'intercomparaison, le retour d'expérience ainsi que les points faisant l'objet de recherches spécifiques approfondies (biodégradation en milieu anaérobie, comportement des polluants en zone non saturée, etc.) permettront d'aboutir à une méthodologie de modélisation consensuelle et évolutive en fonction de la progression des connaissances.

L'objectif est de disposer d'une capacité d'expertise suffisante pour fournir des éléments de décision en terme de risques pour la ressource en eau avec les connaissances et les outils d'aujourd'hui, tout en les faisant évoluer.

Publications et communications

- **Ben Slimane (F.), Baroudi (H.), Nominé (M.), Merrien-Soukatchoff (V.)**: Characterisation and Modelling of the Behaviour of an Accidental Spill of Creosote of a Sawmill of South-West of France. *17th International Symposium on Polycyclic Aromatic Compounds (ISPAC), Bordeaux, 25-29 octobre 1999.*
- **Ben Slimane (F.), Merrien-Soukatchoff (V.)**: Analyse d'une pollution liée à l'industrie du bois, modélisation et évolution de la pollution. *16^{es} Rencontres de l'Association universitaire de génie civil, Reims, 28-29 avril 1998, p. 28-35.*
- **Ben Slimane (F.)**: Méthodologie d'étude et modélisation du transport de polluants organiques en milieux poreux naturels : application à l'étude de deux cas de pollutions issues de l'industrie du bois. *Thèse pour l'obtention du titre de docteur de l'INPL en Génie civil-Hydrosystèmes-Géotechnique, le 12 septembre 1997, VIII, 258 p. et annexes.*

Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines

Les exploitations minières s'inscrivent parmi les activités industrielles susceptibles d'engendrer à terme un impact sensible sur les milieux naturel et humain environnants. La fermeture et la mise en sécurité de sites miniers constituent une opération complexe qui doit s'inspirer de la législation en vigueur et de différentes contraintes techniques, financières et sociopolitiques.

Les traitements envisagés doivent essentiellement prévenir les impacts et les risques susceptibles d'affecter le milieu environnant, tels que :

- l'impact sur les eaux souterraines et de surface ;
- la stabilité des terrains de surface ;
- les risques liés à la présence de gaz de mine ;
- les risques liés aux verses, digues et terrils.

L'INERIS a été chargé par le secrétariat d'État à l'Industrie d'élaborer un guide méthodologique abordant l'ensemble de ces thèmes.

Ce document présente un bref rappel historique et technique de l'évolution de l'industrie minière française, puis le cadre réglementaire régissant la fermeture des sites miniers ainsi que la structure et le contenu type d'un dossier d'arrêt de travaux miniers. La présentation synthétique des principaux risques et impacts pouvant résulter de l'arrêt des travaux, une méthode d'analyse du risque résiduel, et les principales mesures compensatoires, qui peuvent s'avérer nécessaires pour limiter les impacts sur le milieu environnant constituent la partie technique du guide.

Impacts sur les eaux souterraines et de surface

Les impacts engendrés par l'exploitation minière sur les eaux souterraines et de surface peuvent être divisés en deux catégories : les impacts d'ordre quantitatif et ceux d'ordre qualitatif.

Les impacts d'ordre quantitatif concernent principalement la modification des écoulements de surface, la remontée des nappes après l'arrêt des pompes d'exhaure et l'apparition de points d'émergence.

■ L'arrêt programmé, dans les cinq prochaines années, des grandes exploitations minières françaises conduit les exploitants à engager dès aujourd'hui les études et les travaux nécessaires à la fermeture et la mise en sécurité des sites miniers. L'INERIS a établi, à la demande du Secrétariat d'État à l'Industrie, un guide méthodologique qui présente le cadre réglementaire régissant la fermeture des sites miniers, ainsi que la structure et le contenu type d'un dossier d'arrêt des travaux. Ce guide fait également l'inventaire des principaux risques et impacts pouvant résulter de l'arrêt de l'exploitation et propose une méthode d'analyse du risque résiduel. Enfin, il rappelle les principales mesures compensatoires qui peuvent, le cas échéant, être mises en œuvre pour limiter les impacts sur le milieu environnant.



Précipitation d'hydroxydes métalliques à proximité de l'émergence d'une ancienne mine.



Conséquences sur le bâti des effondrements progressifs d'Auboué (54). Bassin ferrifère lorrain.

Pour limiter les impacts de la cessation de l'activité minière sur l'environnement, une étude globale du fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du secteur doit être entreprise afin de définir, lorsque le contexte l'exige, d'éventuelles mesures compensatoires : principes de gestion des eaux superficielles (soutien d'étiage, stations de relevage, etc.), maintien de pompages, limitation de l'occupation de la surface, etc.

Les impacts d'ordre qualitatif caractérisent les possibles modifications de la qualité des eaux souterraines et de surface après l'arrêt des travaux. Ces modifications peuvent provenir de la mise en communication de différents aquifères ou de processus chimiques complexes se développant essentiellement durant la phase transitoire de remontée des eaux (lessivage des terrains). L'analyse hydrogéochemique intègre notamment les caractéristiques et la sensibilité du milieu récepteur

(cours d'eau au sein desquels se déversent les émergences) afin de déterminer, le cas échéant, des mesures compensatoires à mettre en œuvre, parmi lesquelles on peut citer la modification du schéma de circulation des eaux souterraines et la mise en place de traitements au niveau des émergences.

Risques liés à la stabilité des terrains de surface

Les mouvements susceptibles d'affecter les terrains de surface diffèrent selon des configurations géologiques et d'exploitation : affaissement progressif, fontis, effondrement en masse, etc. On différencie classiquement deux types d'exploitations : celles au sein desquelles un traitement intégral des vides a été assuré durant l'exploitation et celles au sein desquelles des vides résiduels subsistent.

La première catégorie est la moins sensible aux mouvements de terrain au-delà des quelques années qui suivent l'extraction et ne peut, en tout état de cause, engendrer que des mouvements souples et uniformes, généralement sans conséquence sur

le bâti de surface et difficilement discernables des mouvements d'origine naturelle du sol.

En revanche, la seconde peut affecter, dans certaines configurations, la stabilité des terrains de surface durant la période post-exploitation par l'apparition de phénomènes de type affaissement, fontis ou effondrement.

Seule une étude détaillée des contextes géologique (nature du matériau exploité et des terrains encaissants) et minier (méthode d'exploitation, dimensions et profondeur des panneaux), menée par un organisme spécialisé dans les risques de mouvements de terrain, peut permettre l'identification précise des risques résiduels de mouvements à long terme. Cette étude a pour objectif essentiel de recenser les principaux mécanismes d'instabilité, d'évaluer la sensibilité des différents secteurs au regard de ces ruptures et de préciser les conséquences prévisibles en surface des instabilités souterraines préalablement identifiées (cf. *Rapport Annuel et Scientifique 1998*, p.70-74).

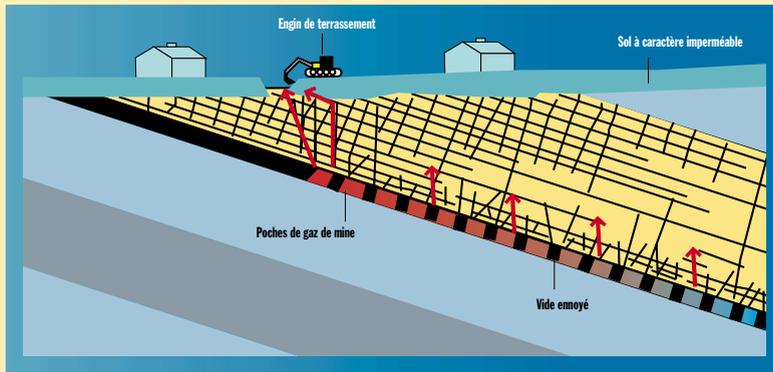
Suivant les conclusions de l'étude et la nature de l'occupation des terrains de surface concernés, des mesures compensatoires de différentes natures peuvent être mises en œuvre : confortement de travaux souterrains, limitation de l'occupation de la surface, mise en place de réseaux de surveillance, etc.

Risques liés à la présence de gaz au sein des travaux miniers

D'une manière générale, les problèmes liés à la présence de gaz au sein des travaux souterrains relèvent plus d'un cadre d'hygiène et sécurité (période d'activité) que d'environnement (période post-exploitation). Toutefois, au sein de certains gisements (charbon, uranium, etc.), des risques importants peuvent persister après la fermeture des travaux.

Lorsque la ventilation forcée des travaux est interrompue, certains vides peuvent en effet présenter des concentrations élevées en gaz divers ou un appauvrissement sensible en oxygène. Des émanations, franches ou diffuses, remontant jusqu'en surface peuvent engendrer certains risques pour les personnes, les installations et les biens situés à proximité immédiate.

Après une présentation des principaux gaz de mine (méthane, CO₂, CO, H₂S, radon) et des risques qu'ils sont susceptibles d'engendrer



Principe de migration de gaz de mine vers la surface.

(explosion, intoxication, asphyxie, cancer du poumon), le guide s'attache à identifier les paramètres caractéristiques permettant d'évaluer la sensibilité d'un site à l'émission de gaz dangereux (nature du matériau extrait, état d'ennoyage des travaux, "pièges à gaz", perméabilité des terrains de recouvrement, présence de drains, occupation du sol, etc.).

Lorsque les risques résiduels mis en évidence ne sont pas acceptables au regard des enjeux en surface, les mesures conservatoires les plus classiquement mises en œuvre consistent à traiter les orifices miniers et à créer des exutoires sécurisés, voire à exploiter les réservoirs de gaz ou à gérer l'occupation de la surface. (cf. *Rapport Annuel et Scientifique 1999*, p. 75-79).



Remblayage gravitaire d'un ancien puits de mine.

Risques liés à la présence d'ouvrages miniers débouchant au jour

De très nombreux anciens orifices miniers abandonnés (puits, galeries, descenderies), dont l'emplacement exact est souvent mal connu, parsèment aujourd'hui le territoire français. Ces anciennes ouvertures peuvent, dans certaines conditions, présenter des dangers pour les personnes et les biens. Des effondrements ou dégagements gazeux sont ainsi survenus en France ou dans les pays voisins ces dernières décennies, certains ayant fait des victimes. Après avoir énuméré les principaux risques susceptibles d'affecter ces ouvrages, le guide développe une méthode d'analyse permettant d'optimiser le choix de la technique de traitement la plus appropriée au contexte et à l'environnement de l'ouvrage : accès, géologie, présence de gaz, vulnérabilité, etc.

La technique de traitement retenue doit permettre de limiter les coûts de mise en sécurité tout en assurant les objectifs fondamentaux suivants : condamner définitivement la pénétration au sein des vieux travaux, conforter les terrains de surface, maîtriser les éventuelles émissions de gaz et gérer les émergences d'eau (cf. *Rapport Annuel et Scientifique 1998*, p. 79-84).

Impacts et risque liés aux terrils et aux verses

L'exploitation des mines entraîne généralement la constitution de volumineux dépôts de résidus miniers à proximité des sites d'extraction. Suivant la nature des matériaux et le mode de mise en dépôt (déversement par voie sèche, semi-humide ou humide), ces ouvrages sont appelés terrils, verses, digues de rétention, bassins de décantation, etc.

Les risques et impacts liés à la présence de ces ouvrages sont de trois ordres : la stabilité des ouvrages, leur impact sur l'environnement et la combustion possible des verses ou terrils houillers.

De nombreux types de rupture peuvent affecter la stabilité des dépôts miniers. Une étude attentive des terrains d'assise, des matériaux qui constituent ces dépôts, des caractéristiques de mise en dépôt et des conditions environnementales (hydrologie, surcharges, etc.) permet de déterminer la sensibilité d'un ouvrage à la rupture. Il est alors possible de définir, le cas échéant, des mesures compensatoires adaptées (remodelage des flancs, surveillance, etc.).

Les impacts des ouvrages de dépôt sur l'environnement peuvent affecter principalement le paysage, l'eau (percolation au sein des ouvrages ou érosion de leurs flancs) ou l'atmosphère (rejet de poussières ou de particules nocives). La couverture du dépôt constitue l'une des mesures compensatoires les plus classiquement utilisées car, outre un réaménagement paysager du dépôt, elle permet de limiter l'émission de particules dans l'air et de réduire les infiltrations d'eau en son sein.

Les matériaux de terrils issus des exploitations charbonnières contiennent une proportion variable de matières carbonées susceptibles d'entrer en combustion, soit du fait d'une inflammation extérieure (feu de broussailles), soit du fait d'un phénomène physico-chimique complexe, appelé auto-échauffement ou combustion spontanée, qui se développe au sein même du dépôt. Une analyse de la nature des matériaux, des conditions de mise en dépôt et des paramètres environnementaux permet de caractériser la sensibilité d'un dépôt à l'auto-échauffement. Suivant le caractère préventif ou curatif des mesures compensatoires, les travaux prescrits peuvent aller d'une simple surveillance de la zone au défournement des matériaux déjà en combustion.



Source Cof.

Remodelage d'un dépôt de résidus miniers en cours dans le bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais.



Torpillage d'une tour de mine.

Impacts environnementaux liés aux installations de surface

Dans le droit français, seules les infrastructures indispensables au fonctionnement de l'exploitation minière sont considérées comme installations minières de surface. Les principaux impacts environnementaux induits par ces installations sont liés aux risques d'instabilités des anciennes infrastructures (chevalements, bâtiments, etc.), à la possible dissémination de composés toxiques ainsi qu'à la dégradation du paysage. Les impacts, en termes de pollution des sols et des eaux, sont généralement liés aux caractéristiques intrinsèques du matériau exploité ainsi qu'aux procédés de traitement qui lui sont appliqués. L'analyse des risques et impacts résiduels se fait classiquement selon une méthode d'analyse mise au point pour l'étude des sites et sols pollués : l'évaluation simplifiée des risques (ESR), complétée si besoin par une évaluation détaillée des risques (EDR). Ces analyses permettent de définir les principes de gestion du site : site banalisable, site devant faire l'objet d'une surveillance ou site nécessitant la mise en œuvre de traitements lourds.

Perspectives

Le guide, désormais achevé, a été validé par l'ensemble des principaux intervenants concernés par la gestion de l'après-mine (services de l'administration, exploitants miniers). Il a pour vocation de devenir un ouvrage de référence qui facilitera, pour les exploitants, la constitution des dossiers d'arrêt de travaux miniers, mais également l'évaluation de ceux-ci par les services de l'État concernés. Le document contribuera aussi à homogénéiser les approches, à l'échelle nationale, quelle que soit la nature de la substance extraite, constituant ainsi un recueil des règles de l'art.

Abondamment illustré, il a été rédigé dans une optique de diffusion des connaissances à un public non forcément spécialiste. Il fera l'objet d'une édition par l'INERIS et sera ainsi accessible au plus grand nombre dans le courant du second semestre 2001.

Publication

- **Piguet (J.-P.), Wojtkowiak (F.)** : Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. *Revue de l'industrie minière*, vol. 82, juin 2000, p. 36-47.