



Les minéraux  
en pharmacie  
PAGE 06



L'eau souterraine  
est-elle toujours  
potable à l'état  
naturel ?  
PAGE 58



Le thermalisme,  
la médecine que la Terre  
nous a donnée  
PAGE 74

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE  
*BRGM's journal for a sustainable Earth*

# géo**sciences**

N° 5 ► MARS 2007 ► 8€

## Géosciences et **santé**





# ALÉAS ET ENJEUX

## Éduquer pour prévenir les risques majeurs



● Compilation interactive de l'ensemble des risques majeurs, ce cédérom propose dix dossiers complets composés d'études de cas et de séquences pédagogiques. Il met en avant l'éducation civique et l'éducation au Développement Durable (EDD).

#### Éditeur et diffuseur

SCÉREN  
13, rue de la Tour | 75004 Paris  
Tél. 75 48 34 54 00  
www.sceren.fr

#### Conception et réalisation

CE Pédagogie Interdisciplinaire  
12, rue de Buzac, Vincennes 93 26  
Version numérique compatible MAC et Linux  
Version multimédia | 450 Mo | 2008  
© SCÉREN 2008

● Où trouver ce cédérom ?  
Dans la Ressource SCÉREN :

À la Librairie de l'éducation  
13, rue de la Tour | 75004 Paris  
Tél. 48 34 54 00 | Métro Mairie

Dans les bibliothèques

des CRDP et CRDP

Sur la Cyberbibliothèque  
[www.sceren.fr](http://www.sceren.fr)

**SCÉREN**

SERVICES CULTURE ÉDITIONS,  
RESSOURCES POUR  
L'ÉDUCATION NATIONALE

[CNDP-CRDP]



En couverture :  
Le champ géothermique  
du Lagon Bleu en Islande.  
L'eau laiteuse du lagon provient d'une  
ressource puisée à plus de 1 800 m  
sous terre. Elle ressort de la centrale  
géothermique qui l'utilise pour  
produire de l'électricité et de la chaleur,  
passant de 200 °C à près de 38 °C. Cette  
eau résiduelle, très riche en minéraux,  
a des propriétés curatives reconnues  
pour divers problèmes de peau.  
*The Blue Lagoon thermal field in Iceland.  
The lagoon's milky waters come from a  
resource tapped more than 1,800 meters  
beneath the earth's surface. It flows  
out of a geothermal plant that uses it  
to generate electricity and heat, and its  
temperature drops from 200° to 38° C.  
This residual water, very rich in minerals,  
has recognized curative properties for  
various skin problems.*

© Nordic photos - Palmi Gudmunsson / Getty Image

- 03 ▽ Édito - *JEAN DERCOURT*
- 04 ▽ Introduction - *PETER BOBROWSKY*
- 06 ▽ Les **minéraux** en pharmacie  
*DANIEL LEFORT DES ILOUZES, ROGER DELONCLE ET PIERRE DUBOIS*
- 20 ▽ Le **radon** dans les **bâtiments** - *BERNARD COLLIGNAN*
- 30 ▽ **L'amiante** dans **l'environnement en France** :  
de l'exposition au risque  
*MARIE-ANNICK BILLON-GALLAND, LAURENT MARTINON, MATHILDE PASCAL ET CÔME DANIAU*
- 40 ▽ **Plomb** et **santé** : importance de la spéciation  
*PHILIPPE GLORENNEC, VALÉRIE LAPERCHE ET DOMINIQUE GUYONNET*
- 46 ▽ **Mercure naturel** et **santé** - *PATRICE PIANTONE*
- 52 ▽ Étude des **risques** sur les **sites pollués** :  
le rôle des **processus naturels** - *OLIVIER ATTEIA ET ALAIN SAADA*
- 58 ▽ **L'eau souterraine** est-elle toujours **potable** à **l'état naturel** ?  
*ARIANE BLUM, LAURENCE CHÉRY ET HÉLÈNE LEGRAND*
- 68 ▽ **Fluoride in groundwater**: origin and health impacts  
*HÉLÈNE PAUWELS ET SHAKEEL AHMED*
- 74 ▽ **Le thermalisme**, la médecine que **la Terre** nous a donnée  
*CHRISTIAN-FRANÇOIS ROQUES*
- 80 ▽ **Boire l'eau du robinet** ou **l'eau en bouteille**  
*PHILIPPE VIGOUROUX ET THIERRY POINTET*
- 88 ▽ Protection des **captages d'eau souterraine**  
destinée à la **consommation humaine**  
*DIDIER PENNEQUIN, JEAN-FRANÇOIS VERNOUX, CHARLES SAOUT, GAELLE CHÂTEAU ET ANNE PILLEBOUT*
- 100 ▽ L'évaluation des **risques sanitaires** :  
application au **stockage des déchets ménagers**  
*FRÉDÉRIC DOR ET DOMINIQUE GUYONNET*
- 106 ▽ Tribune - **Health and hazards: Interdisciplinary activities between  
earth sciences and public health** - *H. CATHERINE W. SKINNER*
- 108 ▽ Tribune - **The medical geology revolution**  
*OLLE SELINUS, JOSE A. CENTENO ET ROBERT B. FINKELMAN*
- 110 ▽ Tribune - **Volcanisme et santé** - *JACQUES VARET*
- 112 ▽ Tribune - **Les métaux sont-ils utiles ou néfastes pour la santé ?**  
*ALAIN GRIMFELD*
- 115 ▽ **Chiffres clés**
- 116 ▽ **Brèves**

**géosciences** Mars 2007 • numéro 5

Direction de la Communication et des Éditions du BRGM - 3 av. Cl. Guillemin - 45060 Orléans Cedex 2 - Tél. : 02 38 64 37 84 - communication@brgm.fr  
Directeur de la rédaction : Jacques Varet • Responsables du numéro "Géosciences et santé" : Jean-Luc Boulmier et Dominique Guyonnet • Directeur de la publication : Geoffroy Lehdeux-Vernimmen • Comité de rédaction : Loïc Beroud (Service Public), Christian Fouillac (Recherche), Jean-Claude Guillauneau (International), Dominique Guyonnet (pollution, déchets), Thierry Pointet (eau), Hormoz Modarressi (risques naturels), Pierre Nehlig (géologie, cartographie), Jack Testard (ressources minérales), Michel Villey (actions régionales), Jean-Marc Lardeaux (Université de Nice), Michel Vauclin (CNRS) • Secrétariat de rédaction : Dominique Verhelst • Révision : Olivier Legendre, Dominique Verhelst • Responsable d'édition : Pierre Vassal • Maquette et réalisation : Chromatiques 01 43 45 10 • Impression : Imprimerie Nouvelle - Saint-Jean de Braye • Régie pub : com d'habitude publicité 05 55 24 14 03 - www.comdhabitude.fr - contact@comdhabitude.fr • ISSN 1772-094X • ISBN 978-2-7159-0998-4 • Dépôt légal à parution • Référencée dans la base Scopus d'Elsevier.  
Toute reproduction de ce document, des schémas et infographies, devra mentionner la source "Géosciences, la revue du BRGM pour une Terre durable".  
Le comité de rédaction remercie les auteurs pour leur contribution • Les propositions d'articles sont à envoyer à d.verhelst@brgm.fr.

Liste des annonceurs : APBG (Association des Professeurs de Biologie-Géologie) p. 49, CNETH (Conseil National des Exploitants Thermaux) p. 77 • CPA p. 55 • Colloque international CO<sub>2</sub> 2007 p. 37 • DALBY p. 103 • EVIAN p. 83 • HACH LANGE p. 91 • RENOLIT France p. 13 • Salon européen de la Recherche et de l'Innovation 2007 p. 09 • SADE p. 95 • SCÉRÉN / CNDP-CRDP p. C2 • SDEC p. 63 • SEPIA-Santé p. 39 • UNCMÉ (Union Nationale de Crédit Mutuel Enseignant) p. C3.



**Vietnam**

© Sami Sarkis - PhotoAlto

**Jean Dercourt**SECRÉTAIRE PERPÉTUEL  
DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

## Démographie, santé, environnement

Désormais, les spécialistes des géosciences et ceux de la santé doivent mettre au cœur de leurs préoccupations, outre l'évolution climatique, la croissance démographique mondiale qui portera l'humanité des 6 milliards actuels à 9 milliards en 2050, affectant inégalement les différentes régions du globe. Les populations devront être nourries pour espérer vivre en bonne santé. Or, aujourd'hui, avec seulement 6 milliards d'êtres humains, tous ne le sont pas. Les sciences de la Terre et les sciences de la santé sont étroitement associées pour relever ce défi.

La santé implique, tout d'abord, que chacun mange à sa faim et boive à sa soif une eau non polluée. Donc, la croissance démographique implique de profondes modifications de la production et des circuits commerciaux. Les surfaces cultivées doivent être accrues et les sols cesser de s'éroder. Les cultures pluviales doivent croître, tant dans les zones climatiques tempérées d'Amérique du Nord, d'Europe et d'Amérique du Sud que dans les zones intertropicales. Afin de maintenir la biodiversité, les zones pluviales tempérées seront les plus sollicitées et leur productivité devra beaucoup s'améliorer. La demande et les transferts de grains et de viande induiront un commerce « d'eau virtuelle ».

Le développement de l'irrigation, grâce à de nouveaux grands barrages, n'est pas à l'échelle du problème. Les sites d'implantation ne sont plus très nombreux dans le monde. Ils ennoient de vastes surfaces de sols cultivables. Un conflit apparaît ici entre nourriture et énergie. Le dessalement de l'eau de mer, envisageable pour les eaux de boisson, ne l'est pas pour l'agriculture, au moins jusqu'à la commercialisation de l'énergie produite par la fusion nucléaire, donc vraisemblablement après 2050. Les énergies renouvelables croîtront dans les pays riches, les plus développés, et la consommation des énergies fossiles dans les autres. L'eau, vecteur principal de la santé des populations, est l'enjeu majeur pour l'avenir.

L'eau est facteur de vie mais aussi de transport de maladies. La propagation des maladies infectieuses suit de très près la géographie des marécages, par exemple. Les hydrogéologues ont, en Europe, asséché les marais, sources de malaria jusqu'au siècle dernier. Le développement du Chikungunya, qui défraya récemment la chronique, est associé à un médiocre drainage des sols.

La pollution des sols urbains ou miniers est aussi source de nombreuses affections. Les cours d'eau et les eaux souterraines distribuent largement les substances toxiques. Dans les pays où la démographie impose un développement rapide, la qualité de la santé publique dépend directement de la gestion des ressources géologiques (minerais, énergie et eau). On en trouvera plusieurs exemples au sein de ce numéro.

L'environnement, comme la santé, intègre de nombreuses disciplines. L'importance de chacune d'entre elles doit permettre d'assurer un environnement durable. Encore faut-il ne pas confondre stable et durable. La stabilité n'a jamais existé pendant le Quaternaire ; par exemple, pendant l'explosion de l'art pariétal, l'océan est remonté de 120 mètres dans les derniers 18 000 ans, avec quelques périodes d'un mètre par siècle. D'autres définitions existent : pour certaines, l'environnement est durable lorsqu'il permet à l'humanité de poursuivre son développement, tant physique qu'intellectuel, en dépit des variations du milieu quelles qu'en soient leurs origines.

Pour que ces développements soient accessibles, il convient de reconnaître que le principe de précaution concerne les décisions du pouvoir politique. Il implique une évaluation, par exemple, des innovations déterminant le bénéfice social attendu, apte à apporter des solutions à un problème majeur (sans qu'il soit besoin d'attendre quelques décennies pour atteindre la certitude de son innocuité).

Le niveau actuel des recherches ne permet pas d'analyser les concepts et les méthodes liés garantissant la qualité de l'environnement et de la santé au bénéfice d'une population rapidement croissante. Il convient d'être prêt à accueillir, dès maintenant, dans les pays tempérés, industrialisés, à agriculture pluviale et peu peuplés, comme l'Europe, des flux migratoires très importants. Les fils de fer barbelés, les murs et les décrets n'y changeront rien. Il y eut, dans l'Histoire, de grandes migrations ; elles n'ont jamais été arrêtées et tous ceux concernés par l'environnement et la santé doivent, dès maintenant, préparer cet accueil.



**Dr. Peter Bobrowsky**

SECRETARY GENERAL  
INTERNATIONAL UNION  
OF GEOLOGICAL SCIENCES  
pbobrows@NRCan.gc.ca

**M**edical geology, geomedicine, geochemistry and health, as well as environment and health are some of the many terms now applied to the exciting field of research in which the relevance of the earth sciences to human and animal health plays a key role. The practice of applying earth science knowledge to health issues goes back many thousands of years [cf. Bowman *et al.* (2003) for a review]. Indeed, it has long been known that inorganic elements are an essential component to our existence, and that an excess or deficiency in one or more elements may prove disastrous to humans and animals. This basic knowledge clearly predates the accreditation of geology as an official scientific discipline. Today, a widely accepted definition for Medical Geology is “the science dealing with the relationship between natural geological factors and health in man and animals, and understanding the influence of ordinary environmental factors on the geographical distribution of such health problems”.

Regarding the actual practice of Medical Geology, it is difficult to identify a point in time when this field of research attained a level of formality. The reason for this is that geoscientists have long been interested and involved in a variety of topical studies which, by definition, clearly lie in the realm of Medical Geology. Often work on groundwater quality, iodine, arsenic, mining, radon, fluorine, asbestos, selenium, geophagia, volcanic emissions and many other activities were and continue to be practical studies in the field of Medical Geology.

The mid 1990s most likely reflect a key period of research with enhanced attention towards Medical Geology given the publication by Appleton *et al.* (1996) and the effort by the International Union of Geological Sciences (IUGS) Commission on Geological Sciences for Environmental Planning (COGEO-ENVIRONMENT) to launch a Working Group on Medical Geology. One notable output of this latter activity was a conference publication edited by Skinner and Berger (2003). Under the leadership of Dr. Olle Selinus (Geological Survey of Sweden) and within a few years, this Working Group successfully evolved into an active international program. As a consequence, the Working Group was elevated to Initiative status directly under the IUGS itself to obtain several years of support. And with continued



success and growth the participants of this effort have further transformed this body into an independent organization as of January 2006: the International Medical Geology Association (IMGA) ([www.medical-geology.org/](http://www.medical-geology.org/)). A highlight of this new organization has been the publication of an exceptional state-of-the-art volume by Selinus and colleagues (2005). This award winning book will remain a permanent fixture of reference for decades to come as the primary resource for information on the subject. Concurrently, there has been a number of other activities initiated dealing with the subject. For example, from 2000 to 2004 the International Geological Correlation Programme (now International Geoscience Programme) supported IGCP Project #454 on Medical Geology, in 2002 the International Council for Science (ICSU) awarded a grant of \$100,000 to several unions to work on the subject, whereas in 2005 the Geological Society of America started the Division for Geology and Health (<http://rock.geosociety.org/GeoHealth/index.html>).



“ **All geoscientists must help promote the importance and relevance of earth sciences to environmental, human and animal health and well-being proactively.** ”

Looking forward, all geoscientists must help promote the importance and relevance of earth sciences to environmental, human and animal health and well-being proactively. We have done a great job amongst ourselves but public and government perception and appreciation of the geosciences remain low. The timing of this special volume by BRGM is noteworthy as we enter the triennium for the

International Year of Planet Earth – IYPE (2007-2009). As the global community acknowledges and celebrates this UN proclaimed year in 2008 ([www.esfs.org](http://www.esfs.org)), geoscientists finally have a big chance to act collectively and positively to expose the essential need for geology to the rest of the world. We should applaud the successful efforts of the contributing authors to this compilation, but we

must not stop here and should therefore plan ahead for a greater impact in 2008. I welcome all geoscientists interested in this subject to contact the IYPE Secretariat and their own National Committees for IYPE soon to actively contribute towards Earth and Health by building a safer environment. ■

**References:** J. Appleton, R. Fuge and G. McCall (1996) – Environmental geochemistry and health. Geological Society, Special Publication n° 113, 272 p. C. Bowman, P. Bobrowsky and O. Selinus (2003) – Medical Geology: applied relevance in the earth sciences. Episodes, vol. 26, n° 4, pp. 270-278. O. Selinus (Editor-in-chief) (2005) – Essentials of Medical Geology: impacts of the natural environment on public health. Elsevier/Academic Press, 812 p. C. Skinner and A. Berger (Editors) (2003) – Geology and Health: closing the gap. Oxford University Press, 192 p.



Sans produits d'origine minérale, un grand nombre de médicaments ou de cosmétiques n'auraient jamais vu le jour. Certains de ces produits présents à l'état naturel sont utilisés directement après extraction et raffinage comme principes actifs ou excipients dans toutes les formes possibles (sèche, pâteuse, liquide, gazeuse). Dans la majorité des cas, ils sont synthétisés à partir d'éléments de base d'origine minérale naturelle. Mais tout au long de la chaîne de production, ils doivent subir une batterie complète d'analyses physico-chimiques, de contrôles et de validations.

# Les minéraux en pharmacie



06



**Professeur Daniel Lefort des Ylouses**

PHARMACIE GALÉNIQUE  
daniel.lefort@univ-tours.fr

**Professeur Roger Deloncle**

TOXICOLOGIE  
roger.deloncle@univ-tours.fr

**Professeur Pierre Dubois**

CHIMIE ANALYTIQUE  
pierre.dubois@univ-tours.fr  
Faculté de Pharmacie Philippe-Maupas  
Université François-Rabelais de Tours

Pour la conception puis l'industrialisation des formes médicamenteuses, cosmétiques et diététiques, l'industrie pharmaceutique et des produits de santé utilise des quantités très importantes de produits d'origine minérale issus des éléments répertoriés dans le tableau périodique de Mendeleïev (figure 1).

Bien qu'une grande majorité de ces éléments soit représentée dans l'arsenal thérapeutique, seuls sont ici décrits les produits les plus importants et les plus courants (principes actifs et excipients) composant les médicaments.

## ÉLÉMENTS ALCALINS (colonne IA)

Parmi les éléments alcalins, seuls les ions sodium et potassium ont un rôle physiologique alors que le lithium et le césium ne sont connus que pour leur utilisation en thérapeutique antipsychotique (sels de lithium) ou pour leur radiotoxicité (césium 137).

### Lithium

Le carbonate de lithium est utilisé pour le traitement des psychoses maniaco-dépressives chez l'adulte, ou le gluconate de lithium dans le cas de manifestations psychosomatiques mineures chez l'enfant.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIIIB	VIIIB	VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw	

- ◀ ■ Essentiel à la plupart des organismes (toxique à dose élevée) / Essential to most organisms (may be toxic in excess)
- Essentiel à une espèce au moins (peut être toxique pour d'autres) / Essential to at least one species (may be toxic to others)
- Toxique, en règle générale, pour la plupart des organismes / Generally toxic to most organisms
- Risque d'effet biologique / Biological function suspected
- Radioactif / Radioactive

◀ Fig. 1 : Tableau périodique des éléments de Mendeleïev avec indication des éléments ayant des effets biologiques avérés ou possibles (d'après Plant, Annels, Haslam, Steenfelt & Varet, BGS, 2001).  
Fig. 1: Mendeleïev's periodic table of elements showing elements with known and possible biological effects (from Plant, Annels, Haslam, Steenfelt & Varet, BGS, 2001).

## Sodium

### Principes actifs

Il est utilisé sous forme chlorure en perfusions isotoniques pour maintenir la volémie<sup>(1)</sup> et l'équilibre hydro-électrolytique sanguin : « sérum physiologique » (*photo 1*).

Sous forme de bicarbonate, du fait d'un pouvoir alcalinisant, il sert de médicament antiacide par voie orale ou en perfusion pour restaurer l'équilibre acido-basique sanguin.

### Excipients

#### ► BICARBONATE DE SODIUM [NaHCO<sub>3</sub>]

Cet excipient est employé comme agent alcalinisant ; il permet d'obtenir une solution aqueuse de pH voisin de 8. Il est surtout utilisé comme base minérale carbonatée pour l'émission d'anhydride carbonique dans les granules et comprimés effervescents, en présence d'un acide organique. C'est l'agent d'effervescence le plus utilisé en association avec l'acide citrique anhydre. Ce produit est rencontré en cosmétologie dans les dentifrices comme agent abrasif blanchissant, et est utilisé en poudre fine par les dentistes comme agent abrasif doux détartrant.

#### ► CHLORURE DE SODIUM [NaCl]

En tant qu'excipient, le chlorure de sodium est employé comme agent isotonisant des préparations injectables et des collyres (*photo 2*). Dans le cas des dispersions et de la cosmétologie, cet excipient permet d'entraîner une modification de la viscosité des émulsions, suspensions et gels (shampooing et bain moussant).

(1) Volémie : volume sanguin total, plasmatique et globulaire.



▲ **Photo 1 : Solutés massifs pour perfusion.**  
Photo 1: High-concentration solutes for IV drips.



◀ **Photo 2 : Conditionnements pour collyre.**  
Photo 2: Packaging for eyedrops.



## Potassium

### Principes actifs

L'ion potassium existe physiologiquement au niveau sanguin à des concentrations bien moindres que le sodium, mais le maintien de la kaliémie<sup>(2)</sup> au voisinage de cette concentration est vital pour le fonctionnement du muscle cardiaque.

Pour maintenir cet équilibre hydroélectrolytique sanguin, le potassium est administré sous forme chlorure en perfusions intraveineuses isotoniques ou hypertoniques. Dans les traitements des pathologies cardiaques ou de l'hypertension par les diurétiques, la kaliémie est maintenue par administration orale du potassium sous forme chlorure, gluconate, citrate ou aspartate.

### Excipients

#### ► BICARBONATE DE POTASSIUM [KHCO<sub>3</sub>]

Cet excipient est employé comme agent alcalinisant et comme base minérale carbonatée pour l'émission d'anhydride carbonique dans les comprimés effervescents, en présence d'un acide organique, et lorsque le sodium est contre-indiqué en thérapeutique.

#### ► CHLORURE DE POTASSIUM [KCl]

En tant qu'excipient, le chlorure de potassium est employé essentiellement comme agent isotonisant des injectables et des collyres.

## ÉLÉMENTS ALCALINO-TERREUX (colonne IIA)

Lorsqu'ils sont administrés sous forme soluble, les éléments alcalino-terreux sont métabolisés au niveau osseux. Le magnésium et le calcium possèdent un rôle physiologique dans la constitution de l'os.

## Magnésium

### Principes actifs

Il s'agit d'un ion sédatif du système nerveux central essentiel à la régulation du rythme cardiaque et des contractions musculaires. Il est utilisé sous différentes formes de sels solubles (chlorure, sulfate, pidolate...) ou administré sous les formes insolubles carbonate ou oxyde pour leurs propriétés antiacides.

### Excipients

#### ► CARBONATE DE MAGNÉSIUM ou magnésite [MgCO<sub>3</sub>]

Le carbonate basique de magnésium est en fait une

association de carbonate et d'hydroxyde de magnésium avec des quantités d'eau de constitutions variables. Cet excipient est un agent de remplissage des gélules et un diluant pour la fabrication des comprimés. Il est également employé comme agent adsorbant. Il fait effervescence au contact des acides organiques tels que l'acide citrique.

#### ► OXYDE DE MAGNÉSIUM ou périclase [MgO]

Obtenu en calcinant le carbonate ou l'hydroxyde de magnésium, cet excipient est un agent de remplissage des gélules et un diluant pour la fabrication des comprimés. Comme le précédent, cet excipient est alcalin et existe sous deux variétés (légère et lourde).

## Calcium

### Principes actifs

Le calcium est un élément indispensable dans la constitution et la solidité des os et des dents. Il participe au fonctionnement du système nerveux et du système cardiaque ; de plus il intervient dans le processus de la coagulation sanguine.

Le calcium est utilisé pour des problèmes liés au métabolisme osseux en association, le plus souvent, avec un traitement par la vitamine D.

### Excipients

#### ► CARBONATE DE CALCIUM ou calcite [Ca CO<sub>3</sub>]

Le carbonate de calcium est obtenu par précipitation chimique, sous diverses densités apparentes : légère ou lourde. Les formes naturelles sont la calcite, et plus rarement l'aragonite. Pour certaines utilisations, avec le label « naturel », il peut être produit à partir de coquilles d'huîtres par broyage et traitement thermique. Ce produit est employé comme diluant pour la fabrication de formes sèches orales. Il est également employé en dragéification comme produit de charge et opacifiant. En cosmétologie ce produit, après micronisation, sert d'agent abrasif dans les dentifrices (photo 3).

**Photo 3 : Mélangeur sous vide pour la fabrication des formes pâteuses.**

Photo 3: Vacuum mixer for preparing ointments.

Source : ROMACKO



(2) Kaliémie : taux de potassium du plasma sanguin.



# SALON EUROPÉEN DE LA RECHERCHE & DE L'INNOVATION

7-9 juin 2007 / PARIS EXPO / PORTE DE VERSAILLES

## > Partagez l'état des connaissances



Espagne,  
invité d'honneur

+33(0)1 56 68 00 00  
[www.salon-de-la-recherche.com](http://www.salon-de-la-recherche.com)  
[www.european-research-exhibition.com](http://www.european-research-exhibition.com)

Organisé par : **Fondamental** **Expo**



## Prenez de l'avance



**SIEMENS**



**L'USINENOUVELLE**

**La Recherche**  
L'INSTITUT DES SCIENCES

**La Tribune**

**Le Point**

► PHOSPHATE DICALCIQUE [CaHPO<sub>4</sub>] et TRICALCIQUE [Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]

Ces excipients cristallins sont obtenus par réaction de l'acide phosphorique sur l'hydroxyde de calcium. Les variétés « poudre fine » sont utilisables comme excipient diluant, pour le remplissage des gélules et surtout pour la fabrication des comprimés (photo 4). Ces produits sont non-hydrosolubles. En cosmétologie, la variété micronisée est employée comme abrasif dans les dentifrices.

► SULFATE DE CALCIUM [CaSO<sub>4</sub>]

Pour l'usage pharmaceutique, ce produit est obtenu par précipitation à partir de chlorure de calcium en présence d'un sulfate hydrosoluble. Pour d'autres utilisations, il est issu de la calcination du gypse. Le sulfate de calcium, non-hydrosoluble, existe sous deux formes :  
 – le sulfate anhydre hygroscopique est employé comme agent de dessiccation ;  
 – le sulfate dihydraté non-hygroscopique est employé comme diluant durcisseur pour comprimés.

### Baryum

Le baryum est un élément relativement dense et donc opaque au rayonnement X. Cette propriété le fait utiliser sous forme de sulfate de baryum comme produit de contraste en radiologie. Du fait de sa très grande insolubilité, il est donc atoxique.

### ÉLÉMENTS DE TRANSITION : BLOC D (colonnes 3 à 12)

Un très grand nombre de ces éléments dits de transition jouent le rôle de cofacteurs enzymatiques dans les différents métabolismes glucidique, lipidique et protidique, et à ce titre permettent des suppléments thérapeutiques en oligo-éléments. Ces suppléments sont effectués très souvent sous forme de gluconate hydrosoluble.



▲ **Photo 4 : Médicaments secs de formes diverses.**  
 Photo 4: Solid dosage forms of various shapes.

### Titane

► DIOXYDE DE TITANE [TiO<sub>2</sub>]

Ce produit existe à l'état naturel sous le nom « rutile ». Il s'agit d'un pigment blanc micronisé, utilisé comme agent colorant et opacifiant, notamment pour l'enrobage des comprimés, mais également comme filtre anti-UV dans les préparations cosmétiques antisolaires. En mélange avec d'autres colorants, le dioxyde de titane permet l'obtention de teintes pastel (photo 5).

### Chrome

Le chrome est impliqué au niveau du métabolisme des glucides par potentialisation de l'insuline. Il permet de régulariser le métabolisme des graisses et du sucre, abaisse la pression artérielle et le taux de cholestérol. Pour ces raisons, il peut faire l'objet de suppléments en tant qu'oligo-élément (sous forme de gluconate).

### Manganèse

Le manganèse entre dans la composition de métallo-enzymes antiradicalaires comme la Super Oxyde Dismutase mitochondriale. Ce métal est donc proposé comme oligo-élément médicamenteux sous forme de chlorure, sulfate ou de sels organiques (gluconate, pidolate, glycérophosphate...). Du fait de ses propriétés oxydantes, l'anion permanganate MnO<sub>4</sub><sup>-</sup> est rencontré dans la composition de solutions antiseptiques d'usage externe (soluté de Dakin).

### Fer

#### Principes actifs

Le fer est connu pour son rôle physiologique de transporteur de l'oxygène au niveau sanguin grâce à l'hémoglobine dans laquelle il se trouve sous forme d'un complexe moléculaire (environ 65 % du fer de l'organisme).



◀ **Photo 5 : Comprimés enrobés.**  
 Photo 5: Coated pills.



## ► LE TALC ET SES ATOUTS SANTÉ

Laura Jones Rio Tinto Minerals – laura.jones@riotinto.com

Connu depuis des millénaires pour améliorer la préhension et adoucir la peau, le talc a acquis ses lettres de noblesse depuis une trentaine d'années dans de nombreux secteurs industriels tels que le papier, la peinture, les plastiques, l'alimentation animale et humaine, ainsi que les produits pharmaceutiques et cosmétiques.

La neutralité chimique et la pureté du talc le rendent idéal dans de nombreuses applications touchant à la santé humaine. En voici quelques exemples.

Dans les cosmétiques, la plus ancienne et la plus connue de ses applications, le talc est apprécié pour son toucher soyeux et son caractère absorbant, exfoliant et protecteur. Ces propriétés absorbantes et apaisantes sont exploitées dans les soins d'hygiène personnelle et les soins du bébé. Employé après le bain ou, dans le cas du bébé, au moment du change, il calme la peau, empêche les irritations et lui confère une agréable sensation de fraîcheur et de douceur. Cependant pour des raisons de sécurité et éviter tout accident d'inhalation par les bébés, le talc est de plus en plus utilisé dans des crèmes apaisantes ou hydratantes destinées à l'hygiène journalière des bébés.

Dans l'industrie pharmaceutique, le talc est prisé pour son caractère inerte, glissant, lubrifiant et diluant. L'inertie du talc en fait un parfait excipient pharmaceutique pour la fabrication de comprimés où il a un effet stabilisateur. L'excipient sert en effet de véhicule du principe actif et permet à ce dernier de parvenir là où il est censé agir. Le talc est également employé dans les revêtements entériques des comprimés. Ces revêtements protecteurs « à effet prolongé » permettent à un principe actif à effet irritant, tel que l'aspirine par exemple, de passer de l'estomac dans l'intestin avant de se dissoudre.

Dans le milieu médical, les chirurgiens sont amenés à injecter du talc pharmaceutique dans la cavité pleurale de certains patients afin d'éviter la réapparition de pleurésies ou de pneumothorax. La plèvre, une membrane fine à deux feuillets qui entoure les poumons et la cage thoracique, contient habituellement une vingtaine de millilitres de liquide qui sert surtout à permettre le glissement du poumon dans la cage thoracique lors des mouvements respiratoires. Certaines maladies telles que les cancers, les maladies cardiaques ou les maladies infectieuses ou virales, peuvent provoquer une accumulation de liquide dans cette poche. Après ponction du liquide qui s'est accumulé, ou de l'air dans le cas de pneumothorax, la pratique du « talcage pleural » ou « pleurodèse » sert à accoler les deux feuillets pleuraux. En évitant le renouvellement de la pleurésie ou du pneumothorax, le confort du patient est grandement amélioré.

En conformité avec les réglementations en vigueur, la neutralité chimique du talc permet son utilisation dans des applications alimentaires humaines. Hydrophobe de nature et ne permettant pas aux bactéries de se développer, il est largement utilisé dans l'industrie agro-alimentaire en tant qu'additif technologique ou aide à la production. Le talc est ainsi utilisé comme agent anticollant dans des produits alimentaires aussi courants que le chewing-gum, les bonbons, et les salaisons. ■

### La carrière de talc de Trimouns dans les Pyrénées françaises.

*The Trimouns talc quarry in the French Pyrenees.*

© Baschenis.





Un déficit en fer peut générer chez le patient une anémie qui est compensée par apport médicamenteux de différents sels de fer (chlorure, sulfate, fumarate, oxalate, gluconate et ascorbate).

### Excipients

#### ► OXYDES DE FER [Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>]

Ces excipients sont employés en pharmacie et cosmétologie en tant que pigments colorants non-hydrosolubles et présentent donc une parfaite innocuité.

Oxyde de fer noir – Oxyde de fer brun – Oxyde de fer rouge – Oxyde de fer jaune : les couleurs diffèrent suivant la taille, la forme des particules, et le taux d'oxyde de fer hydraté (goethite).

### Cobalt

Le cobalt est principalement impliqué au niveau du règne animal sous forme de vitamine B12 (cyanocobalamine) antianémique. Chez l'homme, cette vitamine ne peut être synthétisée à partir de cobalt minéral et doit donc être absorbée sous une forme active : la vitamine B12 (sous forme injectable ou collyre). Les suppléments se trouvent également sous forme d'oligo-éléments de cobalt (chlorure, sulfate, gluconate...).

### Cuivre

Le cuivre est connu pour ses propriétés anti-infectieuses, antiallergiques et antioxydantes. Son rôle est essentiel dans la défense cellulaire et le bon fonctionnement du cerveau. Il entre dans la composition de nombreuses enzymes qui combattent les radicaux libres. Le cuivre participe à l'assimilation du fer ; la carence en cuivre provoque donc fatigue, anémie, essoufflement et dépigmentation. Les suppléments en cuivre se font sous forme chlorure, sulfate, gluconate ou pidolate dans le cas d'oligo-thérapie ou sous forme complexée avec de l'histidine pour le traitement de la maladie de Menkès<sup>(3)</sup>.

Les propriétés antiseptiques et anti-infectieuses du cuivre sous forme sulfate, en association avec du sulfate de zinc, sont par ailleurs utilisées en usage cutané dans les solutions cupro-zinciques (soluté et pommade de Dalibour).

### Zinc

#### Principes actifs

Le zinc intervient dans plus de deux cents enzymes et est impliqué au niveau des trois métabolismes : glucidique, lipidique et protidique. Il permet en outre de lutter contre

les radicaux libres et de protéger les membranes cellulaires. Il favorise la croissance cellulaire d'où amélioration du processus de cicatrisation et de la kératinisation.

Il est employé par voie orale sous forme de pidolate ou de gluconate à des fins d'oligo-thérapie, et par voie cutanée sous forme de chlorure ou de sulfate pour des problèmes dermatologiques de cicatrisation.

### Excipients

#### ► OXYDE DE ZINC [ZnO]

Il s'agit d'un pigment blanc micronisé, utilisé comme agent colorant, opacifiant et couvrant. Il est notamment utilisé pour l'enrobage des comprimés, mais également comme opacifiant et protecteur dans les préparations cutanées et cosmétiques antisolaires (photo 6).

## ÉLÉMENTS DU BLOC P (colonnes 13 à 18)

Ces colonnes renferment principalement les éléments non-métalliques ainsi que quelques métaux au caractère métallique peu accentué.

### COLONNE 13

#### Bore

#### ► ACIDE BORIQUE

En tant qu'excipient, l'acide borique associé au borate de sodium ou à la soude est employé comme agent



▲ **Photo 7 :**  
**Mine de bauxite.**  
Photo 7:  
Bauxite mine.

© BRGM im@gé -  
F. Michel



◀ **Photo 6 :**  
**Machine pour la mise en tube des pommades.**  
Photo 6:  
Tube-filling machine for ointment.

Source : ROTO.

<sup>(3)</sup> Maladie de Menkès : maladie génétique rare liée au chromosome X affectant le transport intracellulaire du cuivre et dont les principales manifestations sont d'ordre neurologique.



tampon, isotonisant des collyres, avec un caractère antiseptique favorable à la conservation de ces produits.

## Aluminium

### Principes actifs

L'aluminium est obtenu à partir d'un minerai d'origine naturelle : la bauxite (photo 7). L'aluminium est proposé comme médication antiacide dans la protection gastro-intestinale sous forme de différents sels tels que carbonate, hydroxyde, silicate ou phosphate. Sous une forme hydrosoluble l'aluminium présente un risque toxique.

### Excipients

#### ► HYDROXYDE D'ALUMINIUM

L'aluminium est surtout présent dans le règne minéral sous forme de silicates (tal, argiles...). Les hydroxydes sont essentiellement représentés par le diaspore et la boehmite [AlO(OH)]. On utilise l'hydroxyde d'aluminium en tant qu'agent activateur de l'immunité des vaccins en créant, après injection sous-cutanée, une légère réaction inflammatoire.

## COLONNE 14

## Carbone

### Principes actifs

Le carbone sous forme de charbon activé est utilisé pour ses propriétés adsorbantes vis-à-vis des gaz dans les cas de météorisme intestinal, ou comme traitement antidote pour limiter l'absorption gastro-intestinale dans certains cas d'intoxications médicamenteuses.

### Excipients

#### ► ANHYDRIDE CARBONIQUE [CO<sub>2</sub>]

L'anhydride carbonique est employé à l'état gazeux comme élément de désoxygénation de solutions aqueuses, comme agent acidifiant en milieu aqueux par sa transformation en acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), et également comme agent propulseur dans les aérosols et conditionnements pressurisés, en pharmacie et en cosmétologie.

PUBLICITÉ

*La passion de l'étanchéité*

**ALKORPLAN**  
Géomembranes PVC

Travaux souterrains

**ALKORTENE**  
Géomembranes PEHD

Travaux hydrauliques

**ALKORTOP**  
Géomembranes PP

Travaux d'environnement

Certification ASQUAL  
Ligne des géomembranes certifiées sur demande

---

✕ Faxez au **01.49.47.07.39** la fiche de renseignements suivants afin de recevoir gratuitement une documentation sur CD

Société : .....

Nom/Prénom : .....

Fonction : .....

Tel. : .....

Fax : .....

e-mail : .....

Adresse : .....

**RENOLIT FRANCE**  
Roissy-CDG - B.P. 10943 - 95733 Roissy CDG Cedex  
e-mail : [martine.vergnolle@renolit.com](mailto:martine.vergnolle@renolit.com)  
tel. 01 41 84 30 28 - Fax 01 49 47 07 39

## ► TALC, TEXTURE ET APPLICATION EN COSMÉTIQUE

Mohamed Bizi BRGM – m.bizi@brgm.fr

Jean-François Tranchant LVMH Recherche Parfums et Cosmétiques – jtranchant@research.lvmh-pc.com



En cosmétique, les minéraux industriels comme le kaolin, le mica et le talc, sont souvent introduits dans les formulations en

raison de leurs caractéristiques optiques, physico-chimiques et texturales.

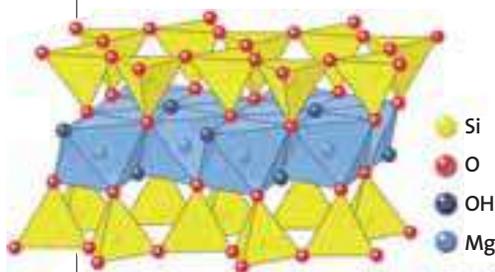
Les fards, produits conçus pour exprimer le charme et l'élégance féminine, sont généralement composés de pigments d'oxydes métalliques et de charge minérale lamellaire : mica ou talc. L'effet attendu de ces produits de beauté est multiple : masquer ou atténuer

lubrifiant et anticollant.

Au talc cosmétique, sont souvent associés, et en proportion inférieures à 5 %, les chlorites, la dolomie, la magnésite et le quartz. La limitation de la blancheur du talc est majoritairement liée à la présence de ces impuretés porteuses d'éléments de transition colorants.

Les propriétés intrinsèques du talc dépendent de sa provenance. Pour les applications cosmétiques, il vient le plus souvent du gisement de Trimouns situé dans l'Ariège sur la commune de Luzenac. Environ 10 % de la production annuelle des talcs de Luzenac sont utilisés dans cette filière. Par ailleurs, il existe une relation indéniable entre le mode de préparation mécanique de ce minéral et ses caractéristiques texturales, morpho-granulométriques, et aussi avec certaines propriétés physico-chimiques et optiques. Il est donc possible de moduler ces paramètres en relation avec les propriétés d'usage.

Sur cette base, LVMH Recherche Parfums et Cosmétiques et le BRGM ont apporté des améliorations très significatives au niveau de la qualité optique et texturale d'une formulation de type « fards à paupières ». Les éléments visés concernent la transparence, la brillance et le pouvoir couvrant de la matrice minérale. L'éclat ou la brillance dépend de façon dominante de l'état de surface et de la distribution dimensionnelle des lamelles de talc. Des lamelles fines donnent un éclat soyeux et des lamelles grenues un aspect scintillant. La transparence est directement liée à l'épaisseur des particules. Le pouvoir couvrant est fonction de la distribution granulométrique, de l'indice de réfraction relatif et de la concentration de la charge.



▲ Feuillet élémentaire de talc.  
An elementary sheet of talc.

les imperfections du visage, absorber les UV, apporter un velouté, une teinte et une clarté nuancées. Dans les fards à paupières, le talc est utilisé pour sa lamellarité, sa douceur et son onctuosité comme support de pigments, et pour son inertie chimique et biologique. Il doit être blanc ou légèrement transparent et exempt de toute contamination d'origine biologique. Il est apprécié pour son fort pouvoir



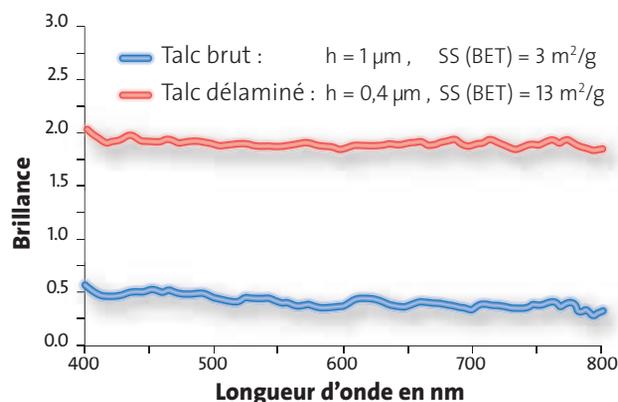
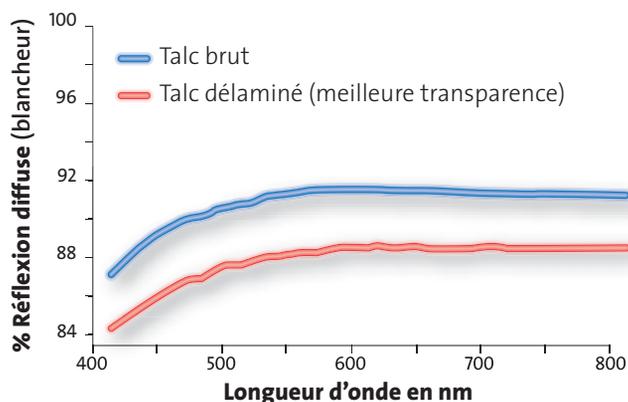
▲ Particule de talc (empilement de feuillets).  
A talc particle (stack of sheets).

© BRGM

Le délaminage associé à un broyage modéré permettent d'atteindre ces objectifs. En effet, le délaminage consiste à réduire les épaisseurs des empilements initiaux des lamelles de talc par cisaillement tangentiel. Il est réalisé par le biais de forces parallèles aux faces basales des lamelles, minimisant leur fracture selon des directions normales à ces surfaces basales. Ce traitement entraîne la production de nouvelles surfaces basales et la diminution de la rugosité globale par effet de libération de particules lamellaires fines initialement collées sur les surfaces basales.

L'état de surface des lamelles en termes de brillance et de rugosité est évalué par la spectrométrie optique en réflexion diffuse et réflexion spéculaire. L'épaisseur moyenne « h » et la distribution en surface projetée des particules sont déterminées par diffractométrie laser.

Les fards « Ombres à paupières » élaborés avec ce talc délaminé sont de très bonne qualité, très doux, transparents, uniformes, bien colorés, possédant un grand pouvoir couvrant ; ils s'appliquent bien mieux que les formules traditionnelles réalisées avec un talc standard. ■



Références : M. Bizi, M.-P. Flament, P. Leterme, A. Gayot, G. Baudet (2003) – Relation between structural characteristics of talc and its properties as an antisticking agent in the production of tablets. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 19, pp. 373-379. P. Leterme, A. Gayot, G. Finet, M. Bizi, M.-P. Flament (2005) – Influence of the morphogranulometry and hydrophobicity of talc on its antisticking power in the production of tablets. International Journal of Pharmaceutics 289, pp. 109-115.

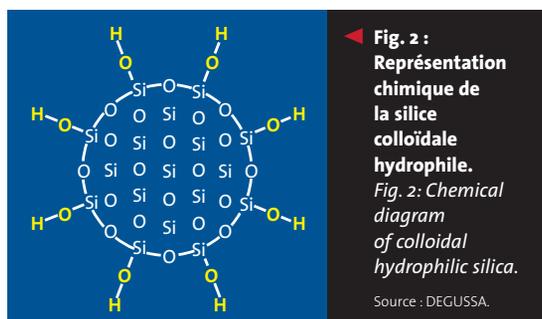
## Silicium

### Excipients

#### ► SILICE [SiO<sub>2</sub>]

##### *Silice colloïdale*

Il s'agit d'une silice pyrogénée non-hydrosoluble se présentant sous une forme très hydrophile, amorphe sphérique (*figure 2*), donc n'entraînant pas de risque de silicose. Elle se présente sous forme de poudre très fine (submicronique), de très faible densité apparente (< 0,1). Le chiffre associé à la dénomination commerciale (200, 300 et 380) correspond à la surface développée en m<sup>2</sup> par 1 g de silice pyrogénée. Ce type de produit peut adsorber jusqu'à 40 % de son poids en eau ou solvants organiques polaires tout en restant sous forme pulvérulente. Cette silice est gélifiante des huiles et des essences.

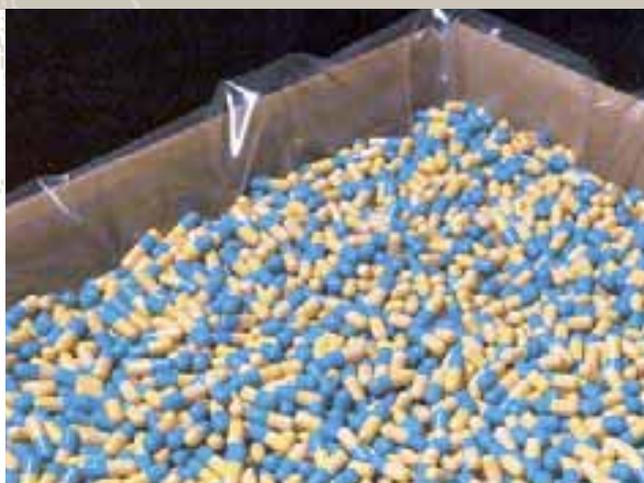


Son indice de réfraction de 1,45 permet d'obtenir un milieu transparent lors de sa mise en suspension dans des liquides d'indice voisin (glycérol). Cette caractéristique est utilisée pour la fabrication de dentifrices transparents, la silice étant l'abrasif.

La silice étant très électro-négative permet de neutraliser les charges électropositives ; elle est donc utilisable en tant qu'agent antistatique.

Elle est utilisée en pharmacie et cosmétique comme :

- agent épaississant pour stabiliser les systèmes dispersés,
- agent texturant de systèmes pâteux tels que les dentifrices,
- retardateur de décantation des poudres pour la fabrication des suspensions, des enrobages, des suppositoires et des sticks,
- agent « anti-caking » permettant de faciliter la remise en suspension,
- support adsorbant de principes actifs liquides et pâteux,
- agent antistatique facilitant le tamisage et le mélange des poudres cohésives,
- agent antimottant pour poudres humides et cohésives (adjuvant de broyage),
- agent lubrifiant d'écoulement largement utilisé dans la fabrication des comprimés et le remplissage des gélules (*photo 8*).



◀ **Photo 8 :**  
Conditionnement des gélules vides en vrac.

*Photo 8: A batch of empty capsules.*

Source : Capsugel.

### *Silices précipitées*

Ce sont des silices hydratées amorphes, obtenues à partir de silicates alcalins acidifiés. La densité apparente est de l'ordre de 0,1. Les particules sont submicroniques.

Elles sont utilisées en pharmacie et cosmétique comme agents : épaississants des liquides, stabilisants des dispersions, protecteurs des formes sèches contre l'humidité, adsorbants à effets multiples (liquides – humidité), antimottants pour produits d'alimentation du bétail et d'écoulement, pour faciliter la désagrégation des comprimés afin d'optimiser la biodisponibilité (*photo 9*).

#### ► SILICATES

Ce groupe représente les composés de la silice avec divers métaux. Les plus fréquemment utilisés sont des silicates d'aluminium, et surtout de magnésium. Ces produits sont, pour la plupart, d'origine naturelle (*photo 10*) et traités par raffinage pour retirer les impuretés naturelles, responsables d'incompatibilités et de réactions d'intolérance.

**Photo 9 :** Échantillons de poudres.  
*Photo 9: Powder samples.*



**Photo 10 :** Exploitation de kaolin sur arène granitique.  
*Photo 10: Kaolin formed on granitic sand.*

© BRGM im@gé - P. Lebret



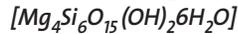


◀ **Photo 11 : Atelier d'atomisation et séchage en lit fluidisé dans l'industrie pharmaceutique.**

*Photo 11: Atomization and fluid-bed drying in pharmaceutical industry.*

Source : INNOVIA.

#### *Trisilicate de magnésium ou sepiolite*



Outre ses fonctions d'agent d'écoulement et antimottant, ce produit présente une caractéristique d'agent durcisseur des comprimés.

#### *Talc $[Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2]$*

Le talc est un silicate de magnésium hydraté, cristallin, d'origine naturelle. La caractéristique principale pour son utilisation comme excipient est son état lamellaire qui lui permet d'enrober partiellement des substances pulvérulentes. Le talc se présente sous forme de poudre très fine de l'ordre de quelques microns, légèrement grasse, onctueuse et adhérente au toucher. C'est donc un agent antimottant, antistatique sur certains produits pulvérulents, et surtout avec d'excellentes qualités d'écoulement et de lubrifiant antifricition. Il est très utilisé pour la fabrication des comprimés et pour le remplissage des gélules (*photo 12*).

#### ▶ ASSOCIATIONS SILICE - ALUMINIUM – MAGNÉSIUM

##### *Attapulgite $[(Mg,Al)_2Si_4O_{10}(OH).4(H_2O)]$*

Ce produit est une argile naturelle purifiée, se présentant sous forme de poudre très fine. Sa caractéristique principale est d'être un adsorbant puissant formant des gels aqueux, viscosant des émulsions aqueuses. Dans les formes sèches, il est également employé pour cette fonction adsorbante dans le tube digestif. La forme activée de l'attapulgite est un produit déshydraté par un traitement thermique, ce qui le rend encore plus adsorbant.

#### ▶ ASSOCIATIONS SILICE – ALUMINIUM

##### *Silicate d'aluminium hydraté colloïdal natif ou bentonite*

Il s'agit d'un produit minéral d'origine naturelle, essentiellement composé d'argiles de type montmorillonite  $(Na,Ca)_{0,3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ . Ce produit est purifié afin d'éliminer les impuretés.

La bentonite, agent non-hydrosoluble, très hydrophile et légèrement hygroscopique, est employée en tant qu'excipient adsorbant (antipoison), stabilisant des émulsions, viscosant et gélifiant des solutions, et agent de mise en suspension. Bien toléré par la peau et les muqueuses, cet excipient peut être administré par voie orale.

Il existe une qualité appelée « bentonite blanche », produit raffiné apprécié pour sa blancheur dans les crèmes topiques et cosmétiques.

Une argile du groupe des montmorillonites associée à des groupements lipophiles peut être employée pour viscoser et gélifier les huiles pour l'usage externe.

##### *Silicate d'aluminium ou kaolin $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$*

Le kaolin est un silicate d'aluminium hydraté naturel débarrassé de ses impuretés (*photo 11*). C'est un produit non-hydrosoluble, hydrophile, mais très peu hygroscopique. Cet excipient est utilisé en tant qu'adsorbant topique et oral. Il est bien toléré par la peau et les muqueuses, et peut être administré par voie orale.

#### ▶ ASSOCIATIONS SILICE - MAGNÉSIUM

##### *Silicate de magnésium – laponite*

C'est en fait une argile gonflante de synthèse, proche de l'hectorite. Cet excipient, non-hydrosoluble, est utilisable en tant qu'agent antimottage des sédiments des suspensions fluides.

▶ **Photo 12 : Presse à compri- mer automatique.**

*Photo 12: An automatic compressor.*

Source : FETTE.



**Silicates d'aluminium et de magnésium**

Ces produits sont des compositions complexes et variables à base de silice, d'oxyde de magnésium, d'oxyde d'aluminium, de divers oxydes d'autres métaux et d'eau. Ils sont non-hydrosolubles mais très hydrophiles, et présentent une structure physique en lamelles chargées électriquement et fortement accolées entre elles (figure 3a).

Ces produits relativement voisins du point de vue structure sont tous des adsorbants, des stabilisateurs de suspensions, des viscosants des dispersions et des gélifiants aqueux. Chargés électriquement, ils présentent des incompatibilités avec les ions, entraînant une diminution de la viscosité, par rupture de la texture organisée (figure 3b).

Ils peuvent en outre être utilisés dans les formules de comprimés comme agents de désintégration pour les dérivés les plus gonflants, ou comme liants pour les dérivés les plus visqueux et adhésifs.

**COLONNE 15****Azote**► DIAZOTE [N<sub>2</sub>]

L'azote est employé à l'état gazeux comme élément de désoxygénation de solutions aqueuses. Ce gaz étant plus soluble dans l'eau que l'oxygène permet de rendre inertes de façon stable les solutions médicamenteuses. Il est également employé comme agent propulseur dans les aérosols et conditionnements pressurisés, en pharmacie et en cosmétologie.

► PROTOXYDE D'AZOTE [N<sub>2</sub>O]

Ce gaz est employé comme agent propulseur dans les aérosols et conditionnements pressurisés, en pharmacie et en cosmétologie. Grâce à son pouvoir de dissolution dans les lipides, il est utilisé pour la fabrication de mousses et de gels foisonnants en cosmétologie.

**Phosphore****Principes actifs**

Le phosphore joue un rôle important dans la synthèse de l'ATP, source d'énergie au niveau cellulaire, et dans la synthèse des phospholipides, composants des membranes cellulaires. Il est présent en majeure partie (85 %) dans le squelette. Le couple acido-basique [H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>/HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] joue le rôle de tampon au niveau sanguin.

Fig. 3a

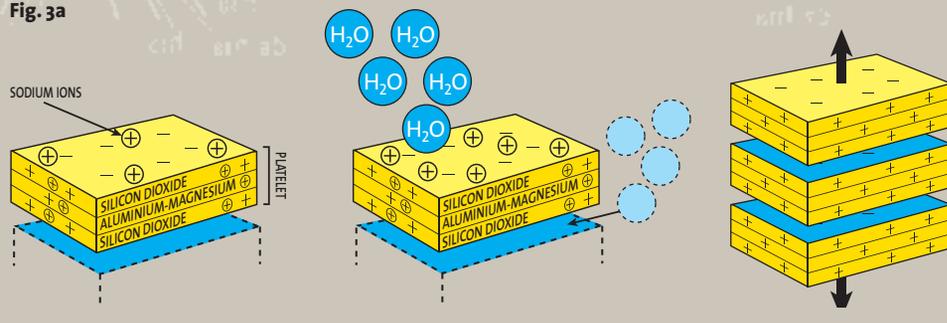
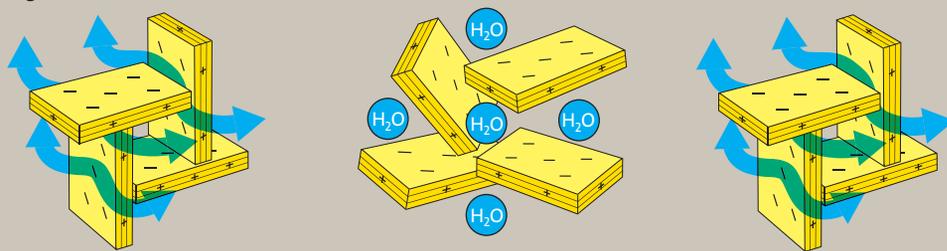


Fig. 3b

**COLONNE 16****Soufre****Principes actifs**

Le soufre intervient au niveau du règne vivant sous forme d'acides aminés soufrés et participe de ce fait à la structure des protéines. Il a un rôle essentiel dans le cas des os, des dents et des articulations ; il possède des propriétés anti-infectieuses. La carence en soufre provoque une mauvaise santé des phanères et une augmentation des infections. On utilise le soufre en suspension pour traiter des maladies de peau.

**Excipients**

## ► SULFITES

Les sulfites se présentent sous divers formes : sulfite de sodium [Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>], bisulfite de sodium [NaHSO<sub>3</sub>], métabisulfite de sodium [Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>]. Ces excipients possèdent la caractéristique de libérer de l'anhydride sulfureux : SO<sub>2</sub>. De ce fait, ils sont employés comme agents antioxydants dans les préparations aqueuses.

**Sélénium**

Le sélénium est un élément indispensable à la croissance. Il joue un rôle important dans le processus de détoxification au niveau hépatique. On l'utilise pour ses propriétés antifongiques et cicatrisantes en dermatologie.

**COLONNE 17 – LES HALOGÈNES****Fluor**

Le fluor est retrouvé pratiquement en totalité (98 %) au niveau de l'os et des dents sous forme de cristaux

▲ **Fig. 3 : Comportement des argiles.**  
Fig. 3: Clay behaviour.

Source : American Colloid Company

d'hydroxyapatite  $[Ca_5(PO_4)_3(OH,F)]$ . Il permet de prévenir les caries dentaires par une supplémentation contrôlée des eaux de boisson (1 mg/L) ou par utilisation de dentifrices raisonnablement fluorés.

## Chlore

### Principes actifs

Le chlore sous forme chlorure est le principal anion du sang circulant. Il accompagne en tant que contre-ion le cation sodium dans le maintien des équilibres acido-basique et hydroélectrolytique sanguin.

### Excipients

#### ► HYPOCHLORITE DE SODIUM $[NaOCI]$

Cet excipient est un antiseptique très puissant (appelé « eau de Javel »), essentiellement employé en désinfection de locaux et de machines, avant leur stérilisation. Il est présent sous forme purifié dans des compositions antiseptiques (Dakin).

## Iode

L'iode intervient dans l'organisme essentiellement au niveau du métabolisme thyroïdien. Il sert à synthétiser les hormones thyroïdiennes qui sont émises dans la circulation sanguine. Une carence en iode va générer une hypertrophie de la thyroïde (goitre).

L'iode présente des propriétés antiseptiques qui le font utiliser sous forme de solutés alcooliques (appelé improprement « teinture d'iode »).

À l'état stable (non-radioactif), l'utilisation de l'iode est prévue sous forme de comprimés d'iodure de potassium (dosés à 100 mg) pour saturer la thyroïde des habitants voisins (dans un rayon de 10 km) des centrales nucléaires.

## CONTRÔLE PHYSICO-CHIMIQUE DES PRODUITS MINÉRAUX

Les contrôles physico-chimiques de routine s'effectuent systématiquement avant et en fin de fabrication des produits de santé.

Avant fabrication, toutes les molécules (excipients et/ou principes actifs) entrant dans la forme galénique doivent être conformes aux monographies de la pharmacopée européenne ou à défaut d'autres pharmacopées (française, anglaise, américaine...), ou, si ces monographies n'existent pas, à celles décrites dans le dossier d'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM).

Ces monographies ont toujours le même plan. Apparaissent en premier lieu le nom de la substance,

la formule chimique si elle est connue avec exactitude, le poids moléculaire, la définition qui indique les limites du degré de pureté de la substance. Puis sont décrits les caractères organoleptiques, c'est-à-dire l'état de la substance (solide cristallisé ou amorphe, liquide ou gaz), sa couleur, son odeur, sa solubilité dans différents solvants. Suivent ensuite les méthodes d'identification de la substance, les essais, le dosage et le mode de conservation du produit. Peuvent apparaître en fin de monographie les principales impuretés.

Lors de la fabrication d'un produit de santé, il est impératif de vérifier la conformité du produit livré. Pour ce faire, des prélèvements sont réalisés. Les méthodes d'identification décrites dans la pharmacopée sont donc utilisées à cette fin. Ce sont des méthodes d'analyse chimique qui vont caractériser les éléments ou les molécules constituant la matière première.

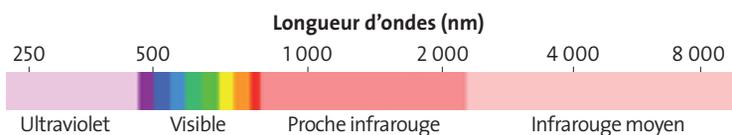
Ces méthodes sont souvent longues et délicates de mise en œuvre. C'est pourquoi les industriels utilisent de plus en plus la spectrométrie dans le proche infrarouge qui, après un étalonnage de plusieurs centaines d'échantillons, permet une analyse directe et non-destructive, sans préparation des échantillons donc et en routine (voir encadré ci-dessous).

“ Notre bonne vieille planète Terre est donc un réservoir quasi inépuisable d'éléments indispensables à l'obtention des produits de santé. ”

### ► LA SPECTROMÉTRIE DANS LE PROCHE INFRAROUGE

La spectrométrie peut être définie comme l'étude des interactions de la lumière avec la matière. Cette matière organique et/ou minérale peut absorber certaines énergies correspondant à des longueurs d'onde ( $\lambda$ ) variées, donc à des domaines différents :

- 200 nm <  $\lambda$  < 700 nm, UV-Visible.
- 700 nm <  $\lambda$  < 2 500 nm, proche IR.
- 2 500 nm <  $\lambda$  < 25 000 nm, IR moyen.



Dans la zone du proche infrarouge, les absorptions ne sont pas dues aux vibrations fondamentales des molécules (zone de l'infrarouge moyen), mais aux vibrations harmoniques et aux vibrations de combinaisons. Le spectre obtenu est complexe, les bandes d'absorption de toutes les liaisons chimiques se chevauchant. L'interprétation du spectre est donc de fait très difficile. C'est pourquoi des méthodes chimiométriques sont appliquées afin de mettre au point des méthodes de calibration efficaces. Les spectromètres sont équipés de deux fibres optiques, l'une conduisant la lumière infrarouge, l'autre recueillant la lumière diffusée et absorbée par la matière solide. Il suffit, après un long étalonnage de l'appareil, de plonger la fibre optique dans différents endroits du fût contenant la substance à analyser pour connaître immédiatement la nature de la substance. ■



## ► LA SPECTROMÉTRIE D'ABSORPTION ATOMIQUE

Une vapeur atomique d'un élément peut absorber de l'énergie et restituer cette énergie sous forme de raies lumineuses.

*Spectre d'émission du fer*



*Spectre d'émission du calcium*



Une vapeur atomique peut absorber certaines raies lumineuses émises par une lampe dite à cathode creuse.

*Spectre de raies – émission atomique*



*Spectre d'absorption atomique*



Ce phénomène d'absorption est mesurable. Il a été montré que le rapport de l'intensité lumineuse émise par la lampe sur l'intensité lumineuse transmise après absorption par la vapeur atomique, dépend de la concentration en élément atomique. La loi de Beer-Lambert montre que l'absorbance est proportionnelle à la concentration de l'élément ( $A = k.l.c$  où 'k' est une caractéristique de l'atome, 'l' la longueur de passage du faisceau lumineux dans la vapeur atomique, et 'c' la concentration en mg/L de l'élément). Une droite d'étalonnage de l'appareil par une solution étalon du même élément que celui à étudier peut être tracée. La valeur de l'absorbance de l'échantillon à doser permet par extrapolation sur la droite d'étalonnage de connaître la concentration de l'élément. ■

Une fois l'identification réalisée, différents essais doivent être effectués pour évaluer le degré de pureté de la matière. Selon la substance minérale, il s'agit de mesures de pH, de recherches d'alcalin ou alcalino-terreux (sodium, calcium), de mesures du degré d'humidité...

En outre, essentiellement pour les substances d'origine naturelle (argiles par exemple), des traces de métaux toxiques (arsenic, métaux lourds comme le plomb) doivent être systématiquement recherchées par une méthode spectrométrique dite d'absorption atomique (voir encadré ci-dessus). Les éléments constituant le minéral sont dosés et comparés aux pourcentages limites recommandés par la pharmacopée.

Dans le cas de substances « minérales synthétiques » ou de sels comme le phosphate monopotassique ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ) ou le sulfate de cuivre ( $\text{CuSO}_4$ ) par exemple, les monographies sont identiques sauf la méthode de dosage final. C'est une méthode volumétrique qui est décrite. Elle est fondée sur la mise en jeu d'un réactif de titre parfaitement connu, qui réagit avec le cation ( $\text{Ca}^{2+}$  ou  $\text{Cu}^{2+}$ ) par exemple, ou encore avec l'anion ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), puis en fin de réaction avec un indicateur coloré.

C'est ainsi que sont décrites des méthodes :

- de complexation utilisant le sel disodique de l'acide éthylène diamine tétra-acétique ( $\text{EDTA } 2\text{Na}$ ) comme réactif, et un indicateur différent selon le métal à doser mais qui change de couleur lorsqu'il passe de l'état de complexe avec le métal en solution à l'état libre ;
- électrochimiques mettant en jeu les propriétés réductrices des iodures. Le cuivre cuivrique en présence d'iodure se réduit en cuivre cuivreux et les iodures

s'oxydent en iode, dosable par le thiosulfate de sodium ;

- de pHmétrie. Les sels mono, diphosphate par exemple, sont dosés par potentiométrie, c'est-à-dire en mesurant le pH en fonction du volume de la solution d'hydroxyde de sodium de titre exactement connu.

Après les résultats obtenus, les substances testées doivent répondre à tous les critères définis dans la monographie. Dans ce cas la formulation peut être envisagée.

Une fois la formulation galénique faite, seule la substance possédant une activité pharmacologique est caractérisée et dosée. Seuls les sels minéraux, entrant dans la composition d'une formule galénique, considérés comme principes actifs ou comme conservateurs, seront dosés. Le plus souvent, la méthode employée est la spectrométrie d'absorption atomique qui permet le dosage des éléments.

Le répertoire des produits minéraux entrant dans les produits de santé, nous montre que ces éléments sont indispensables, voire irremplaçables, pour leur formulation.

Ils font partie de quasiment toutes les catégories d'excipients, aussi bien pour la fabrication des formes sèches (diluants, liants, lubrifiants, désintégrants, agents d'enrobage), que pour les formes liquides et pâteuses (stabilisants, émulsionnants, antiseptiques, antioxydants, adjuvants de pH...).

Notre bonne vieille planète Terre est donc un réservoir quasi inépuisable d'éléments indispensables à l'obtention des produits de santé. ■



### **Minerals in the pharmaceutical sector**

*In developing and manufacturing medicinal, cosmetic and dietary substances, the drug and health product sector uses large quantities of mineral materials derived from the elements listed in Mendeleiev's periodic table.*

*Some of these substances, like talc and various clays, occur naturally and, once extracted and refined, are used directly. In most instances, however, the substances are synthesized from basic elements of natural mineral origin.*

*These materials are present in medications both because they facilitate the manufacturing process and because they optimize biodiversity and response to therapy, either as active ingredients or as excipients for producing dry forms, i.e., as fillers, binders, lubricants, disintegrants, or coatings, or in liquids and pastes, i.e., as stabilizers, emulsifiers, antiseptics, antioxidants or pH additives. Thus our dear old planet Earth possesses a virtually limitless store of elements indispensable for obtaining health products.*

Gaz radioactif d'origine naturelle, le radon issu de l'écorce terrestre tend à s'accumuler dans les bâtiments. Un premier cadre réglementaire pour des bâtiments recevant du public de départements déclarés prioritaires s'est récemment mis en place. Des réflexions sont en cours pour la protection des bâtiments neufs et de l'habitat existant. Les solutions pour empêcher ou réduire l'accumulation dans les bâtiments existent et doivent être adaptées aux différents cas de bâtiments et d'usage.



# Le radon dans les bâtiments



**Bernard Collignan**

RESPONSABLE DU PÔLE VENTILATION ET  
AMBIANCES INTÉRIEURES  
DÉPARTEMENT DÉVELOPPEMENT DURABLE  
CSTB  
bernard.collignan@cstb.fr

Le radon est un gaz radioactif qui provient de la dégradation de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre. À partir du sol et de l'eau, le radon diffuse dans l'air et se trouve, par effet de confinement, à des concentrations plus élevées à l'intérieur des bâtiments qu'à l'extérieur. Les descendants solides du radon sont alors inhalés avec l'air respiré et se déposent dans les poumons. Le radon constitue la part la plus importante de l'exposition aux rayonnements naturels reçus par l'homme, en France de même que dans le monde.

Les risques pour la santé liés à l'exposition au radon ont été établis à partir de nombreuses études menées chez l'homme (en particulier auprès des ouvriers des mines) et chez

l'animal, faisant apparaître un lien avec le cancer du poumon. Si les preuves épidémiologiques directes de l'impact sanitaire du radon aux faibles concentrations font l'objet de débats, l'estimation indirecte, mais plausible, des risques

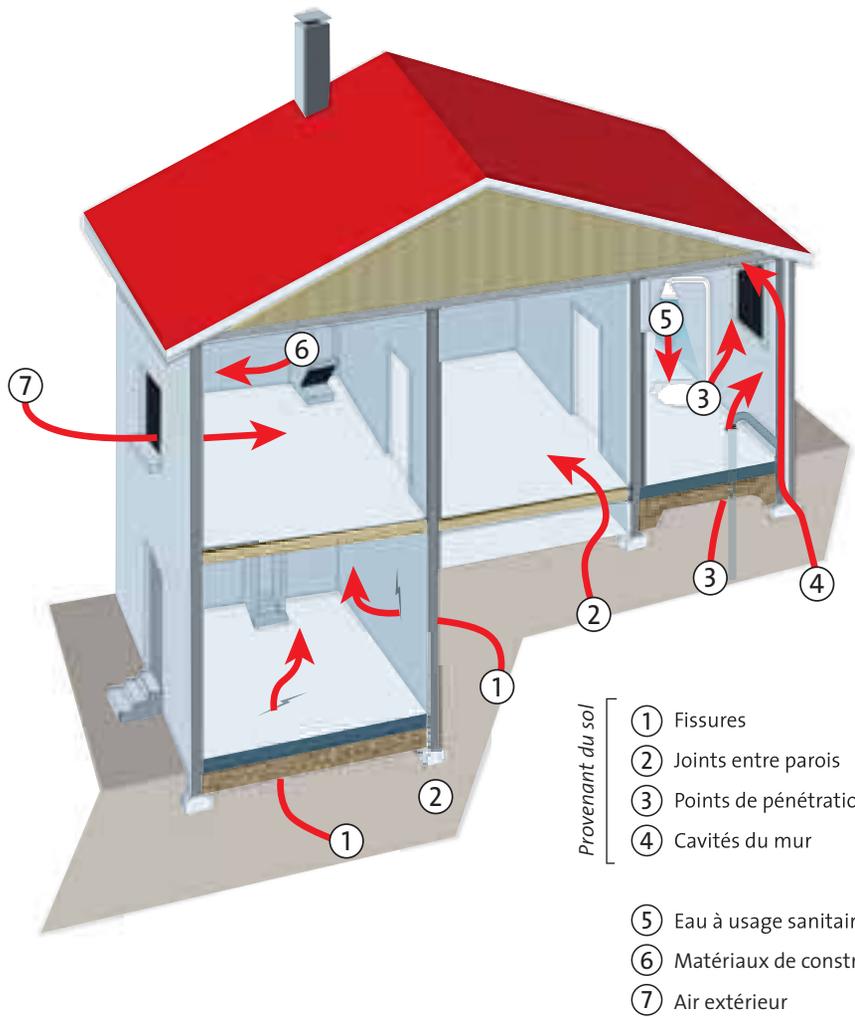
“ Le radon constitue la part la plus importante de l'exposition aux rayonnements naturels reçus par l'homme. ”

fondés sur l'extrapolation des courbes doses-risques établies aux fortes expositions conduit à attribuer au radon plusieurs milliers de cas annuels de cancer du poumon en France liés à l'exposition dans les bâtiments.

“*Le sol est en général la cause principale de la présence de radon dans l'air intérieur des bâtiments.*”

Le sol est en général la cause principale de la présence de radon dans l'air intérieur des bâtiments (Figure 1). L'entrée du radon dans les bâtiments résulte de nombreux paramètres (concentration dans le sol, perméabilité et humidité du sol, présence de fissures ou de fractures dans la roche sous-jacente) et notamment des caractéristiques propres de l'habitat (procédé de construction, fissuration de la surface en contact avec le sol, système de ventilation...). Dans une moindre mesure, la présence de radon dans les locaux habités peut cependant avoir d'autres origines : l'air extérieur, les matériaux de construction, l'eau à usage domestique.

La prise de conscience du problème en France est relativement récente. Un premier cadre réglementaire existe et des travaux sont en cours pour définir la démarche concernant les constructions neuves et l'habitat existant. La mesure du radon dans les bâtiments s'effectue dans un premier temps à l'aide de dosimètres passifs permettant de réaliser un dépistage dans le bâtiment. Il existe un ensemble de techniques de réduction dans les bâtiments à décliner en fonction du type de bâtiment et de son usage.



◀ **Fig. 1 : Voies d'entrée du radon dans un bâtiment.**  
 Fig. 1: Entry routes for radon into a building.  
 Source : CSTB.



**José Perrin**

GÉOPHYSICIEN  
SERVICE CONNAISSANCE ET  
DIFFUSION DE L'INFORMATION  
GÉOLOGIQUE  
BRGM  
j.perrin@brgm.fr

L'étude du radon dans un milieu géologique constitue une méthode rigoureuse pour identifier et délimiter les territoires présentant le risque le plus grand de niveaux élevés en gaz radon. Cette approche est la plus sûre en matière de prévision. La mesure de la concentration en radon dans l'habitat reste cependant la méthode la plus directe pour déterminer le risque d'exposition à de fortes teneurs.

L'évaluation de l'aléa radon doit prendre en compte trois termes :

- source (matières pouvant émettre du radon),
- vecteur (moyens empruntés par le radon pour migrer depuis son lieu de production jusqu'à un bâtiment),
- piégeage dans l'habitat (cf. article de B. Collignan, dans ce numéro).

Dans sa démarche, le géologue analyse la distribution des sources du radon dans le sous-sol et détermine comment celui-ci trouve son chemin jusqu'à la surface.

### À l'origine du radon : l'uranium

L'origine de ce gaz radioactif qui provient de la désintégration du radium, lui-même descendant de l'uranium pour l'essentiel, constitue le fondement de la géologie du radon. La présence du radon dans

notre environnement est conditionnée par l'abondance de ses précurseurs et limitée par sa période radioactive (temps nécessaire pour que la moitié se transforme par désintégration).

Cette période est courte (3,8 j.), mais son arrière-arrière-grand-parent uranium est suffisamment répandu dans la croûte terrestre (teneur moyenne estimée à environ 3 g/t) pour assurer le renouvellement de sa production partout à la surface du globe.

En réalité l'étude géochimique des roches révèle une grande disparité dans la répartition de l'uranium terrestre en relation avec ses affinités chimiques et sa difficulté à s'insérer dans les réseaux cristallins minéraux. Cette variabilité des teneurs uranium se traduit par des différences de premier ordre dans les taux de production de radon. Corrélativement, la probabilité d'avoir des concentrations radon excessives dans l'habitat change selon la nature du substrat géologique. L'uranium est présent dans toutes les roches d'origine magmatique, les plus fortes teneurs sont trouvées dans les granites, dans les gneiss et dans les roches volcaniques claires dites acides. Les régions géologiques de nature magmatique sont particulièrement concernées notamment la Bretagne, le Massif central, la Corse et les Vosges, comme le confirme la mise en regard de la carte géologique de France à celle de la répartition départementale des concentrations radon relevées par l'IRSN dans l'habitat (cf. figure 2, article de B. Collignan, ce numéro). Dans certains granites la teneur en uranium dépasse de

beaucoup la teneur moyenne : dans ceux du Limousin et de Vendée elle peut s'élever à 20 g/t.

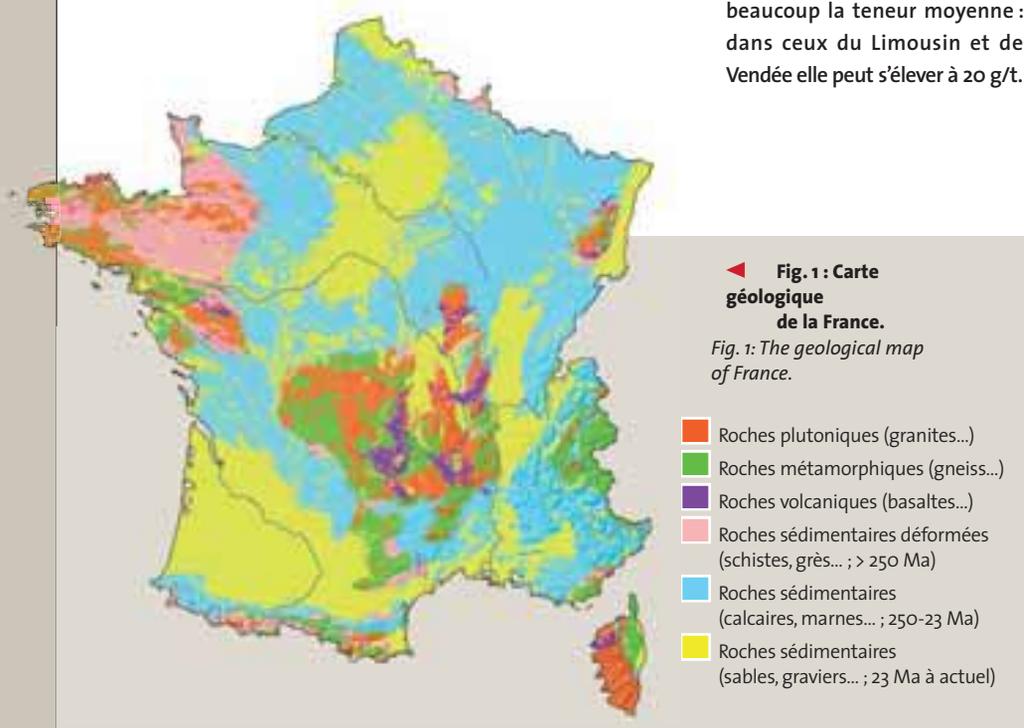
Dans les formations sédimentaires, l'affinité de l'uranium pour la matière organique joue un rôle important dans sa concentration, ainsi on le trouve fréquemment dans les schistes noirs graphiteux. Il est parfois présent dans les bassins détritiques contenant des dépôts argilo-gréseux issus de l'érosion de roches riches en uranium. Enfin, il a une très grande affinité pour les sédiments phosphatés. En général le contenu en uranium des sols est identique à celui des roches dont ils dérivent.

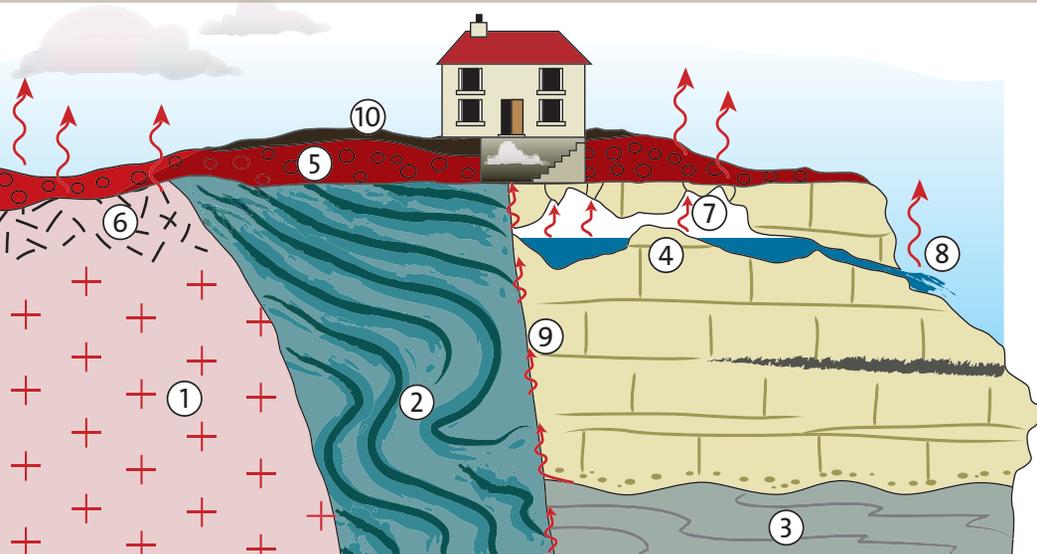
### La production du radon

La capacité du radon à s'échapper de la matrice minérale – on parle de pouvoir d'émanation – dépend de la structure intime de la roche. Le coefficient de diffusion du radon dans les matériaux cristallins est très faible ( $<10^{-24} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), seuls les atomes de radon libérés dans l'espace poreux sont susceptibles de migrer. Seulement 10 à 50 % du radon produit parviennent à circuler dans les interstices de la roche. Les mécanismes de l'émanation, activés par la dissipation de l'énergie de désintégration, sont complexes. Son efficacité est optimale dans des roches grenues, fissurées et humides, où le radium est bien réparti à la surface des grains minéraux. Les conglomérats, les gneiss, les granites anciens riches en micas ont les meilleurs taux d'émanation. Exception faite des sols argileux, le pouvoir d'émanation des sols est toujours nettement supérieur à celui du substrat rocheux.

### La mobilité du radon

Gaz inerte, le radon a une beaucoup plus grande mobilité que l'uranium ou le radium qui sont fixés dans la matière solide de la roche. Mais du fait de sa courte période radioactive, la quantité qui s'échappe dans l'atmosphère dépend de la profondeur à laquelle il est formé et de l'efficacité de son transport à travers le milieu rocheux. En premier lieu, il faut que la roche ou le sol possède une grande proportion de pores ayant une interconnexion importante de façon à offrir une bonne aptitude à transmettre l'eau ou l'air (nommée perméabilité). Le radon se déplace plus rapidement à travers des sols perméables formés par exemple de sables grossiers et de graviers qu'à travers des argiles imperméables. Les fissures dans n'importe quel type de roche facilitent le déplacement du radon. Les propriétés de diffusion du gaz radon permettent d'évaluer la distance moyenne qu'il peut parcourir avant de se désintégrer : elle est de l'ordre de quelques centimètres dans l'eau et peut atteindre plusieurs mètres dans les sols secs. Ainsi, l'essentiel du radon observé à la surface du sol serait formé à faible profondeur, à moins de mettre en jeu un autre mécanisme de transport que celui de la simple diffusion. La migration du radon sur





**Fig. 2 : Les processus naturels d'exposition au radon.**

D'après P. Barrier, *Géochronique* n° 78 (2001).

Fig. 2: The natural processes of radon exposure, from P. Barrier, *Géochronique* No. 78 (2001).

- 1 Massif granitique / Granite massif
- 2 Schistes noirs / Black shale
- 3 Substratum / Substratum
- 4 Massif karstique / Karst massif
- 5 Formations superficielles / Surficial formations
- 6 Fractures / Fractures
- 7 Cavités souterraines / Underground caves
- 8 Eaux souterraines / Groundwater
- 9 Faille / Fault
- 10 Sols perméables / Permeable soil

de grandes distances est possible par advection ; beaucoup de radon est transporté par les eaux souterraines, dans lesquelles il est soluble en grande proportion, et par le dégazage naturel de la terre qui produit un flux permanent de gaz carbonique, d'azote et en moindre proportion d'hélium ou de méthane. Ces dégazages, spectaculaires au niveau des volcans et des sources thermales, sont bien connus dans les zones de sismicité active, mais existent aussi de façon plus discrète ailleurs. Les discontinuités fragmentant la croûte terrestre à toutes les échelles, constituent les lieux préférentiels de ces circulations de gaz qui entraînent au passage le radon. Les vitesses de transport associées à ces processus peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres par heure. C'est pourquoi des quantités importantes de radon sont connues au niveau des failles actives et sur les champs géothermiques. Le rôle des failles est également attesté dans les massifs calcaires. Ces roches sont généralement très pauvres en radium, pourtant il est courant d'y trouver localement des concentrations radon élevées. Elles s'expliquent presque toujours par un réseau de fractures développé qui draine le radon du socle sous-jacent et par un système karstique favorisant le processus d'advection. Citons également les galeries souterraines dont le rôle de collecte et de transport rapide du radon est bien connu dans les travaux miniers.

En résumé, un site ayant un sol sec, bien drainé et fortement perméable comme des arènes granitiques

grossières, reposant sur un substrat rocheux fissuré ou caverneux, réunit les critères favorables à une exhalation importante de radon.

### Cartes de potentiel radon

On peut ainsi se faire une bonne idée du niveau de l'aléa radon pour un territoire en étudiant sa géologie. Une habitation construite dans une zone ayant un fort potentiel radon est très probablement concernée par le risque radon. Toutefois une architecture défaillante augmente ce risque et peut conduire à des niveaux de radon insalubres, y compris dans une zone de faible potentiel et inversement (cf. article de B. Collignan, ce numéro).

Le géologue évalue le potentiel radon d'un secteur et établit des « cartes de potentiel radon » en croisant une multitude de critères, parmi lesquels : le contenu en uranium du substrat rocheux et du sol, la structure de la roche et son pouvoir d'émanation, la distance aux failles ouvertes, la perméabilité et l'humidité des sols... Tous ces paramètres ne sont pas toujours disponibles partout ; il utilise alors des informations indirectes qu'il recueille sur les cartes géologiques, les cartes

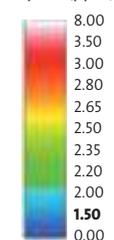
de radioactivité et les cartes pédologiques.

La carte géologique renseigne sur l'extension des affleurements rocheux pouvant contenir des niveaux élevés d'uranium, sur l'organisation du réseau de failles et la localisation des accidents profonds aptes à collecter une grande quantité radon. Elle peut également fournir des éléments sur la nature des formations superficielles qui jouent, avec les sols, un rôle clé dans la dissipation du radon hors du domaine géologique.

Les cartes de radioactivité établies à partir de levés géophysiques aériens, permettent d'apprécier assez précisément le niveau de fond en uranium des roches et des matériaux du proche sous-sol. Les techniques aéro-spectrométriques utilisées actuellement, mises en œuvre à partir d'un avion volant à basse altitude selon un maillage serré, donnent accès à une résolution de l'ordre de quelques hectares. Les instruments embarqués détectent la radioactivité liée à la filiation de l'uranium, ou pour être plus précis, celle signée par le bismuth, un proche descendant du radon. C'est pourquoi on observe généralement une bonne corrélation entre les cartes spectrométriques et le contenu radon des sols.

Le BRGM a réalisé en 1998 un levé de ce type couvrant l'ensemble du massif Armoricaire dont les résultats ont contribué à la cartographie du potentiel radon des régions Pays de la Loire et Basse-Normandie. ■

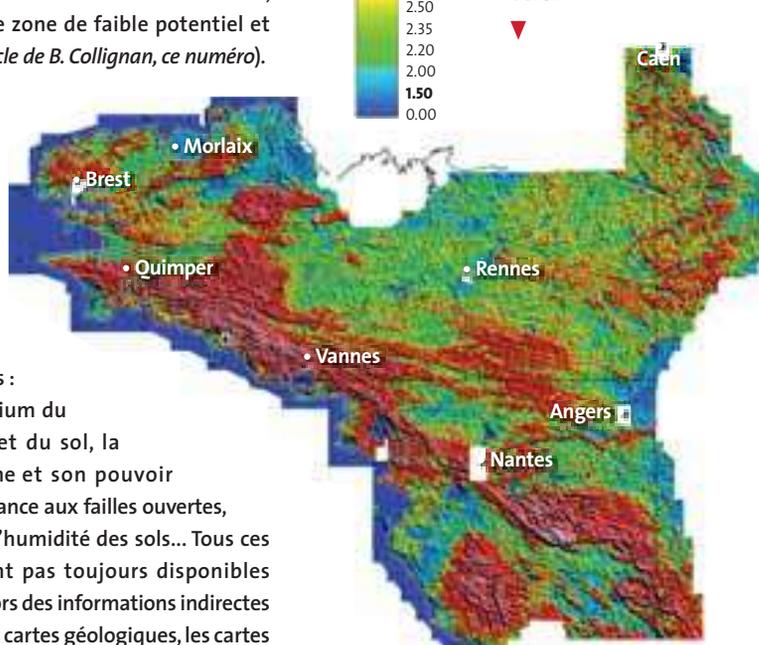
Equ. U (ppm)



**Fig. 3 : Carte aéro-spectrométrique uranium de la Bretagne.**

Fig. 3: Aerspectrometric uranium map of Brittany.

© BRGM





### Cadre réglementaire

Une cartographie de l'exposition au radon dans l'habitat a été dressée par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), avec l'aide des Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS). Cette cartographie est fondée sur plus de 12 000 mesures réalisées dans des logements entre 1990 et 2001 (figure 2).

Cette cartographie a servi de fondement à la définition de 31 départements prioritaires présentés ci-dessous (figure 3).

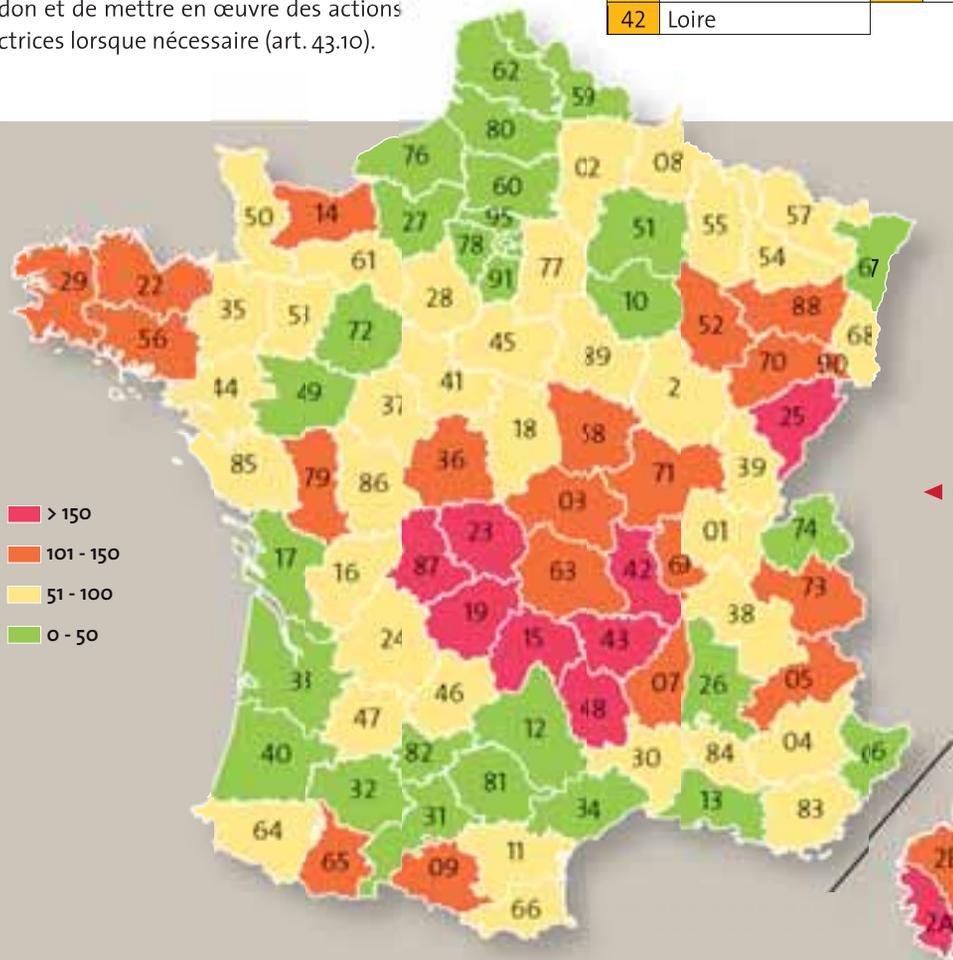
Sur cette base, les pouvoirs publics ont rédigé le décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants. Pour les départements prioritaires mentionnés ci-dessous (figure 3), ce décret donne obligation aux propriétaires de lieux ouverts au public (établissements scolaires, établissements sanitaires et sociaux avec capacité d'hébergement, établissements thermaux, prisons) de réaliser des dépistages de radon et de mettre en œuvre des actions correctrices lorsque nécessaire (art. 43.10).

**Fig. 3 : Liste des 31 départements prioritaires pour la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.**

*Fig.3: List of the 31 prioritized French Departments for overall protection of the public against the dangers of ionizing radiation.*



N°	Département	N°	Département
3	Allier	43	Haute-Loire
5	Hautes-Alpes	48	Lozère
7	Ardèche	52	Haute-Marne
9	Ariège	56	Morbihan
12	Aveyron	58	Nièvre
14	Calvados	63	Puy-de-Dôme
15	Cantal	65	Hautes-Pyrénées
19	Corrèze	69	Rhône
2A	Corse-du-Sud	70	Haute-Saône
2B	Haute-Corse	71	Saône-et-Loire
22	Côtes-d'Armor	73	Savoie
23	Creuse	79	Deux-Sèvres
25	Doubs	87	Haute-Vienne
29	Finistère	88	Vosges
36	Indre	90	Territoire de Belfort
42	Loire		



**Fig. 2 : Moyenne départementale des concentrations de radon dans l'air des habitations.**

*Fig. 2: Mean values of radon concentrations in dwellings per French Department.*

Source : IRSN.

En dessous de 400 Bq/m<sup>3</sup>, la situation ne justifie pas d'action correctrice particulière ; entre 400 et 1 000 Bq/m<sup>3</sup>, il est souhaitable d'entreprendre des actions correctrices simples. Au-delà de 1 000 Bq/m<sup>3</sup>, des actions correctrices, éventuellement d'envergure, doivent être impérativement conduites à bref délai, car on aborde un niveau de risque qui peut être important.

Deux arrêtés d'application complètent ce décret :

► **Arrêté d'application du 15 juillet 2003 relatif aux conditions d'agrément d'organismes habilités à procéder aux mesures d'activité volumique du radon dans les lieux ouverts au public** (J.O. n° 188 du 15 août 2003, page 14103).

Cet arrêté définit deux niveaux d'agrément :

- N1 : pour réaliser le dépistage du radon dans les bâtiments,
- N2 : pour réaliser des mesures de radon complémentaires, en soutien éventuel du diagnostic du bâtiment. Chaque année, les pouvoirs publics publient la liste des organismes agréés par voie d'arrêté.

► **Arrêté du 22 juillet 2004 relatif aux modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public** (J.O. n° 185 du 11 août 2004, page 14359, texte n° 25).

Les dispositions de cet arrêté déterminent les modalités de gestion du risque lié au radon dans les lieux ouverts au public. Cet arrêté est complété par deux avis pris en application de cet arrêté. Le premier (J.O. n° 186 du 12 août 2004, page 14428, texte n° 72) liste les normes de mesure du radon en vigueur. Le deuxième (J.O. n° 44 du 22 février 2005, page 2982, texte n° 116) définit les actions à mettre en œuvre dans les bâtiments pour réduire l'exposition des personnes au radon à un niveau aussi bas que raisonnablement possible, et doit être annexé aux rapports d'intervention des organismes agréés pour la mesure du radon.

Enfin, pour donner suite aux actions proposées dans le cadre du Plan National Santé Environnement (PNSE), adopté par le gouvernement en juin 2004, un plan d'action interministériel et pluriannuel sur la gestion du risque lié au radon a été lancé. Il est animé par la Direction Générale de la Sécurité Nucléaire et de la Radioprotection (DGSNR) et décline les actions à entreprendre pour réduire les expositions au radon dans les bâtiments. Il est organisé autour de trois grands axes :

- mettre en place une nouvelle politique pour la

- gestion du risque lié au radon dans l'habitat et la construction neuve,
- accompagner la mise en œuvre de la nouvelle réglementation concernant les lieux ouverts au public,
- améliorer et diffuser les connaissances sur les expositions et le risque lié au radon.

## La mesure du radon

La concentration en radon (ou activité volumique) dans un bâtiment est très variable dans le temps en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques du bâtiment. Trois types de mesure, codifiés par l'AFNOR, sont à distinguer, selon les caractéristiques du prélèvement d'air :

► **la mesure intégrée**, requise par les circulaires et le décret ministériels relatifs au radon, effectuée sur une période de l'ordre de deux mois en saison de chauffage et en conservant les mêmes habitudes d'utilisation du bâtiment (chauffage, aération), pour donner un résultat représentatif de la valeur moyenne annuelle. C'est cette mesure qui est utilisée pour le dépistage dans les bâtiments **conformément à la norme NF M 60-771**. En pratique, cette mesure s'effectue à l'aide de dosimètres passifs ;

► **la mesure ponctuelle**, effectuée sur un laps de temps très bref, de l'ordre de quelques secondes à une minute maximum, qui fournit une « photographie » de la situation à un moment donné ;

► **la mesure en continu**, permettant de suivre l'évolution de la concentration en fonction du temps.

Pour toute mesure de radon dans l'environnement ou dans une atmosphère confinée, il est nécessaire de préciser la durée et la date du prélèvement. En effet, l'activité du radon présentant une très grande variabilité dans le temps, les résultats obtenus sont très différents selon la durée du prélèvement (quelques minutes, quelques heures ou plusieurs mois) et ils ne sont pas comparables.

*“ La concentration en radon dans un bâtiment est très variable dans le temps en fonction des conditions environnementales et des caractéristiques du bâtiment. ”*



À l'intérieur d'un bâtiment, le choix de l'implantation et le nombre de points de prélèvement dépendent de l'objectif de la mesure (dépistage, recherche de sources, étude de transfert, vérification de l'homogénéité du paramètre mesuré dans un environnement ou recherche d'anomalies, exposition de l'homme, etc.), des caractéristiques architecturales du bâtiment (vide sanitaire, sous-sol, étage, terre battue, matériau de construction, etc.), des caractéristiques de la pièce et également du type d'appareil de mesure utilisé (voir norme NF M 60-771).

Il existe également des méthodes de mesure pour caractériser la quantité de radon arrivant à l'interface sol-atmosphère, soit le flux d'exhalation du radon.

### Se protéger du radon dans les bâtiments

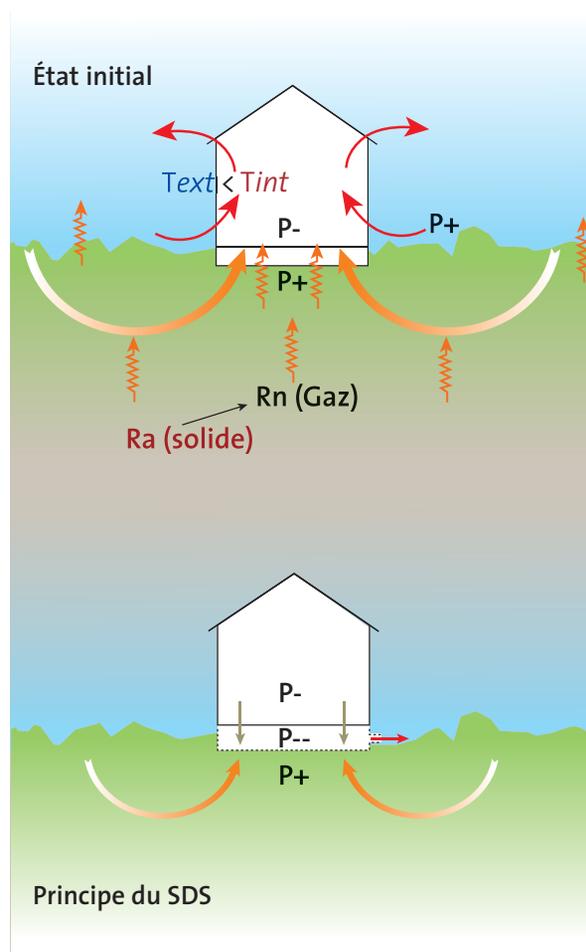
Les principes des techniques visant à diminuer la présence de radon dans les bâtiments consistent d'une part à diluer la concentration en radon dans le volume habité, et d'autre part à empêcher le radon venant du sol d'y pénétrer.

En pratique, on observe de nombreuses variantes techniques faisant appel à ces deux principes conjugués. De façon générique, on peut distinguer trois familles de techniques.

En premier lieu, il est indispensable d'assurer la meilleure étanchéité à l'air possible entre le bâtiment et son sous-sol. Si les techniques d'étanchement ne sont pas toujours suffisantes pour réduire efficacement les concentrations en radon dans un bâtiment (identification incomplète des points d'entrée, problèmes de mise en œuvre, efficacité au cours du temps), elles constituent cependant un préalable essentiel à l'efficacité d'autres solutions pouvant être mises en œuvre en parallèle.

Une deuxième famille de solutions consiste à diluer le radon présent dans le bâtiment en augmentant le renouvellement d'air de ce dernier. L'efficacité de cette solution est cependant assez faible car on ne peut pas augmenter le renouvellement d'air d'un bâtiment inconsidérément sans tenir compte des contraintes énergétiques et de confort thermique.

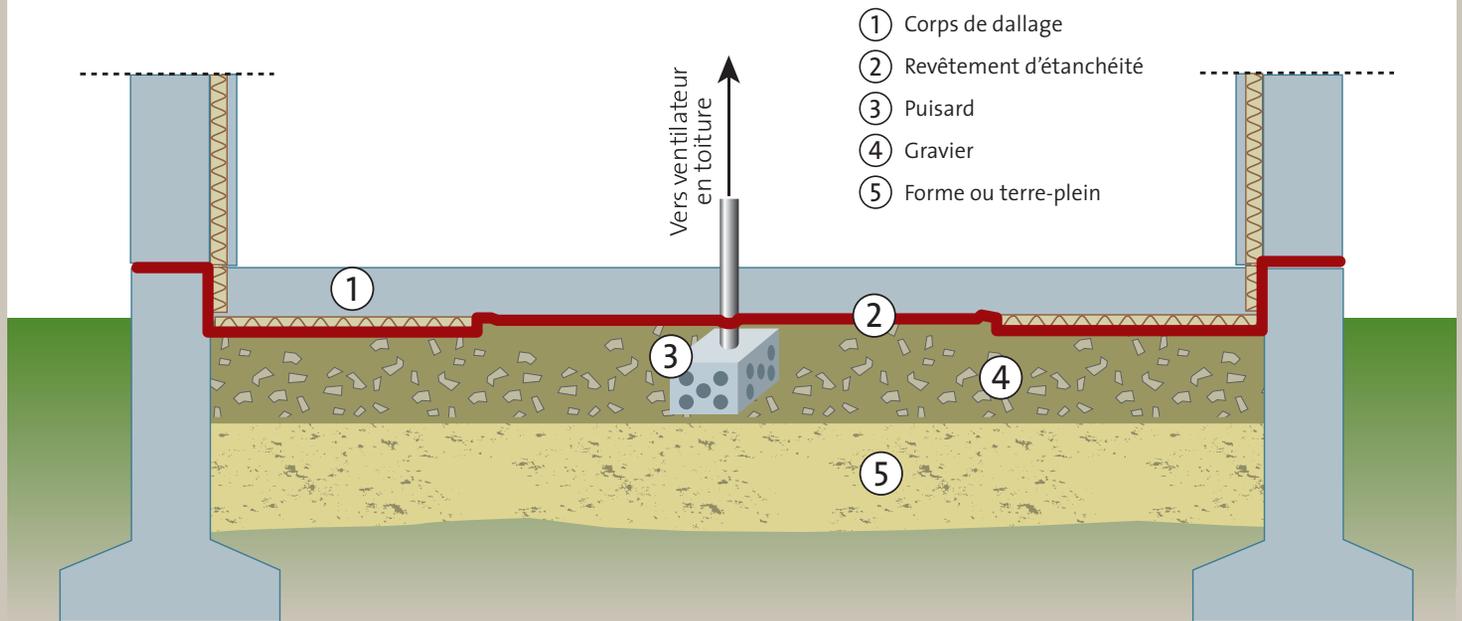
Enfin, la troisième famille de techniques consiste à traiter le soubassement (vide sanitaire, cave, dallage



sur terre-plein). Ce traitement peut être effectué par aération naturelle ou par ventilation mécanique. Cependant, le principe de réduction de l'entrée du radon dans les bâtiments le plus efficace repose sur le Système de Dépressurisation des sols (SDS). En effet, l'objectif de cette dernière technique consiste à générer un champ de pression dans le soubassement inférieur à celui régnant au niveau du sol du bâtiment, à un débit le plus faible possible. Pour cela, l'air du

*“ Les principes des techniques visant à diminuer la présence de radon dans les bâtiments consistent d'une part à diluer la concentration en radon dans le volume habité, et d'autre part à empêcher le radon venant du sol d'y pénétrer. ”*

## Principe de mise en œuvre dans le cas d'un dallage indépendant sur terre-plein



▲ **Fig. 4 : Principe du Système de Dépressurisation des Sols.**  
 Fig. 4: The soil depressurization system principle.

Source : CSTB.

soubassement est extrait mécaniquement vers l'environnement extérieur où le radon se dilue rapidement. On empêche ainsi les mouvements convectifs de l'air contenu dans la porosité du sol et chargé en radon vers le bâtiment (figure 4).

L'adaptation de ces techniques à la construction neuve présente l'avantage de les intégrer dès la conception du bâtiment. Leur efficacité sera donc améliorée et le coût marginal. Dans les bâtiments existants, les moyens à mettre en œuvre pour lutter contre la

présence de radon dans l'air intérieur sont à considérer en fonction des niveaux de concentration moyenne annuelle mesurés dans le bâtiment et des caractéristiques de ce dernier. Pour cela, un diagnostic du bâtiment doit être effectué. Selon les cas typologiques rencontrés et les niveaux initiaux de concentration, les mesures correctrices peuvent être réalisées de façon itérative afin de minimiser l'investissement fait pour lutter contre ce problème. ■

## ► EXPOSITION AU RADON ET RISQUE DE CANCER DU POUMON : BILAN À PARTIR DES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

### EXPOSURE TO RADON AND LUNG CANCER RISK: CONCLUSIONS DRAWN FROM EPIDEMIOLOGICAL STUDIES



**Margot Tirmarche**

CHEF DU LABORATOIRE  
D'ÉPIDÉMIOLOGIE  
DIRECTION DE LA  
RADIOPROTECTION DE L'HOMME  
INSTITUT DE RADIOPROTECTION  
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (IRSN)  
margot.tirmarche@irsn.fr

28

De nombreuses études épidémiologiques ont été mises en place à travers le monde dans le but de quantifier le risque de cancer associé à l'inhalation du radon. Dès 1988, l'OMS a classé le radon comme cancérigène pulmonaire certain chez l'homme. La plupart des données alors disponibles provenaient d'études animales ou d'études épidémiologiques menées en milieu professionnel, notamment sur

“*Le risque de cancer du poumon augmente proportionnellement à la quantité de radon (et de ses descendants radioactifs) inhalé, notamment durant les 25 années précédant la maladie.*”

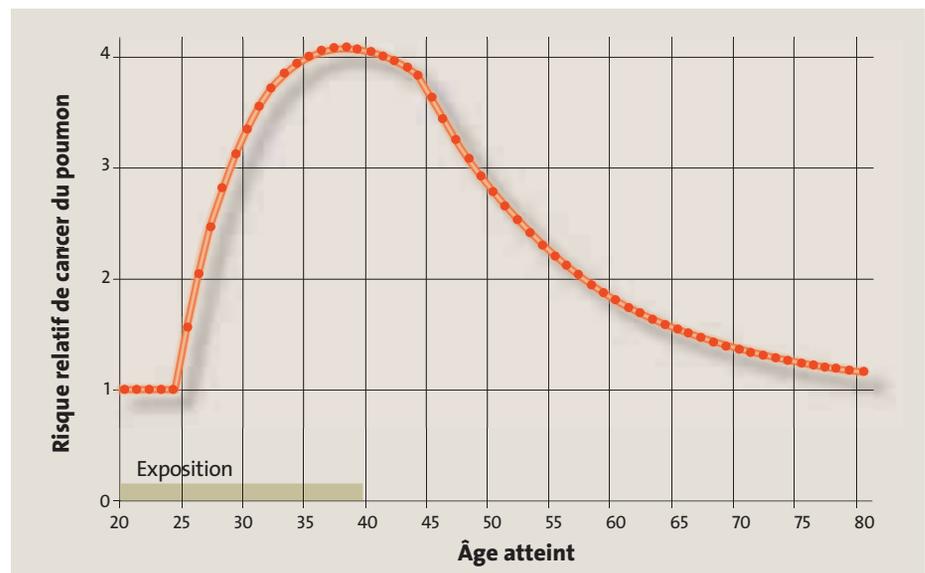
les mineurs de fond exposés dans le passé à des expositions relativement élevées. Aujourd'hui, il est à noter que peu de polluants de l'habitat ont été étudiés de façon aussi détaillée que le radon.

Du fait du caractère ubiquitaire du radon, la question de l'extrapolation des risques des fortes expositions (rencontrées généralement dans les mines) aux faibles expositions (rencontrées dans les habitations) s'est très vite posée. C'est notamment pour y répondre que plusieurs études épidémiologiques ont été réalisées en Europe, en Amérique du Nord et en Chine. En France, le laboratoire d'épidémiologie de l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire a mené une telle étude sur plusieurs années, en étroite collaboration avec les services hospitaliers des Ardennes, de Bretagne, du Massif central et du Languedoc-Roussillon. Ces études de terrain ont permis de quantifier la relation exposition-réponse à partir de données recueillies en population générale. De nombreuses informations individuelles ont ainsi été collectées notamment sur la consommation tabagique et sur les expositions professionnelles susceptibles d'intervenir comme cofacteurs dans le développement du cancer du poumon. Les mesures de radon ont été réalisées dans les différentes habitations occupées durant

les trente dernières années, en accord avec les occupants actuels de ces maisons. Le principal apport de ces études est d'avoir mis en évidence la persistance du risque de décès par cancer du poumon dans le domaine des faibles niveaux d'exposition rencontrés dans les habitations. L'étude a démontré que le risque de cancer du poumon augmente proportionnellement à la quantité de radon (et de ses descendants radioactifs) inhalé, notamment durant les 25 années précédant la maladie. Ce résultat persiste après avoir ajusté sur la consommation tabagique et les autres expositions professionnelles potentiellement cancérigènes. Le risque lié à l'inhalation du radon est faible comparativement à celui du tabac, mais il a pu être mis en évidence à la fois chez les

non-fumeurs et chez les fumeurs ou ex-fumeurs. Se pose aujourd'hui la question de la quantification d'une interaction entre la consommation tabagique et l'exposition au radon durant le développement d'un cancer du poumon. Une telle interaction a été suggérée par les études prospectives réalisées sur des mineurs. L'IRSN continue actuellement le suivi des mineurs d'uranium en France, en collaboration avec la médecine du travail d'Areva NC. Les études en milieu professionnel nous renseignent notamment sur l'évolution du risque en fonction du temps écoulé depuis l'exposition ainsi que sur l'influence de l'âge à l'exposition. Les études sur les mineurs ont ainsi montré que le risque diminue avec le délai depuis l'exposition.

Cet argument est important dans l'éducation de la gestion de ce risque. Plus on intervient tôt pour diminuer la concentration de radon dans un habitat, plus le risque imputable à cette exposition passée diminue (figure 1).



▲ **Fig. 1 : Scénario réalisé d'après les résultats du suivi des mineurs d'uranium ; études menées dans le cadre des 5<sup>ème</sup> et 6<sup>ème</sup> PCRD (programme de recherche européen « alpha-risk »). Il s'agit du cas d'un mineur exposé à partir de l'âge de 20 ans à 2 WLM (unité d'exposition « mine » équivalente à 460 Bq par m<sup>3</sup> dans l'habitat) par an pendant 20 ans. Le risque commence à augmenter après un temps de latence de 5 ans, atteint un maximum à l'âge de 40 ans, puis commence à diminuer au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la période d'exposition.**

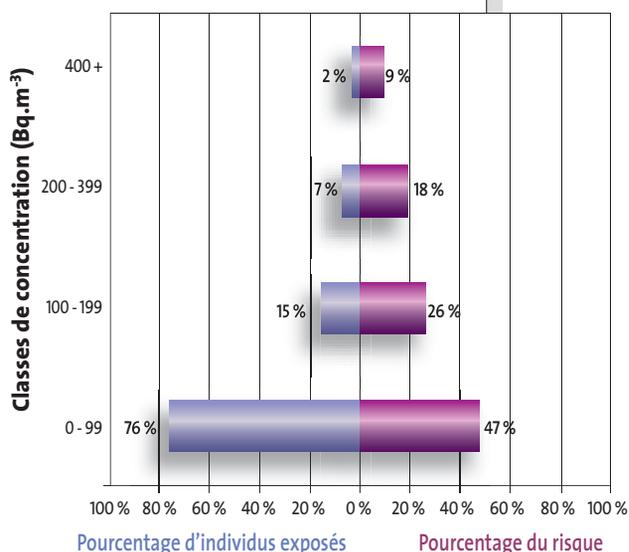
Fig. 1: A scenario based on results of the follow-up of uranium miners; the studies were conducted as part of the EU's 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> Framework R&D Programmes (the European "alpha-risk" research programme). Here is considered a miner exposed each year to 2 WLM (the unit of exposure used in mining, equivalent to 460 Bq per cu. m in dwellings) over a 20-year period. The risk begins to increase after a five-year latency interval, peaking at age 40, and subsequently decreasing as the distance from the exposure period increases.

L'ensemble des résultats de ces études épidémiologiques apporte donc des éléments complémentaires qui peuvent être utilisés dans le cadre d'une évaluation du risque lié à l'exposition domestique au radon en France. Une thèse de doctorat, réalisée récemment au laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN, a étudié la méthodologie et les incertitudes liées à cette évaluation. Il en ressort qu'entre 5 et 13 % des décès par cancer du poumon en France seraient attribuables à l'exposition domestique au radon (figure 2).

Tous ces résultats devraient sensibiliser les personnes vivant actuellement dans des habitations à concentration élevée de radon. En effet, bien qu'il ne soit pas possible de supprimer tout le radon de nos habitations, des techniques simples à mettre en œuvre existent pour fortement diminuer les niveaux de concentration. Une ventilation adaptée à chaque situation est le meilleur moyen pour agir sur cette concentration dans l'air de nos habitations.

En conclusion, nous considérons que l'ensemble des études épidémiologiques et expérimentales menées durant ces vingt dernières années ont permis de mieux comprendre comment le radon et ses descendants peuvent interagir avec d'autres polluants au niveau pulmonaire. L'interaction entre le radon et le tabac semble être bien plus qu'une simple addition des deux risques considérés séparément. Un important projet de recherche, appelé « alpha-risk », coordonné par le laboratoire d'épidémiologie de l'IRSN, est actuellement en cours au niveau européen. Il vise notamment à mieux comprendre comment interagissent ces deux facteurs cancérogènes et à établir un consensus scientifique international pour une meilleure politique de gestion de ce risque (voir site <http://www.alpha-risk.org>).

**Bibliographie récente :** O. Catelinois, A. Rogel *et al.* (2006) – Lung cancer attributable to indoor radon exposure in France: impact of the risk models and uncertainty analysis. *Environ. Health Perspect.*, 114(9): 1361-6. R.W. Field, D. Krewski *et al.* (2006) – An overview of the North American residential radon and lung cancer case-control studies. *J. Toxicol. Environ. Health, A* 69(7): 599-631. D. Krewski, J.H. Lubin *et al.* (2006) – A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer. *J. Toxicol. Environ. Health, A* 69(7): 533-97. S. Darby, D. Hill *et al.* – Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7,148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe. *Scan J. Work. Environ. Health*, 32, suppl.1: 1-84. S. Darby, D. Hill *et al.* (2005) – Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ* 330(7485): 223. H. Baysson, M. Tirmarche *et al.* (2005) – Indoor radon exposure and lung cancer risk. Results of an epidemiological study carried out in France. *Rev. Mal. Respir.*, 22(4): 587-94.



**Fig. 2 : Evaluation du risque de décès par cancer du poumon associé à l'exposition au radon en France.**  
 • Sur 25 134 décès par cancer du poumon en France (Inserm, 1999), entre 4,9 % (II à 90 % : 2,4 – 8,6) et 13,3 % (II à 90 % : 12,1 – 14,6) pourraient être attribuables à l'exposition au radon dans l'habitat, sans pour autant en être la cause unique.

- 27 % des décès attribuables au radon seraient dus à des concentrations > 200 Bq.m<sup>-3</sup>.
- Si l'on prend en compte l'interaction tabac-radon et le pourcentage de fumeurs en France :
  - 75 % des cas attribuables au radon seraient des fumeurs.
  - 25 % des cas attribuables au radon seraient des non-fumeurs.

(II = intervalle d'incertitude autour des coefficients de risque et de la variabilité du radon)

Source : Thèse doctorat O. Catelinois, Environ. Health Perspect. 114(9): 1361-6, 2006.

**Fig. 2: Assessment of lung-cancer mortality risk in France related to exposure to domestic radon.**

- Out of 25,134 deaths from lung cancer in France (Inserm, 1999), between 4.9% (II at 90%: 2.4–8.6) and 13.3% (II at 90%: 12.1–14.6) might be ascribed to exposure to radon in the home, without necessarily being the sole cause.
- 27% of deaths ascribable to radon would apparently involve concentrations in excess of 200 Bq.m<sup>-3</sup>.
- If we factor in the interaction between tobacco and radon and the percentage of smokers in France:
  - 75% of the cases ascribable to radon would be smokers.
  - 25% of the cases ascribable to radon would be non-smokers.

(II = the uncertainty interval concerning the risk coefficients and variability of radon)

Source : Doctoral thesis O. Catelinois, Environ. Health Perspect. 114(9): 1361-6, 2006.



## Radon in buildings

Radon, a radioactive gas given off mainly by the ground, may occur at higher concentrations inside buildings than outdoors due to a confinement effect. The health risks linked to radon exposure are now identified. Awareness of the problem has only emerged relatively recently in France.

A preliminary regulatory framework has been drawn up for sites open to the public (i.e. schools, health-care and social institutions with accommodation facilities, hydropathic establishments and prisons) in 31 French Departments considered high priority, and work is in progress in the framework of an interministerial consultation programme to define an approach for new buildings and for existing housing. Radon measurement in buildings initially relies on passive dosimeters that ensure detection in the building. This approach is standardized. A range of radon-mitigation techniques exists that may be matched with the structure's type and use. Adapting these techniques to new structures has the advantage of integrating them from the design stage on. This will improve effectiveness at marginal cost. In existing buildings, the means that should be implemented to combat the presence of radon in the inside air should be considered on the basis of mean annual concentration levels measured in the building and of this latter's characteristics.



L'amiante minéral naturel, classé cancérigène et interdit depuis 1997, reste encore présent dans de nombreux bâtiments et dans les milieux industriels. Les expositions potentielles sont surveillées pour protéger la population et les professionnels susceptibles d'être exposés. Cependant il existe sur le territoire français des affleurements naturels d'amiante qui ne font l'objet d'aucune réglementation et de contrôles, et qui peuvent être une source non négligeable d'exposition de la population générale.

Faisceaux de fibres d'amiante observés sur l'affleurement de Lanslebourg (Savoie).  
Asbestos fibre bundles observed at the Lanslebourg outcrop (Savoie Department).

© LEPI 2006



# L'amiante dans l'environnement en France : de l'exposition au risque



**Marie-Annick Billon-Galland**

CHEF DE SERVICE  
LABORATOIRE D'ÉTUDE DES PARTICULES INHALÉES (LEPI), SPÉCIALISÉ DANS L'ÉTUDE DES FIBRES D'AMIANTE DANS LES MATÉRIAUX, DANS L'AIR (ENVIRONNEMENT GÉNÉRAL, LIEUX DE TRAVAIL) ET DANS LES MILIEUX BIOLOGIQUES  
DÉPARTEMENT DE PARIS  
marie-annick.billon-galland@paris.fr

**Laurent Martinon**

INGÉNIEUR HYGIÉNISTE  
LABORATOIRE D'ÉTUDE DES PARTICULES INHALÉES (LEPI)  
Laurent.martinon@paris.fr

**Mathilde Pascal**

INGÉNIEUR AU DÉPARTEMENT SANTÉ ENVIRONNEMENT  
INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE (INVS)  
m.pascal@invs.sante.fr

**Côme Daniau**

ÉPIDÉMIOLOGISTE AU DÉPARTEMENT SANTÉ ENVIRONNEMENT  
INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE (INVS)  
c.daniau@invs.sante.fr

## Problématique de l'amiante

Les dangers de l'amiante sont maintenant bien connus et le lien entre une exposition à l'amiante et l'apparition de certaines maladies (plaques pleurales, cancers broncho-pulmonaires, mésothéliomes) est largement démontré. Le CIRC (Centre International de Recherche sur le Cancer) a classé l'amiante comme cancérigène certain chez l'homme depuis 1977 et il est avéré qu'il est responsable d'une véritable pandémie de mésothéliomes dans les pays industrialisés.

Le terme d'amiante (ou asbeste) désigne plusieurs variétés naturelles de silicates fibreux qui ont un faciès asbestiforme et est réservé aux variétés ayant fait l'objet d'un intérêt commercial particulier. La réglementation retient six espèces minérales qui sont le chrysotile (ou amiante blanc), la crocidolite (ou amiante bleu), l'amosite (ou amiante brun), la trémolite, l'actinolite (ou actinote) et l'anthophyllite. Le chrysotile appartient au groupe minéralogique des serpentines, les autres espèces au groupe des amphiboles.

La plupart des serpentines résultent de l'altération hydrothermale de roches ultrabasiqes et les amphiboles, largement représentées dans les assemblages minéralogiques naturels, cristallisent dans beaucoup de roches magmatiques et métamorphiques.

“  
Le terme d'amiante (ou asbeste)  
désigne plusieurs variétés  
naturelles de silicates fibreux  
qui ont un faciès asbestiforme  
et est réservé aux variétés  
ayant fait l'objet d'un intérêt  
commercial particulier.”

L'amiante a été largement utilisé dans les immeubles bâtis du fait entre autres de ses grandes qualités d'isolation, et ce jusqu'à son interdiction le 1<sup>er</sup> janvier 1997 en France (décret n° 96-1133 du 24 décembre 1996) et le 1<sup>er</sup> janvier 2005 dans l'Union européenne.

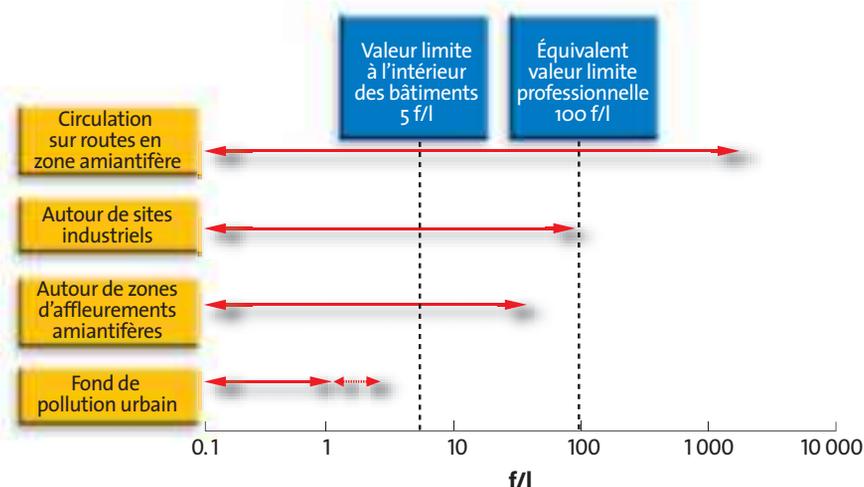
Depuis les décrets n° 96-97 et n° 96-98 du 7 février 1996 repris respectivement dans le code de la santé publique (décret n° 2003-462 du 23 mai 2003) et le code du travail (décret en conseil d'État n° 2006-761 du 30 juin 2006), une attention accrue a été portée sur la prévention de l'exposition aux fibres d'amiante pour la population générale dans les immeubles avec des matériaux ou produits contenant de l'amiante, pour les personnels spécialisés dans les activités de confinement et de retrait de l'amiante ainsi que pour les personnels de maintenance et d'entretien intervenant sur des matériaux ou appareils susceptibles d'émettre des fibres d'amiante. Depuis juin 2006, la réglementation a été étendue au personnel impliqué dans les opérations de génie civil effectuées sur des terrains amiantifères. Antérieurement, la prévention était surtout focalisée sur l'exposition professionnelle sur les sites de production minière ou liée aux activités de fabrication et de transformation de matériaux contenant de l'amiante. En fait, l'exploitation de gisements d'amiante ne concerne plus le territoire français depuis la fermeture des mines de Canari en Corse (1965) et de Termignon en Savoie (1977). De même, les usines de transformation ont fermé depuis l'interdiction de l'amiante en 1997.

Dans le milieu naturel, les affleurements de roches amiantifères conduisent également à des risques d'exposition lors de travaux d'aménagement, de génie civil, de circulation de véhicules, et à un degré moindre par le réenvol de particules fines provoqué par toute activité ou par érosion naturelle.

En France métropolitaine, les sources potentielles d'exposition des populations à l'amiante strictement environnemental sont multiples. Ces sources sont constituées soit d'anciens sites industriels, soit de sites naturels d'affleurement de roches amiantifères.

Or, aujourd'hui, pour protéger la population générale d'une exposition à l'amiante environnemental, seuls les bâtiments font l'objet d'une réglementation, la valeur à ne pas dépasser à l'intérieur des locaux étant fixée à 5 fibres d'amiante par litre d'air (f/l) pour les fibres de plus de 5 micromètres de longueur (code de la santé publique, décret n° 2003-462 du 23 mai 2003).

Les niveaux de pollution par les fibres d'amiante qu'il est possible de rencontrer dans différentes situations sont synthétisés dans la figure 1.



## Amiante environnemental

### Affleurements naturels de roches amiantifères

En dehors des exploitations minières d'amiante, les affleurements naturels de roches susceptibles de contenir de l'amiante sont présents dans plusieurs régions du monde. Ces roches amiantifères peuvent conduire à l'émission de fibres d'amiante dans l'air sous l'effet de certains processus naturels comme l'érosion éolienne, les intempéries, le ruissellement ou les feux de végétations. Ces phénomènes peuvent être renforcés par des activités humaines susceptibles de générer une pollution de l'environnement lors de chantiers de travaux publics et du bâtiment menés dans ces terrains amiantifères, de terrassements

▲  
**Fig. 1 : Niveaux potentiels d'exposition aux fibres d'amiante mesurés en France dans différents environnements.**  
*Fig. 1: Potential levels of exposure to asbestos fibres in France in various environments.*



divers, de tracés ou d'élargissements de routes, de chantiers de construction, carrières, etc. L'agriculture et l'élevage ou encore la circulation sur des pistes non goudronnées peuvent également provoquer ponctuellement des expositions élevées.

L'EPA (Environmental Protection Agency) a réalisé en Californie à El Dorado Hills, où le sol contient de l'amiante (chrysotile et amphibole trémolite/actinolite), des mesures dans l'air en s'intéressant plus particulièrement aux activités génératrices de poussières comme certaines activités sportives. Les résultats montrent que la perturbation mécanique de nature anthropique d'un sol contenant des niveaux faibles d'amiante, peut conduire à une exposition importante [U.S. EPA (2005)]. Ces données sont cohérentes avec les résultats d'une étude de l'IOM (Institut of Medicine) conduite en 1988 au Royaume-Uni [Addison *et al.* (1988)] qui montraient des expositions importantes aux fibres obtenues en perturbant un sol contenant des teneurs très faibles en amiante (0,001 %).

Dans d'autres régions du monde comme la Grèce, Chypre ou la Turquie, des cas d'exposition à l'amiante environnemental sont souvent associés à une utilisation locale de produits amiantés [INSERM (1997)], et on y enregistre des excès de pathologies de type plaques pleurales ou mésothéliomes. En Nouvelle-Calédonie, la présence de fibres de trémolite dans le sol et l'air, suite à l'utilisation d'enduits muraux dénommés *Pô* à base de fibres de trémolite (*photo 1*) conduit à des expositions importantes des populations [Luce *et al.* (1994)].



**Photo 1 : Badigeon au Pô du mur d'une maison en Nouvelle-Calédonie.**

*Photo 1: Daubing a house wall in New Caledonia with "Pô".*

© LEPI 2006

En Bulgarie, des excès de plaques pleurales ont été enregistrés chez des agriculteurs travaillant sur des sols amiantés [Burilkov and Michailova (1970)].

#### Sites industriels pollués

Les contaminations de l'environnement provoquées par l'exploitation de certaines mines d'amiante sont maintenant reconnues. Aujourd'hui, les principaux pays producteurs sont la Russie, la Chine, le Kazakhstan, le Canada, le Brésil et le Zimbabwe, et par le passé, l'Italie, la Finlande, l'Afrique du Sud et l'Australie. En France, la mine d'amiante la plus importante, en activité de 1927 à 1965, était celle de Canari en Corse.

“ Dans le milieu naturel, les affleurements de roches amiantifères conduisent également à des risques d'exposition. ”

### ► UN AUTRE POLLUANT MINÉRAL : LA SILICE ASPECT RÉGLEMENTAIRE

Hubert Haas BRGM – h.haas@brgm.fr

Les poussières de silice cristalline libre sont à l'origine d'une affection pulmonaire irréversible connue dès l'Antiquité : la silicose. Cette pneumoconiose est définie comme maladie professionnelle dès 1916 ; elle est officiellement reconnue en France en 1945 (tableau 25 des maladies professionnelles).

Les minéraux siliceux concernés par la réglementation sont le quartz (décret 94-784 et 97-331), la tridymite et la cristobalite (décret 97-331). Le quartz est l'un des minéraux les plus abondants de la croûte terrestre.

L'action des pouvoirs publics et des professionnels dans tous les domaines d'activité en contact avec de la poussière susceptible de contenir de la silice cristalline a conduit à la mise en place d'une réglementation pour la prévention des risques liés aux poussières siliceuses :

- le décret n° 94-784 du 2 septembre 1994 complétant le règlement général des industries extractives institué par le décret n° 80-331 du 7 mai 1980 modifié ;
- le décret n° 97-331 du 10 avril 1997 relatif à la protection de certains travailleurs exposés à l'inhalation de poussières siliceuses sur leurs lieux de travail.

Des campagnes de prélèvement de poussières atmosphériques doivent être réalisées périodiquement afin d'évaluer quantitativement et qualitativement la présence de poussières siliceuses sur les lieux de travail. Ces campagnes peuvent être effectuées en autocontrôle dans le cadre du décret 94-784 ou par un organisme agréé dans le cadre du décret 97-331.

Dans les deux cas, seuls les laboratoires ayant reçu l'agrément ministériel sont habilités à effectuer les analyses minéralogiques permettant l'identification des minéraux siliceux présents dans les poussières et leur quantification. La liste des organismes agréés pour le prélèvement et/ou l'analyse est publiée chaque année au Journal Officiel. ■

*Le BRGM est agréé pour les prélèvements et les analyses dans le cadre des deux décrets.*



## ► CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA AMIANTE

Didier Lahondère BRGM – d.lahondere@brgm.fr

En Haute-Corse, des roches potentiellement amiantifères sont connues à l'affleurement dans 133 des 236 communes que compte le département [BRGM (1997)]. Seules quelques communes ont été concernées par les campagnes de mesure des teneurs en fibre d'amiante réalisées depuis 2001, dont celle de Murato qui pour beaucoup est très représentative des risques sanitaires encourus par une population soumise à une exposition « naturelle » à l'amiante.

Les travaux entrepris sur la commune de Murato par le BRGM ont pour objectifs de localiser les principales zones contenant des fibres d'amiante et de déterminer les processus susceptibles de favoriser l'envol de ces fibres dans l'air. Plusieurs zones amiantifères ont ainsi été cartographiées, localisées dans et à la périphérie de l'agglomération de Murato. Elles correspondent soit à des affleurements naturels, soit à des affleurements dont l'existence est directement liée à l'activité humaine (carrières, talus, remblais). Ces affleurements concernent des péridotites plus ou moins serpentinisées ainsi que des métasédiments en contact tectonique avec ces péridotites. Les analyses (M.O.L.P.<sup>(1)</sup>, M.E.B.<sup>(2)</sup>) effectuées à partir d'une sélection d'échantillons suspectés d'être amiantifères révèlent la présence de chrysotile, souvent associé à de la trémolite fibreuse et plus rarement à des fibres d'anthophyllite.

Les roches amiantifères identifiées sur la commune de Murato ont un potentiel naturel à libérer des fibres sous l'effet de processus érosifs d'origine climatique (vent, ruissellement). Ce potentiel est nul dès lors que ces faciès



amiantifères sont recouverts par une formation superficielle suffisamment épaisse et continue pour constituer un écran (terre végétale, colluvions non polluées, etc.). Ce potentiel augmente cependant considérablement à partir du moment où ces roches amiantifères, préalablement masquées et donc protégées, sont mises à l'affleurement et soumises à leur tour aux aléas climatiques. La détérioration ou la destruction, même partielle, de ces formations superficielles constitue un paramètre déterminant dans le processus qui conduit à l'émission de fibres d'amiante dans l'air. Les observations réalisées en Haute-Corse montrent que ces détériorations sont presque toujours d'origine humaine (ouverture de carrières, création de nouvelles voies de circulation, élargissement d'anciennes chaussées, déforestation, feux de maquis, etc.). Ces perturbations du milieu naturel, longtemps négligeables, se sont accrues au cours du XX<sup>e</sup> siècle avec le développement des moyens mécaniques et l'extension des trames urbaines. En Haute-Corse, de telles perturbations sont à l'origine des pollutions observées aujourd'hui dans plusieurs agglomérations. ■

### ◄ Veine de trémolite asbestiforme recoupant des péridotites serpentinisées (secteur de Murato, Haute-Corse).

*An asbestiform tremolite vein transecting serpentized peridotite (in the vicinity of Murato, Haute-Corse Department).*

© D. Lahondère



### ▲ Vue générale de l'ancienne mine d'amiante de Canari (Haute-Corse).

*General view of the abandoned Canari asbestos mine (Haute-Corse Department).*

© D. Lahondère

(1) Microscope optique à lumière polarisée. (2) Microscope électronique à balayage.



Plusieurs études signalent des niveaux importants d'amiante dans l'environnement de sites industriels. Dans les années 80, les mesures effectuées dans l'air de villes minières du Québec montraient des niveaux de fibres d'amiante jusqu'à 1 300 fois supérieurs à ceux mesurés dans des villes éloignées [P. Sébastien (1986)]. En Finlande, il a été montré que l'impact des exploitations minières sur l'empoussièremement était observable à plus de 50 km [Laamanen *et al.* (1965)].

Un risque accru de mésothéliome pleural, associé à une exposition environnementale, a été plusieurs fois mis en évidence chez des personnes habitant ou ayant habité à proximité de mines de crocidolite sans y avoir travaillé, comme en Afrique du Sud ou en Australie [Hansen *et al.* (1998)]. Des conclusions similaires ont été observées à proximité d'une usine d'amiante-ciment en Italie [(Magnani *et al.* (1995)].



Mayenne) ou le Comptoir des Minéraux et Matières premières à Aulnay-sous-Bois (en Seine-Saint-Denis), ou autour d'affleurements de roches amiantifères naturels comme en Haute-Corse (*photo 2*) ou en Nouvelle-Calédonie.

Si la majorité des investigations sur l'exposition à l'amiante provient de situations professionnelles, il existe maintenant des arguments scientifiques assez forts pour considérer comme établie une relation causale entre l'exposition environnementale à l'amiante et le risque de développer une pathologie liée à l'amiante. Plusieurs études épidémiologiques étrangères ont montré un excès de certaines pathologies spécifiques de l'amiante dans des populations pour lesquelles aucune autre exposition, et en particulier professionnelle, n'avait été démontrée [Bourdes *et al.* (2000), Magnani *et al.* (2000)].

À l'exclusion de la Nouvelle-Calédonie correspondant à des expositions particulières [Goldberg *et al.* (1995)], les seules données françaises concernant la situation d'affleurements naturels sont celles provenant de la région nord-est de la Corse. 133 communes sont concernées et des concentrations en fibres d'amiante 5 à 6 fois supérieures au seuil réglementaire ont localement été mesurées tant à l'extérieur qu'à l'intérieur des habitations dans certaines communes comme à Bastia, Bustanico et Murato [DDASS de Haute-Corse (2004)]. De plus, plusieurs études épidémiologiques ont montré qu'il existait un risque d'exposition à l'amiante d'origine environnementale en Corse. En effet, certaines pathologies spécifiques de l'amiante sont apparues en excès dans des populations pour lesquelles aucune exposition de type

▲ **Photo 2 :**  
**Affleurement**  
**d'amiante au bord**  
**d'une route**  
**en Haute-Corse.**

*Photo 2:*  
*Asbestos outcrop*  
*in a roadcut in*  
*the Haute-Corse*  
*Department.*

© LEPI 2006

“  
En France métropolitaine, les sources potentielles d'exposition des populations à l'amiante strictement environnemental sont multiples. Ces sources sont constituées soit d'anciens sites industriels, soit de sites naturels d'affleurement de roches amiantifères.  
”

### Étude du risque sanitaire lié à une exposition environnementale

En France, l'incidence annuelle des mésothéliomes est estimée entre 1 et 2 cas pour 100 000 habitants [INSERM (1997)]. L'inquiétude grandissante des populations conduit à une demande sociale croissante sur les risques liés aux expositions environnementales à l'amiante, et les pouvoirs publics en France sont de plus en plus sollicités au sujet de cette problématique. C'est le cas d'anciens sites d'exploitation ou de transformation de l'amiante comme Andouillé (en

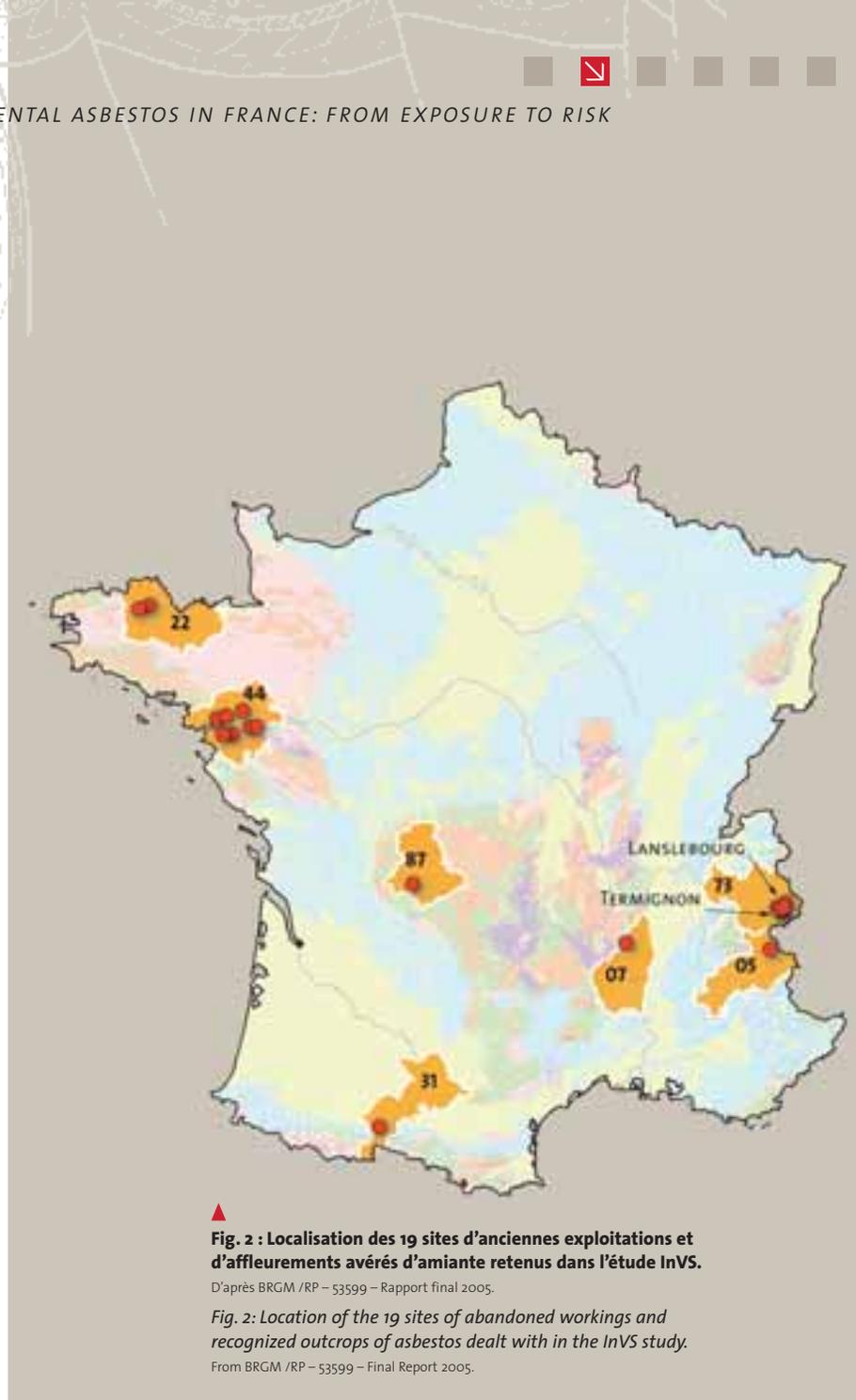
professionnel n'était démontrée. Sur l'échantillon de population étudiée assez faible, la fréquence d'apparition de plaques pleurales était plus de trois fois supérieure en Corse du Nord-Est (région des schistes lustrés) qu'en Corse du Nord-Ouest (région granitique). À Murato, village du Nebbio situé sur l'un des plus grands affleurements de serpentinites de Corse du Nord-Est, 41 % de la population de plus de 50 ans examinée présentaient des plaques pleurales, et plusieurs cas de mésothéliomes malins, tumeurs de la plèvre imputables à l'amiante, ont été enregistrés chez des personnes non exposées professionnellement mais résidant dans cette région [Rey *et al.* (1993)].

Afin de disposer de données plus générales sur la situation en France métropolitaine, l'Institut de Veille Sanitaire (InVS) en collaboration avec le BRGM et le Laboratoire d'Étude des Particules Inhalées (LEPI) a mis en place une étude s'intéressant à l'exposition à l'amiante environnemental des populations habitant à proximité immédiate d'affleurements naturels de roches amiantifères. Ainsi, une démarche basée sur l'évaluation des risques sanitaires a été entreprise. Dans un premier temps, le BRGM a réalisé un recensement des sites naturels amiantifères et des formations géologiques potentiellement amiantifères de France [Dessandier et Spencer (2005)]. En dehors de la Corse qui a été traitée dans une étude spécifique [DDASS de Haute-Corse (2004)], 19 sites, pour lesquels la présence d'amiante est avérée, ont été retenus au terme de ce recensement (figure 2).

Ces sites où une présence d'amiante est avérée à l'affleurement ont fait l'objet d'un diagnostic visant à estimer l'exposition actuelle des populations riveraines. Une démarche en trois étapes a été adoptée pour cette estimation :

1 – Établir la dangerosité du site en déterminant à l'aide de prélèvements de roche la nature des fibres présentes et leur cancérogénicité.

2 – Estimer le potentiel d'exposition de chaque site en s'appuyant sur la description de leurs caractéristiques (degré de friabilité, superficie de l'affleurement, morphologie du site, degré de végétalisation, conditions météorologiques d'altération de la roche), de leur environnement (configuration des abords du site, météorologie locale, humidité du sol et de l'air, présence de cours d'eau) et des populations présentes.



**Fig. 2 : Localisation des 19 sites d'anciennes exploitations et d'affleurements avérés d'amiante retenus dans l'étude InVS.**

D'après BRGM / RP – 53599 – Rapport final 2005.

Fig. 2: Location of the 19 sites of abandoned workings and recognized outcrops of asbestos dealt with in the InVS study.

From BRGM / RP – 53599 – Final Report 2005.

Les comportements des populations riveraines et les activités existantes à proximité du site doivent permettre d'apprécier les modalités de contacts éventuels des hommes avec l'amiante. L'ensemble de ces informations permet de juger qualitativement du niveau d'émission et de dispersion pouvant conduire à un contact avec la population.

3 – Conforter l'approche qualitative de la deuxième étape avec des résultats des mesures dans l'air à l'aplomb des sites et dans des zones résidentielles réalisées par le LEPI afin d'apporter des informations complémentaires à celles obtenues par jugement d'expert, en particulier concernant l'émission et la



## ► LA QUESTION DE L'AMIANTE : UNE CONTRIBUTION PRÉCOCE DU BRGM À LA PRISE EN COMPTE DES ENJEUX SANITAIRES DE LA MINÉRALOGIE

Jacques Varet – BRGM – jvaret@brgm.fr

36



▲ **Juan Goni (1925-1991)**

Adjoint au Directeur du Service Géologique National  
Responsable des laboratoires

La reconnaissance des risques de l'amiante pour la santé a pour l'essentiel eu lieu pendant toute la durée du XX<sup>e</sup> siècle. Les questions ont porté sur l'asbestose, puis sur l'induction de cancers – en particulier les mésothéliomes –, sur l'incidence de l'association avec des polluants atmosphériques comme les HAP ou des métaux toxiques, voire également sur

l'utilisation de l'amiante pour la filtration des liquides alimentaires.

À l'instigation de Claude Guillemin, directeur du Service Géologique National, le BRGM a contribué au développement de ces connaissances. Nombre des travaux menés en France dès le début des années 1970 ont associé le Professeur Jean Bignon du CHU de Créteil et Juan Goni du BRGM. Ils ont souvent mené leurs travaux en liaison avec le CERCHAR, ancêtre en ce domaine de l'INERIS, et avec l'INRS. Tous deux ont notamment contribué au groupe de travail établi par le ministère de la Santé, à l'instigation du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (section de l'hygiène industrielle), chargé de « *procéder à une étude globale des questions que soulève l'amiante fréquemment utilisé dans les bâtiments, en raison de ses propriétés ignifuges et en matière d'isolation acoustique* ». La question posée était celle de la mise en place d'une nouvelle législation pour réglementer les problèmes soulevés par les dangers dus à l'emploi de ce polluant, et la mise en œuvre

de nouvelles mesures préventives. Le BRGM a été impliqué dans ce travail concernant la métrologie (mesure des fibres dans différents milieux) grâce au travail mené parallèlement dans un cadre européen (RFA, Suède, Pays-Bas, UK). Il a également bénéficié de financements du ministère de la Qualité de la Vie pour des recherches sur la pollution particulaire (aciéries, cimenteries, chauffage).

Avec l'hôpital Laennec et les laboratoires de la Préfecture de Paris était constitué en 1976 un groupe spécialisé dans l'étude de l'empoussiérement pulmonaire et des polluants particuliers appelé « *Étude des particules inhalées* », pratiquant « *l'étude qualitative et quantitative des polluants particuliers (minéralogie et physico-chimie des poussières), de leur interaction avec les autres polluants, et l'analyse de leurs effets pathogènes sur l'homme* ». Ce groupe a mis au point une nouvelle technologie pour la détection et l'identification des poussières dans les poumons humains, les expectorations et autres milieux biologiques, à l'échelle microscopique et ultramicroscopique. Ces méthodes ont permis de pratiquer une étude prospective sur la fréquence des fibres, et particulièrement de l'asbeste, dans les poumons des citoyens afin d'établir des corrélations avec la profession, l'habitat, l'âge, et d'en tirer des conclusions épidémiologiques.

L'OMS a reconnu l'amiante comme cancérigène en 1977, et l'Union européenne le classait comme polluant de première catégorie dans l'air et dans l'eau dès 1976 (J.O. du 13-12-1976). En France, un décret du 25-11-1976 (J.O. du 02-12-1976) fixait les modalités d'application à la silicose, à l'asbestose et à la sidérose professionnelles du code de la Sécurité sociale. L'usage de l'amiante est interdit en France depuis 1997, et dans l'Union Européenne depuis 2005. ■

# CAPTAGE ET STOCKAGE GÉOLOGIQUE DU CO<sub>2</sub>



planète terre  
Centre national français

Organisé par



Sous le haut patronage du  
ministère de l'Écologie et du Développement durable  
ministère délégué à l'Industrie  
ministère délégué à la Recherche\*

\* en attente de confirmation

Avec le soutien de  
l'Agence internationale de l'énergie

Partenariats médias



PointCarbon

PARIS

HÔTEL "LE MÉRIDIEN ÉTOILE"

4-5  
OCTOBRE  
2007

## INNOVATION, ENJEUX INDUSTRIELS ET RÉALISATIONS

- ▶ Enjeux et stratégie pour la limitation des émissions de gaz à effet de serre
- ▶ Réalisations industrielles de captage et de stockage de CO<sub>2</sub>
- ▶ Prospective : positionnement des industriels et ruptures technologiques
- ▶ Structuration d'une filière CO<sub>2</sub> : marché, réglementation et perception sociale

▶ Pour tout renseignement complémentaire, contacter

IFP - 1 et 4, avenue de Bois-Préau  
92852 Rueil-Malmaison Cedex - France  
patricia.fulgoni@ifp.fr  
Fax : +33 1 47 52 70 96

▶ [www.colloqueCO2.com](http://www.colloqueCO2.com)



◀ **Photo 3 : Vue de la carrière de la Girarde à Termignon (Savoie) – Roche serpentine contenant des fibres d'amiante chrysotile et amphibole trémolite.**

*Photo 3: View of the La Girarde quarry in Termignon (Savoie Department) – Serpentine rock containing chrysotile asbestos and tremolite amphibole fibres.*

© LEPI 2006

“ Des mesures de préconisations générales pour éviter les expositions environnementales à l'amiante des populations riveraines d'anciens sites industriels ou de sites naturels sont nécessaires. ”

dispersion de fibres d'amiante en provenance des sites. Deux sites en Savoie ont été sélectionnés à Termignon (*photo 3*) et Lanslebourg en raison de l'importance en terme de superficie des affleurements contenant du chrysotile et de la trémolite, et de leur proximité aux habitations. Les analyses des échantillons prélevés (roches et air) seront réalisées au microscope électronique à transmission analytique permettant d'identifier les fibres d'amiante suivant leurs critères morphologiques, cristallographiques et chimiques (*photo 4*).



◀ **Photo 4 : Fibres d'amiante amphibole trémolite au microscope électronique à transmission (X 1500) dans un échantillon de roche provenant de l'affleurement de Lanslebourg (Savoie).**

*Photo 4: Tremolite amphibole asbestos fibres under a transmission electron microscope (x 1500) in a rock sample from the Lanslebourg outcrop (Savoie Department).*

© LEPI 2006



### Environmental asbestos in France: from exposure to risk

Asbestos is a naturally occurring fibrous mineral classified as carcinogenic; its use is prohibited in France since 1997. Exposure in existing buildings or whilst handling asbestos-bearing materials or products have been subject to legislation since 1996 and 1977 respectively. However, natural outcrops of asbestos exist in France that currently come under no form of control, despite the fact that they may represent a non-negligible source of exposure for people residing and/or working in the vicinity.

The only study conducted to date in metropolitan France that deals with the impact that exposure to environmental asbestos has

on human health involves the Haute-Corse Department, where asbestos-bearing terrains are quite widespread.

To obtain data both more complete and on a nationwide scale, a study is addressing public exposure to environmental asbestos.

It should yield a list of all the sites classified according to the risk of exposure these represent to the public.

This will entail diagnosis of the sites by experts in order to determine their characteristics, followed by taking measurements in surrounding areas to assess the level of exposure to the neighbouring population.

Les résultats des différentes étapes de cette étude sur les sites naturels seront disponibles en 2007. Cette étude devrait aider à plus ou moins long terme à établir une politique sanitaire en France adaptée à la prévention vis-à-vis des sites d'affleurements naturels d'amiante.

### Préconisations générales

En attendant le dispositif réglementaire, des mesures de préconisations générales pour éviter les expositions environnementales à l'amiante des populations riveraines d'anciens sites industriels ou de sites naturels sont nécessaires. Ainsi, il convient entre autres d'informer les maires, les chefs d'entreprises et la population se trouvant sur les zones repérées, de limiter les travaux dans ces zones ou de les réaliser avec les précautions d'usage telle la protection des travailleurs et de l'environnement, de mettre à disposition des ménages et des entreprises des lieux de dépôt spécifiques pour l'élimination des déchets d'amiante, ainsi que de prévoir le conditionnement et le transport de ces déchets. ■

**Bibliographie :** V. Bourdes, P. Boffetta, P. Pisani (2000) – Environmental exposure to asbestos and risk of pleural mesothelioma: review and meta-analysis. *Eur. J. Epidemiol.* May, 16(5):411-7. T. Burilkov and L. Michailova (1970) – Asbestos content of the soil and endemic pleural asbestosis. *Environ. Res.*, 1970, 3, 443-451. **DDASS de Haute-Corse (2004)** – Mesures de la teneur de l'air en fibres d'amiante d'origine environnementale dans un échantillon de communes du département de la Haute-Corse. Rapport des campagnes 2001, 2002 et 2003. D. Dessandier, C. Spencer (2005) – Recensement et classement des sites naturels amiantifères et des formations géologiques potentiellement amiantifères en France. BRGM/RP-53599, 59 p. P. Goldberg, D. Luce, M.-A. Billon-Galland, P. Quénel, C. Salomon-Nekiriari, J. Nicolau, P. Brochard and M. Goldberg (1995) – Rôle potentiel de l'exposition environnementale et domestique à la trémolite dans le cancer de la plèvre en Nouvelle-Calédonie. *Rev. Epidém. et Santé Publ.*, 43, 444-450. J. Hansen, N.H. De Klerk, A.W. Musk, M.S.T. Hobbs (1998) – Environmental exposure to crocidolite and mesothelioma. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 15, 69-75. **INSERM (1997)** – Effets sur la santé des principaux types d'exposition à l'amiante. Expertise collective, Paris, 434 p. A. Laamanen, L. Noro, V. Raunio (1965) – Observations on atmospheric air pollution caused by asbestos. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 132, 240-254. D. Luce, P. Brochard, P. Quénel, C. Salomon-Nekiriari, P. Goldberg, M.-A. Billon-Galland, M. Goldberg (1994) – Malignant pleural mesothelioma associated with exposure to tremolite. *The Lancet*, 344, 1777. C. Magnani, B. Terracini, C. Ivaldi, M. Botta, A. Mancini, A. Andrion (1995) – Pleural malignant mesothelioma and non-occupational exposure to asbestos in Casale Monferrato, Italy. *Occup. Environ. Med.*, 52, 362-367. C. Magnani, A. Agudo, C.A. Gonzalez, A. Andrion, A. Calleja, E. Chellini (2000) – Multicentric study on malignant pleural mesothelioma and non-occupational exposure to asbestos. *Br. J. Cancer*, 83(1):104-111. F. Rey, J.R. Viallat, C. Boutin, P. Farisse, M.-A. Billon-Galland, P. Hereng, P. Dumortier et P. De Vuyst (1993) – Les mésothéliomes environnementaux en Corse du nord-est. *Rev. Mal. Resp.*, 10, 339-345. P. Sébastien (1986) – Measuring asbestos dust in the environment. *Proceedings of APCA International Specialty Conference.* Atlantic City. **U.S. EPA - Asbestos assessment for El Dorado Hills (2005)** – < www.epa.gov >. J. Addison, L.S.T. Davies, A. Roberston, R.J. Willey (1988) – The release of dispersed asbestos fibres from soils. *Edinburgh: Institute of Occupational Medicine; TM/88/14.*

[retour au sommaire](#)

PUBLICITÉ

**SEPIA SANTÉ**

Épidémiologie

Biostatistique

Santé Publique

Environnement

Répondre à vos interrogations et aider à la décision

- > Veille documentaire
- > Synthèse bibliographique
- > Méta-analyse
- > Conception de protocoles d'études
- > Enquête en population
- > Volet sanitaire des études d'impact
- > Analyses statistiques
- > Valorisation des résultats

SEPIA-Santé  
18 BIS RUE DU CALVAIRE - 56310 - MELRAND -  
Tél : 02-97-28-80-38 - Fax : 02 97 28 81 10 -  
Email : sepia@sepia-sante.com  
www.sepia-sante.com



L'exposition au plomb peut entraîner des troubles neuro-comportementaux et intellectuels, en particulier chez les jeunes enfants. Autour des sites industriels, l'ingestion de sols et de poussières constitue souvent une exposition prépondérante. La prédiction des risques liés aux sols pollués est améliorée par la prise en compte de la spéciation chimique du plomb, qui influence sa biodisponibilité. La spéciation influence également la mobilité du plomb et donc son éventuel transfert depuis la source (les sols pollués) vers une cible humaine.

**Vestiges d'activités d'extraction de plomb en France : les rejets de l'ancienne mine de plomb de Carnoules dans le Gard.**

*Remnants of lead extraction activity in France: tailings of the old lead mine at Carnoules (Gard).*

© BRGM im@gé

# Plomb et santé : importance de la spéciation



**Philippe Glorennec**

ENSEIGNANT-CHERCHEUR EN « ÉVALUATION DES RISQUES SANITAIRES LIÉS À L'ENVIRONNEMENT » ÉCOLE NATIONALE DE LA SANTÉ PUBLIQUE (ENSP) [Philippe.Glorennec@ensp.fr](mailto:Philippe.Glorennec@ensp.fr)

**Valérie Laperche**

CHEF DE PROJET, UNITÉ ÉCOTECHNOLOGIES SERVICE ENVIRONNEMENT ET PROCÉDÉS, BRGM [v.laperche@brgm.fr](mailto:v.laperche@brgm.fr)

**Dominique Guyonnet**

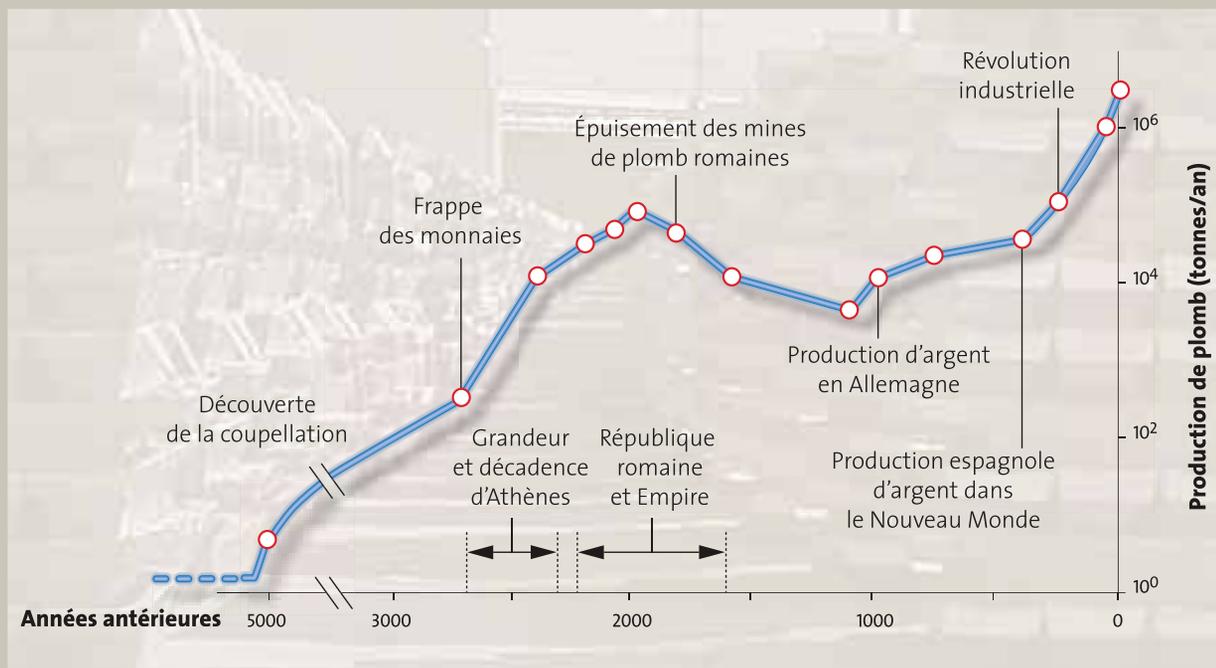
RESPONSABLE DE L'UNITÉ GESTION DES DÉCHETS SERVICE ENVIRONNEMENT ET PROCÉDÉS, BRGM [d.guyonnet@brgm.fr](mailto:d.guyonnet@brgm.fr)

## Mieux caractériser le plomb dans les sols pour mieux évaluer les risques sanitaires associés

Le plomb est un métal d'usage très ancien et courant (figure 1), utilisé dès la préhistoire, puis par les Égyptiens, Grecs, Romains (adduction d'eau, édulcorant...) avant que les usages ne se développent et se diversifient, notamment avec la révolution industrielle et de nouvelles utilisations massives dans l'agriculture, la construction, l'industrie et l'imprimerie.

Sur le plan des risques pour la santé, ce polluant ubiquitaire est un toxique cumulatif absorbé principalement par voies pulmonaire et digestive. Entre 1990 et 2002, les émissions de plomb dans l'air en France ont diminué de 95 % (passant de 4 264 à 217 t an/an) suite à la suppression du plomb tétraéthyle dans l'essence depuis le 01/01/2000 (figure 2). Les émissions dues au transport routier sont passées de 3 887 t

“L'exposition au plomb peut entraîner des troubles neuro-comportementaux et intellectuels, en particulier chez les jeunes enfants.”

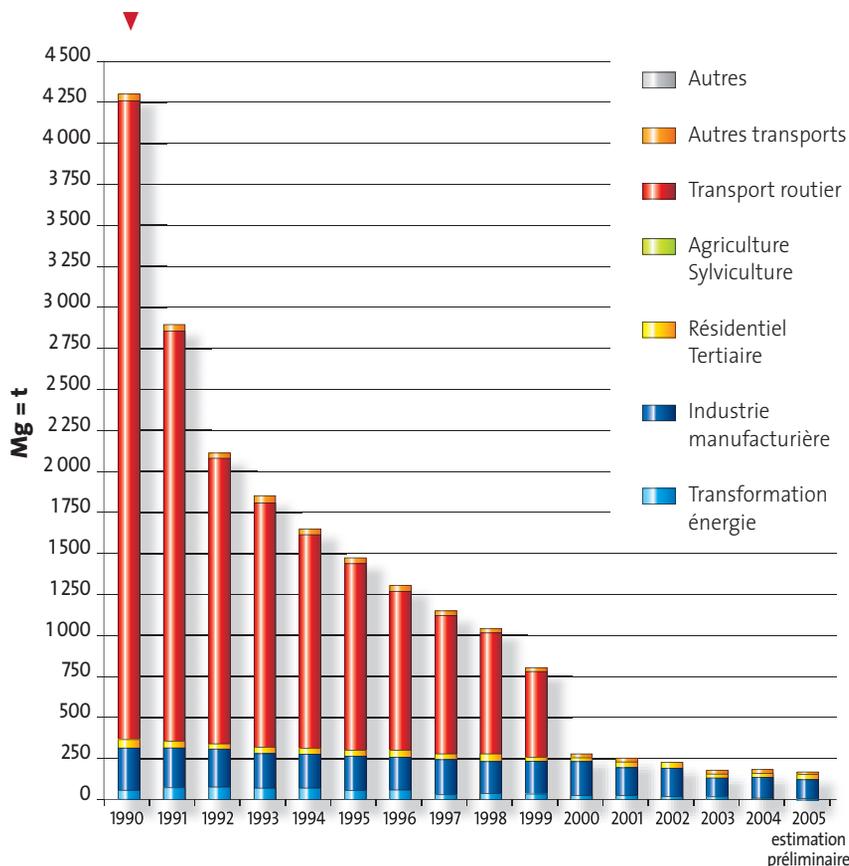


en 1990 à 0 t en 2002. Les émissions passées ont eu pour conséquence l'accumulation de plomb dans les sols, avec un transfert possible vers la chaîne alimentaire, les aliments pouvant aussi être contaminés lors de leur conditionnement. L'eau de distribution publique peut également, par dissolution du plomb constituant certaines canalisations et éléments de robinetterie, contribuer à l'exposition générale au plomb. Outre *via* les transferts des sols, les poussières des maisons peuvent également être enrichies en plomb par la dégradation d'anciennes peintures contenant du plomb ou les particules riches en plomb provenant des habits de travail du personnel travaillant dans les fonderies par exemple.

De par des contacts plus étroits avec l'environnement (portage mains – bouche en particulier), un rapport quantité ingérée/poids corporel plus important, et une absorption digestive plus élevée, les jeunes enfants (de 6 mois à 6 ans) constituent une population particulièrement exposée. Il s'agit également d'une population plus sensible compte tenu d'effets neuro-comportementaux et intellectuels accentués chez les enfants, effets bien documentés [WHO (1995)] au-delà d'une plombémie de 100 µg(Pb)/l(sang). Des études récentes sont en faveur d'une association entre un accroissement de plombémie et une diminution du quotient intellectuel chez les enfants, même en deçà de 100 µg/l [Canfield *et al.* (2003)]. Cette absence apparente de seuil pour les effets sur la fonction intellectuelle des enfants renforce l'attention portée aux expositions à plus faibles doses, qui sont les plus fréquentes.

**Fig. 2 : Émissions de plomb dans l'air en France métropolitaine.**  
*Fig. 2: Lead releases into the atmosphere for metropolitan France.*

Source: CITEPA, 2006.





## Le sol, une source d'exposition d'une importance certaine mais souvent difficile à quantifier

Du fait de la faible mobilité<sup>(1)</sup> du plomb et donc de sa persistance dans les sols, ceux-ci constituent un réservoir d'exposition environnementale pour ce polluant. Les sols, outre leur capacité à être ingérés directement, contribuent à l'enrichissement des poussières domestiques en polluants par dépôt atmosphérique de particules remises en suspension, ou transport *via* les chaussures ou animaux domestiques. Les poussières adhèrent ensuite aux mains et objets portés à la bouche, en particulier par les enfants. Par exemple, autour d'une fonderie, le plomb des rejets atmosphériques se dépose sur les sols, puis peut, par des réenvols, contaminer l'intérieur des domiciles. Autour des sites et sols pollués, le sol constitue d'ailleurs une voie d'exposition majeure, fréquemment reliée aux teneurs en plomb sanguin. En atteste une revue de littérature [Mielke et Reagan (1998)] qui relève qu'une corrélation positive entre la concentration du plomb dans le sol et la plombémie a été observée dans presque toutes les études revues (42/46), *idem* pour les poussières (40/45).



▲ Les poussières des maisons peuvent être enrichies en plomb par la dégradation d'anciennes peintures contenant du plomb.

*Dust in houses may be enriched in lead through the decomposition of old lead-based paint.*

© Randall van der Woning.

d'ailleurs devenue une préoccupation majeure en évaluation des risques sanitaires. La quantification précise de cette voie d'exposition est cependant difficile. L'examen de la littérature [EPA (2002)] relative à l'ingestion de sol amène aux constats suivants :

- ▶ les études visant à quantifier la quantité de sol ingérée sont peu nombreuses et exclusivement nord-américaines. Leurs résultats sont incertains et les possibilités de généralisation hasardeuses vu les faibles échantillons (ainsi que le faible niveau de description du contexte et des conditions d'observation) ;
- ▶ les estimations proposées par les différents auteurs sont du même ordre de grandeur, de 30 à 100 mg/jour en moyenne ;
- ▶ elles varient néanmoins dans un facteur deux à trois, selon les méthodes utilisées et les données retenues en fonction des types d'exposition (durée et modalités d'exposition, âge).

Ces différences peuvent avoir leur importance, y compris économique, si l'ingestion de sol constitue l'exposition prédominante, ce qui est souvent le cas pour le plomb autour des sites industriels (*cf. supra*). En effet une surestimation systématique, par prudence, de cette voie d'exposition peut conduire à une allocation de ressources disproportionnée. En conclusion sur ce point, l'incertitude associée à la quantification de la dose reçue *via* cette voie d'exposition est importante, et des recherches visant à la réduire seraient opportunes et vraisemblablement rentables pour la société.

“ Les sols contribuent à l'enrichissement des poussières domestiques en polluants. ”

De nombreux paramètres gouvernent l'influence du plomb des sols sur la plombémie : la spéciation (ou forme chimique) qui influence la biodisponibilité, les caractéristiques du sol comme le pH ou la teneur en matière organique avec laquelle le plomb peut se complexer, la minéralogie, la taille des particules, la quantité de poussière ingérée...

### La quantité de sol et de poussières ingérées

Les évaluations des risques sanitaires conduisant à la réhabilitation des sites et sols pollués montrent que le risque est souvent gouverné par la contribution de l'ingestion de sol à la dose totale. Avec l'attention croissante portée aux sites et sols pollués, l'estimation de l'exposition par ingestion de sol contaminé est

(1) En général, mais cela peut être très variable comme on le verra plus loin dans l'article.

“ La prise en compte de la spéciation permet de réduire l'incertitude sur la biodisponibilité, et donc sur l'exposition, et par là même d'améliorer les actions de prévention et de gestion des risques. ”

## La biodisponibilité du plomb

À quantité ingérée (dose externe) égale, la quantité absorbée (dose interne) par l'organisme dépend de l'individu (âge, alimentation...) mais aussi de la biodisponibilité du plomb, gouvernée notamment par la taille des particules et la spéciation.

La forme chimique ou spéciation du plomb influence la biodisponibilité dans un rapport pouvant aller jusque 100, du fait notamment de la solubilité dans le suc gastrique ; il existe également des effets de matrice<sup>(2)</sup> pouvant influencer la biodisponibilité par solubilité différentielle dans le suc gastrique. À ce titre les résidus miniers sont généralement considérés comme *a priori* moins biodisponibles même si de fortes concentrations peuvent conduire à des expositions significatives. La biodisponibilité du plomb du sol est généralement évaluée à 30-50 % mais la gamme peut être plus importante et, là aussi, sa connaissance peut améliorer l'efficacité des actions de gestion des risques.

(2) Environnement immédiat du plomb très hétérogène dans le sol : gangue par exemple.

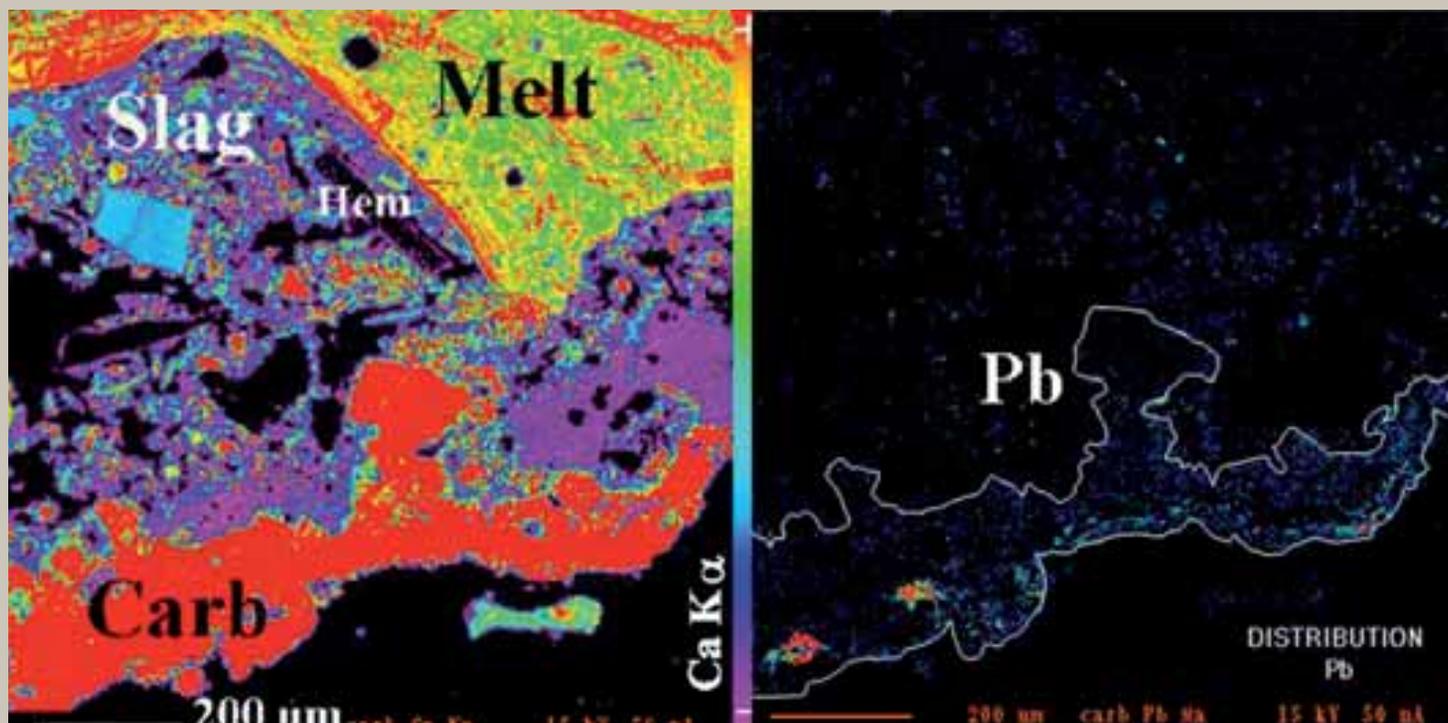
## La spéciation chimique : un élément déterminant pour la biodisponibilité

Ainsi, dans le cas récemment étudié [Glorennec (2006)] d'une ancienne activité minière, représentant la principale source d'exposition locale au plomb, avec des teneurs en plomb très supérieures au bruit de fond habituel, la prise en compte de la spéciation permet de réduire l'incertitude sur la biodisponibilité, et donc sur l'exposition, et par là même d'améliorer les actions de prévention et de gestion des risques. Dans cet exemple, la prise en compte de la biodisponibilité spécifique de la galène réduit l'importance de la contribution des sols et poussières à la dose journalière d'exposition. Plus précisément, les valeurs par défaut de biodisponibilité entraînaient une contribution des sols et poussières de l'ordre de 30 %, alors qu'en prenant en compte la biodisponibilité spécifique de la galène, on estime cette contribution à seulement 3 %. Mais outre son influence sur la biodisponibilité, la spéciation influence également le comportement du plomb dans l'environnement et donc sa capacité à atteindre ses « cibles ».

### Identification à la microsonde électronique des phases minérales porteuses de plomb.

*Identification of lead-bearing mineral phases by electronic microprobe.*

Source : BRGM.



### Spéciation et comportement dans l'environnement

Si la spéciation du plomb a une influence importante sur sa biodisponibilité et donc sur les effets sanitaires prévisibles pour une dose reçue donnée, dans le schéma classique de l'évaluation des risques « source-vecteur-cible » [MEDD (2000)], elle intervient également sur le terme « vecteur », et donc sur la mobilité du plomb dans le sol et sa capacité à migrer depuis la source de plomb vers la cible humaine. Or comme l'illustre un diagramme pH-Eh (figure 3), il existe de nombreuses phases minérales susceptibles de piéger le plomb :

- carbonates [cérusite  $PbCO_3$  et hydrocérusite  $Pb(CO_3)_2(OH)_2$ ],
- sulfures [galène  $PbS$ ] en milieu réducteur,
- phosphates [pyromorphite  $(PO_4)_3Cl$ ],
- sulfates [anglésite  $PbSO_4$ ],
- oxydes [massicot  $PbO$ ].

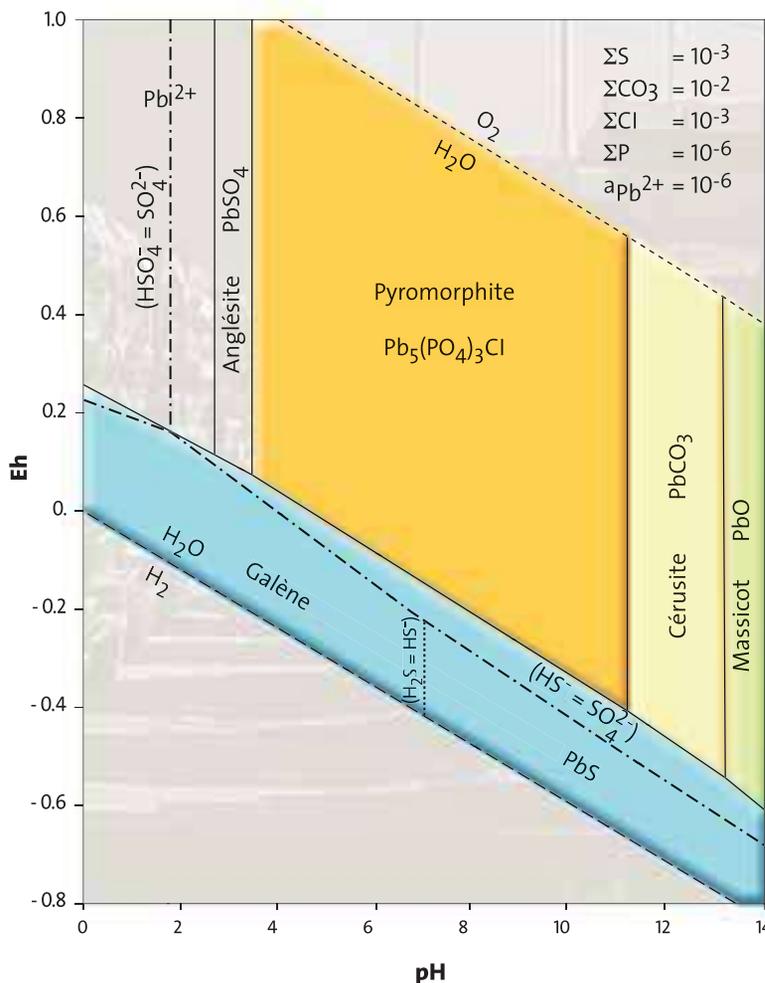
On note dans la figure 3 que la zone du diagramme pH-Eh où le plomb se trouve sous la forme d'ion libre soluble  $Pb^{2+}$ , c'est-à-dire susceptible de migrer dans le sous-sol et les eaux souterraines, est extrêmement restreinte (faible pH et conditions oxydantes). En milieu oxydé, ce sont les carbonates et les phosphates qui sont généralement considérés comme responsables de la rétention du plomb tandis qu'en milieu réducteur, c'est surtout la galène ( $PbS$ ) qui limite sa mobilité.

Dans la phase aqueuse, le plomb peut être présent soit sous forme d'ions libres ( $Pb^{2+}$ ), soit sous forme de complexes. Sa concentration dans les eaux naturelles reste généralement très basse (de l'ordre de  $10^{-9}$  à  $10^{-8}$  M). À noter que la solubilité du plomb peut augmenter en raison de formation de complexes avec la matière organique. Mais cette diversité de phases minérales associant du plomb dans leur structure explique partiellement le constat qui est fait sur le terrain de la faible mobilité du plomb dans le sous-sol et les eaux souterraines. Parmi les études de terrain

qui illustrent bien cette faible mobilité on peut citer celle de la Villa Horace en Italie. À l'occasion de fouilles archéologiques menées sur ce site [Essington *et al.* (2004)], on a découvert des canalisations en plomb qui servaient à l'alimentation en eau. Ces canalisations, enterrées à une profondeur d'environ 50 cm, datent de 75 à 125 de notre ère. Or, les analyses de sol autour des canalisations montrent une migration transversale du plomb à une distance inférieure à 50 cm. Cette faible distance s'explique par la formation de cérusite et d'hydrocérusite dans l'environnement immédiat des canalisations, présence révélée par les analyses minéralogiques.

Plus près de nous, un autre cas d'étude intéressant est celui des sites de tirs de loisirs en Suède. Sur ces sites, de nombreuses munitions en plomb sont enterrées jusqu'à des profondeurs maximales d'environ 50 cm. Les analyses minéralogiques dans les sols de ces sites montrent qu'à pH neutre ou alcalin, le plomb émis par ces munitions est rapidement (en quelques jours)

**Fig. 3 : Diagramme de stabilité du plomb.**  
D'après Nriagu, 1974.  
Fig. 3: Diagram of lead stability.  
From Nriagu, 1974.



“ La spéciation du plomb intervient également sur la mobilité du plomb dans le sol et sa capacité à migrer depuis la source de plomb vers la cible humaine. ”



## Lead and health: the importance of speciation

*Lead is a metal used widely since ancient times, as long ago as the prehistoric era. It is also a cumulative poison absorbed mainly through the lungs and digestive system. In the vicinity of industrial sites, the ingestion of soil and dust often play a preponderant role in exposure.*

*The prediction of risks associated with polluted soils is improved when lead's chemical speciation is taken into consideration.*

*Lead speciation is the chemical form in which lead occurs in the exposure medium (i.e. as a sulphide, a carbonate, a phosphate, etc.). Its impact on bioavailability is substantial and hence on the*

*consequences to health liable to arise from a given exposure.*

*But it also influences lead's mobility, notably during transfer via groundwater between the source (the polluted soil) and the target (Man). An analysis of pH-Eh stability ranges in water reveals that, in most*

*geochemical contexts, lead solubility in the unsaturated zone and in groundwater is largely governed by mineral phases (for example, carbonates such as cerussite). This notably explains why the "ingestion of polluted groundwater" route is relatively uncommon.*

*Chemical speciation is too often disregarded, lead behaviour being assessed by simplified approaches that generally overestimate risks for this exposure route. Research intended to facilitate taking chemical speciation into account should be encouraged in determining risks, as should a more systematic multidisciplinary approach when health risks are being assessed.*

## ► LE SATURNISME

Patrice Piantone BRGM – p.piantone@brgm.fr

Le saturnisme, de Saturne, père de Jupiter, est une maladie liée à l'usage du plomb. Ses pathologies sont polymorphes. Il touche à travers l'activité enzymatique, la production d'hématie, l'intégrité des acides nucléiques et le cycle du calcium (le plomb se substituant au calcium). Si l'ingestion de plomb à forte dose est mortelle, elle est le plus souvent diagnostiquée sous sa forme chronique qui affecte plus particulièrement les jeunes enfants, amenant des retards au niveau du développement intellectuel.

Depuis la haute Antiquité, ce métal aux propriétés physico-chimiques singulières, côtoie l'homme multipliant de fait la probabilité de pathologies induites. Le plomb ou ses dérivés ont été utilisés depuis la nuit des temps, comme cosmétique et antiseptique pour les yeux (la galène ou khôl des Égyptiens), puis depuis l'époque romaine (période de la première pollution planétaire) comme métal à tout faire (canalisations, tenon pour

l'ajustement des blocs, plats...), au Moyen Âge comme « glaçurant » des poteries, aux XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles comme cosmétique (le blanc de céruse), et enfin dans les temps modernes, avec l'émergence du moteur à explosion, comme additif antidétonant pour l'essence (sous forme de plomb tétraéthyle au lieu de l'éthanol pour des raisons...mercantiles) et composant majeur des batteries (plomb métal). L'histoire veut qu'un empoisonnement chronique au plomb de l'élite romaine aurait participé à la chute de l'Empire à travers la consommation de vin édulcoré et conservé au sapa (diacétate de plomb).

Actuellement les cas de saturnisme sont essentiellement liés au non-respect des usages pourtant fortement contraints de l'industrie extractive ou du raffinage des métaux, et aux logements anciens comportant des peintures au plomb (à base de céruse). Faisant ainsi apparaître le saturnisme infantile comme la maladie de la pauvreté et du mal-logement. ■

piégé totalement par des phases minérales carbonatées (hydrocérusite et cérusite) et oxydées (massicot).

Si on ne peut exclure ni des situations défavorables où les conditions de pH très acides (environnement minier) permettent la mobilité du plomb, ni un rôle de la matière organique, sous forme notamment de colloïdes mobiles dans l'eau souterraine, qui peut promouvoir cette mobilité, on note que dans la majorité des situations, le plomb sera piégé par des phases minérales [Laperche *et al.* (2004)]. En comparaison de l'exposition par ingestion de poussières contaminées, la voie « ingestion d'eau souterraine polluée » est généralement relativement marginale. Mais parfois, les bureaux d'études en charge d'évaluer les risques sanitaires autour des sites et sols pollués négligent la spéciation chimique et abordent le devenir du plomb par le biais de coefficients de partage eau-sol (appelés « Kd »). Ceci aboutit généralement à des estimations de risques pouvant être qualifiées « d'exagérément majorantes » pour cette voie d'exposition. En effet, ces coefficients ne tiennent pas du tout compte des phases minérales évoquées dans cet

article, dont la présence sur le terrain est néanmoins démontrée par de nombreuses études. Des documents de recommandations rédigés ces dernières années pour le MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) [Burnol *et al.* (2004)] militent en faveur d'une meilleure prise en compte de la spéciation des polluants métalliques dans les évaluations des risques liés aux sites et sols pollués.

L'évaluation des risques sanitaires liés à l'environnement est une approche par essence pluridisciplinaire, qui requiert des compétences variées en épidémiologie, toxicologie, mais aussi en sciences de l'environnement, tout particulièrement pour estimer l'exposition des populations. Dans le cas de sols pollués, nous avons illustré avec le cas du plomb, la complémentarité entre les géosciences et les disciplines des sciences de la santé ; cette transversalité des approches permet de cerner de manière plus réaliste les impacts sur la santé des populations. Les enjeux sont loin d'être négligeables : pour ce qui concerne le plomb, plus de 400 sites potentiellement pollués ont été récemment recensés par le MEDD. ■

**Bibliographie :** A. Burnol, P. Blanc, D. Guyonnet (2004) – Recommandations pour la modélisation des transferts métalliques dans les eaux souterraines. Rapport BRGM/RP-52910-FR. R.L. Canfield, C.R. Henderson Jr., D.A. Cory-Slechta, C. Cox, T.A. Jusko, B.P. Lanphear (2003) – Intellectual impairment in children with blood lead concentrations below 10 microg per deciliter. *N. Engl. J. Med.*, 348(16):1517-1526. CITEPA (2006) – [www.citepa.org/emissions/nationale/ML/ml\\_pb.htm](http://www.citepa.org/emissions/nationale/ML/ml_pb.htm). EPA (2002) – Child-specific exposure factors handbook. U.S. Environmental Protection Agency Report, EPA-600-P-00-002B, 1-448. M.E. Essington, J. Foss, Y. Roh (2004) – The soil mineralogy of lead at Horace's Villa. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68, 979-993. P. Glorennec (2006) – Analysis and reduction of the uncertainty of the assessment of children's lead exposure around an old mine. *Environ. Res.*, 100(2):150-158. V. Laperche, M.C. Dictor, B. Clozel-Leloup et Ph. Baranger (2004) – Guide méthodologique du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués. BRGM/RP-52881-FR, 136 p., 40 ill. MEDD (2000) – Gestion des Sites Pollués. Diagnostic Approfondi et Évaluations Détaillées des Risques. Guide téléchargeable sur le site : [www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr](http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr). H.W. Mielke, P.L. Reagan (1998) – Soil is an important pathway of human lead exposure. *Environ. Health Perspect.*, 106 Suppl., 1:217-229. J.O. Nriagu (1974) – Lead orthophosphates-IV: formation and stability in the environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, 887-898. WHO (1995) – Inorganic Lead Environmental Health Criteria n°165. IPCS (International Program on Chemical Safety), Editor. World Health Organization. Geneva, Switzerland.



Le Conseil de gouvernements qui préside le programme « *Global Mercury Assessment* » du PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) a conclu en 2005 à l'impact significatif sur la santé humaine de la contamination au mercure à l'échelle mondiale et à la nécessité d'engager des actions internationales. En Europe, la stratégie de l'Union Européenne publiée en 2004 conduit à un bannissement progressif du mercure de l'industrie et des usages domestiques. Mais quelle est l'importance de l'impact du mercure naturel par rapport à celui issu de l'activité industrielle ? Quelles sont ses conséquences pour la santé ? Ces questions méritent d'être examinées.

# Mercure naturel et santé



**Patrice Piantone**

RESPONSABLE DE PROJETS,  
UNITÉ GESTION DES DÉCHETS  
SERVICE ENVIRONNEMENT  
ET PROCÉDÉS, BRGM  
p.piantone@brgm.fr

**Boues de caniveaux d'une usine de chlore alkali : gouttes de mercure issues de la concentration du mercure par gravimétrie (Laboratoire du BRGM).**

*Sludge from gutters from an alkali chloride plant: mercury-free droplets from gravimetric concentration products (BRGM laboratory)*

© BRGM im@gé

Dans le milieu naturel, sur une centaine d'espèces minérales identifiées et contenant du mercure, seule une dizaine de minéraux a fait l'objet d'une exploitation du mercure. À côté des gisements majeurs constitués de cinabre (HgS) (*photo 1*), d'autres plus mineurs ont fait aussi historiquement l'objet d'exploitation. Le métal y était extrait à partir de mercure natif (Hg<sup>0</sup>), de chlorures et de sulfoantimoniures mercuriels. Enfin sa présence dans le réseau de certains sulfures comme la blende et la pyrite peut également poser de sérieux problèmes environnementaux, notamment dans le cas de déchets miniers. Le mercure peut aussi apparaître comme un sous-produit de l'affinage de métaux comme le zinc.

## Gîtologie et distribution naturelle à la surface terrestre

Malgré une faible abondance dans l'univers et un nombre d'espèces minéralogiques très limité, ses particularités physico-chimiques, liquide à température ambiante, point d'ébullition très bas pour un métal (357 °C), pression de vapeur basse ( $1,68 \cdot 10^{-6}$  bar), forte propension à se combiner aux ions chlorurés et sulfurés, mais également à former des complexes organométalliques, en font un métal universellement distribué dans l'écorce terrestre, l'air et l'eau, et la biosphère.

“ Les gisements de mercure les plus connus résultent de phénomènes liés à l'activité volcanique. ”

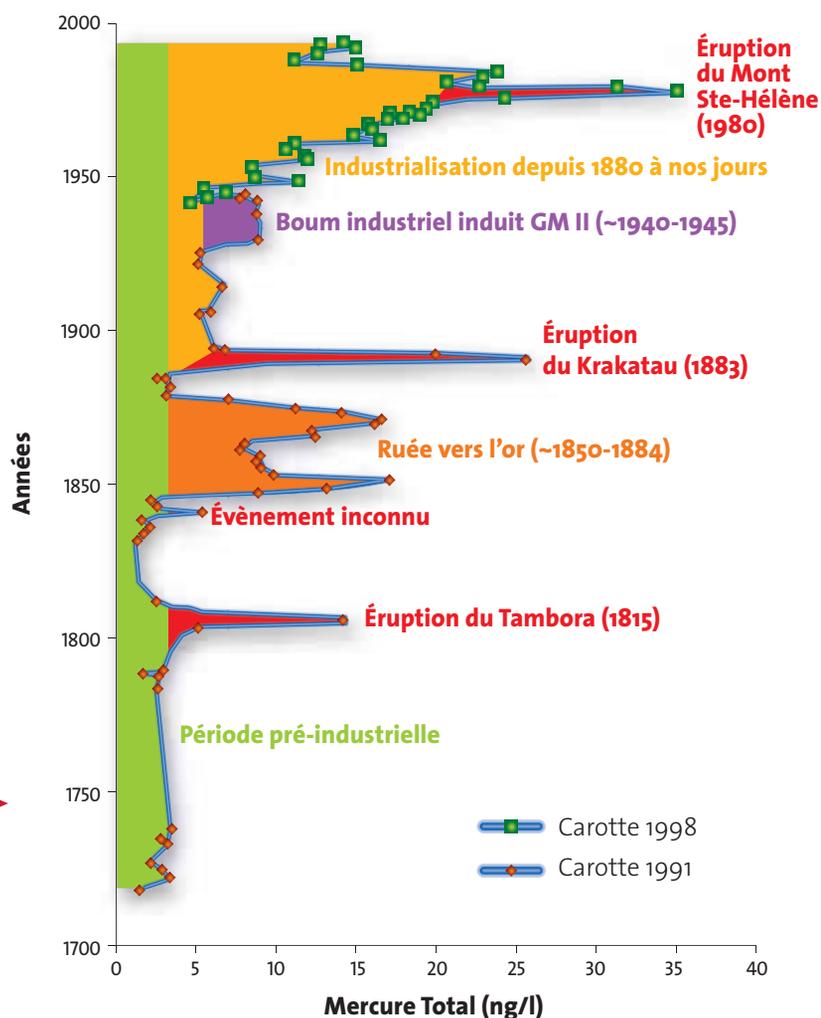
**Photo 1 : Cristaux de cinabre sur dolomite. Cristaux de 1 cm (Hunan, Chine).**  
 Photo 1: Cinnabar crystals on dolomite. 1 cm-sized crystals (Hunan, China).  
<http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/Main.html>



C'est un métal fréquent dans tous les gisements sulfurés de basse à moyenne température, mais rarement distribué en teneur suffisante pour donner des gisements exploitables. Certaines eaux thermales contiennent du mercure (< 100 ppb) et précipitent du cinabre. Sous forme sulfurée ou inclus dans la matière organique fossile, il est fréquemment associé aux hydrocarbures ou au charbon. Sa volatilité fait qu'il peut être utilisé comme traceur des minéralisations en exploration minière.

Sa liaison avec le volcanisme est manifeste. De tous les métaux rejetés dans l'atmosphère, Bi, Cu, Cd, Pb, Zn, le mercure est le plus volatil. Ceci est parfaitement illustré par la distribution du mercure enregistrée dans les carottes prélevées dans le glacier de Fremont (Wyoming) (figure 1). Une estimation à l'échelle du globe, basée sur des mesures dans les panaches volcaniques (rapport Hg/SO<sub>2</sub>), permet de dire que les volcans contribuent annuellement à environ 55 % des 2 500 tonnes du mercure atmosphérique émises dans l'atmosphère. Le reste des émissions est essentiellement constitué d'aérosols continentaux, environ 680 t/an [Porcella *et al.* (1995)].

Les gisements de mercure les plus connus résultent de phénomènes liés à l'activité volcanique. L'exemple type est celui d'Almaden en Espagne, produit d'un hydrothermalisme en relation avec un système volcanique ayant fonctionné plus d'un million d'années.



**Fig. 1 : Données sur la distribution du mercure enregistré dans les glaces polaires. La partie verte correspond au fond naturel en mercure extrapolée à partir des données les plus anciennes ; les parties rouges aux contributions volcaniques majeures (Krabbenhoft et Schuster, 2002).**  
 Fig. 1: Data on mercury distribution as recorded in polar ice. The green portion corresponds to the mercury natural background extrapolated from the oldest data, and the red portions, to large-scale volcanic contributions (Krabbenhoft and Schuster, 2002).

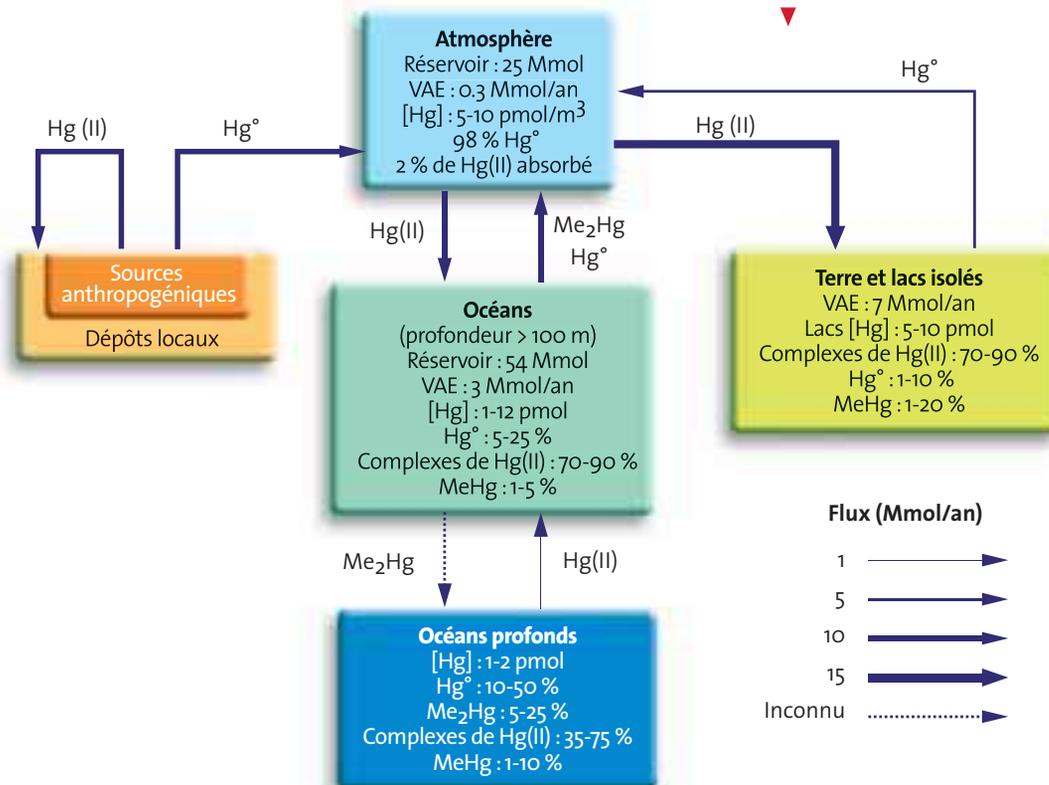
## ► LE CYCLE DU MERCURE

Patrice Piantone BRGM – p.piantone@brgm.fr

Les eaux naturelles sont normalement sursaturées vis-à-vis de  $Hg^0(g)$  comparées à l'atmosphère, et par ce fait, celui-ci a tendance à se volatiliser de l'eau vers l'atmosphère. Cette sur-saturation est maximale durant l'été, quand la photoréduction de  $Hg(II)$  est à son maximum [Morel *et al.* (1998)]. Dans l'atmosphère, à peu près 95 % du mercure est sous forme élémentaire où ce dernier est lentement oxydé en  $Hg(II)$ . On estime que l'ozone ( $O_3$ ) serait le principal oxydant. Une partie du  $Hg(II)$  produit se trouve « re-réduit » par des mécanismes impliquant soit les composés soufrés comme réducteurs, soit la photoréduction [Xiao *et al.* (1994)]. Le retour du mercure depuis l'atmosphère à la surface terrestre se produit essentiellement *via* les précipitations de  $Hg(II)$  dissous dans les pluies et brouillards. Le temps de résidence de  $Hg^0$  dans

l'atmosphère est relativement long, de l'ordre de l'année, à cause d'une cinétique de « ré-oxydation » de  $Hg^0(g)$  en  $Hg(II)$  lente [Morel *et al.* (1998)]. Ce temps de résidence dans l'atmosphère est suffisant pour que le mercure se retrouve largement distribué à l'échelle continentale et même globale avant de retomber sur les continents, mers, lacs et glaces. Ceci a pour incidence qu'une pollution au mercure, même si elle paraît concentrée dans l'environnement d'une source, en relation avec l'effet de proximité, n'en demeure pas moins globale à l'échelle de la planète. Ce phénomène est particulièrement bien illustré par l'étude des sédiments de lacs hors des zones peuplées qui montrent une pollution atmosphérique d'origine anthropogénique ayant triplé au cours de ces 150 dernières années. ■

**Le cycle global du mercure dans l'environnement.**  
 L'épaisseur des flèches correspond aux différents flux [Mason *et al.* (1994) ; Morel *et al.* (1998)]. Vitesse actuelle d'échange entre les réservoirs (VAE).  
 Clés : MeHg, Méthylmercure –  $Me_2Hg$ , Diméthylmercure.  
 NB : 1 million de moles (Mmol) équivaut à 200 tonnes et 1 pico mole à 0,2 partie par trillion (ppt).  
*The global mercury cycle in the environment.*  
 The thickness of the arrows corresponds to different flows [Mason *et al.* (1994); Morel *et al.* (1998)]. Current exchange rate between the reservoirs (VAE).  
 Keys: MeHg, Methylmercury –  $Me_2Hg$ , Dimethylmercury.  
 N.B.: 1 million moles (Mmol) is equivalent to 200 tons and 1 pico-mole to 0.2 parts per trillion (ppt).





Les apports naturels de mercure sont essentiellement liés aux éruptions volcaniques, au dégazage des terrains riches en mercure (notamment les failles actives et probablement les gisements polymétalliques), au transport d'aérosols, à l'activité des champs géothermaux, aux feux de forêt, aux émissions biogéniques de particules ou de gaz, et enfin au dégazage des eaux de surface.

Le cycle du mercure dans le milieu naturel est complexe. Il fait intervenir d'une part, de nombreuses espèces chimiques aussi bien inorganiques qu'organiques, probablement plus d'une cinquantaine, et d'autre part, des équilibres gouvernés par de nombreuses variables, acidité, état redox, température, luminosité, concentration relative des espèces dissoutes, activité bactérienne (voir encadrés « Cycle du mercure » et « Chimie du mercure dans les eaux »).

Actuellement, sur la base d'estimations faites dans des sédiments de lacs et des carottes de glaces, on peut dire que les dépôts atmosphériques du mercure ont triplé ces 150 dernières années. On en déduit donc que les deux tiers du mercure émis dans l'atmosphère et redéposé sont d'origine anthropique, et un tiers est d'origine naturelle (figure 1). L'estimation réelle des apports en mercure vers l'océan par les sédiments d'origine continentale reste encore mal maîtrisée.

Si la méthylation du mercure constitue un des paramètres majeurs intervenant dans la bioaccumulation du mercure dans le cycle biologique et de là dans la chaîne alimentaire vers l'homme, la sulfuration des espèces dissoutes du mercure constitue un processus non moins efficace de piégeage, entraînant sa soustraction par sédimentation du cycle global de l'environnement (voir encadré « Chimie du mercure dans les eaux »).

## Mercure et santé

Aujourd'hui, on sait que les principaux effets d'une exposition de l'homme au mercure sont à l'origine de maladies immunologiques, cardiovasculaires, rénales et neurologiques. Des découvertes récentes décrivent aussi des effets indésirables sur le système immunitaire pour de très faibles concentrations de mercure. La plupart des personnes sont exposées au mercure à la suite d'activités normales, comme l'inhalation, un contact avec de l'eau et le sol, et/ou une exposition à des substances et à des produits qui contiennent du mercure comme les amalgames dentaires. Des recherches récentes indiquent qu'une exposition à des vapeurs de mercure liées à des déversements



L'association des professeurs de biologie et géologie (APBG) est une association professionnelle forte de plus de 8 000 professeurs, qui œuvre pour le développement de l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre dans le secondaire.

Elle participe à la formation continue des enseignants en liaison avec l'enseignement supérieur, les grands organismes de recherche, les branches industrielles et professionnelles, grâce à un bulletin trimestriel national (1 000 pages annuelles), des stages, des colloques, des travaux de terrain, au niveau national et régional. Elle produit de nombreux documents de tous types en particulier pour l'enseignement expérimental.

Par ses propositions, ses prises de positions et ses réactions, l'APBG est un interlocuteur reconnu pour la promotion et l'évolution de l'enseignement des SVT au service tant des élèves que des enseignants.

### Pour tous renseignements :

Tél. : 04 78 74 47 22 – Mél : [apbg@wanadoo.fr](mailto:apbg@wanadoo.fr)

Site : [www.apbg.org](http://www.apbg.org)

PUBLIRÉDACTIONNEL

antérieurs de mercure liquide peut également être une voie d'exposition importante. Mais la principale voie de pénétration du mercure dans le corps humain est la consommation d'aliments, en particulier du poisson, et l'application d'amalgames dentaires.

### Exposition liée à la consommation des aliments

Lorsque le mercure pénètre dans des plans d'eau douce et les océans, ou se fixe dans des sédiments et des sols, il peut alors prendre part à des cycles biogéochimiques, se transformer en une substance fortement toxique, le méthylmercure, et se bioaccumuler dans la chaîne alimentaire. On peut trouver des niveaux élevés de méthylmercure dans des poissons prédateurs dont se nourrissent l'homme et d'autres animaux.

“ Les dépôts atmosphériques de mercure ont triplé ces 150 dernières années. On en déduit donc que les deux tiers du mercure émis dans l'atmosphère et redéposé sont d'origine anthropique, et un tiers est d'origine naturelle. ”

### Exposition liée au contact

Les effets du mercure élémentaire sur la santé dépendent de la durée et du type d'exposition. Par exemple, si une personne avalait du mercure élémentaire liquide, l'absorption par le corps serait limitée. En revanche, l'inhalation des vapeurs de mercure faciliterait l'absorption et pourrait occasionner des ennuis de santé. L'exposition à long terme à de faibles concentrations peut provoquer des symptômes analogues à ceux provoqués par le méthylmercure. Un contact cutané est également une voie d'exposition au mercure. On connaît particulièrement bien le cas des composés de mercure alkylé ; une absorption cutanée peut être mortelle. Le cas d'un chercheur empoisonné par un contact accidentel avec du méthylmercure demeure singulier.

### Cycle géologique et santé

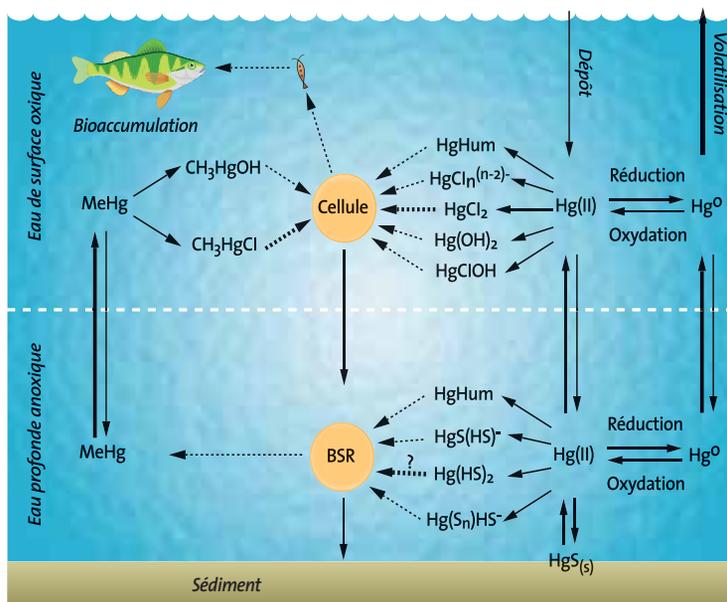
Actuellement, il ne semble pas qu'il y ait eu de pathologie liée au mercure naturel sauf en raison de son exploitation : l'hydrargyrisme des mineurs de cinabre (mine d'Almaden en Espagne) et les troubles sanitaires possibles dans les populations autochtones d'Amazonie. Les seules catastrophes connues sont liées à des faits d'origine anthropique comme les événements de Minamata entre 1953 et 1971, ou en Irak les empoisonnements liés à la consommation du pain fait à partir de grains de semence traités avec un pesticide à base de mercure entre 1971 et 1972.

Il n'en demeure pas moins que le mercure naturel peut entraîner localement des dommages tangibles au milieu naturel comme le prouvent les études faites [Rytuba (2000)] autour des drainages miniers acides (DMA). La dissolution du mercure contenu dans les sulfures, l'acidité induite par l'oxydation de ces derniers et les sulfates produits, facilitent la méthylation biologique. Le mercure ainsi libéré devient disponible pour rentrer dans le cycle biologique. Ainsi les DMA peuvent constituer une menace pour la chaîne trophique comme cela est constaté sur certains lacs américains pollués par d'anciennes mines de cinabre (Clear Lake, Californie).

## LA CHIMIE DU MERCURE DANS LES EAUX

Patrice Piantone BRGM – p.piantone@brgm.fr

Dans les eaux oxydées de surface, dans les zones non contaminées, le mercure se trouve à des concentrations de l'ordre de 5 à 100 pmol (soit 1 à 20 ppt). Il se présente sous diverses formes. Le partage entre le mercure dissous, colloïdal et particulaire, dépend très fortement du temps et de l'espace, des saisons et de la hauteur d'eau. Le mercure dissous est distribué selon plusieurs formes : le mercure élémentaire  $[Hg^{\circ}(aq)]$ , qui est volatil et peu réactif, les ions mercuriques  $[Hg(II)]$  complexés soit sous forme d'hydroxydes et de chlorures, en fonction des conditions du milieu, les composés méthylés  $[MeHg ; Me_2Hg]$  ou éthylés  $[EtHg]$  du mercure, et enfin sous forme de sulfure. En général, dans les masses d'eau stratifiées, l'espèce  $Hg^{\circ}(aq)$  est plus présente en surface, alors que les quantités totales de Hg et de MeHg sont plus élevées à l'approche des fonds. Les espèces organométalliques du mercure sont relativement stables. La réduction du mercure de  $Hg(II)$  vers  $Hg^{\circ}$  est un mécanisme important dans la soustraction du mercure à son cycle classique. Il existe deux mécanismes, la photoréduction, et la réduction par voie bactérienne. Les mécanismes de méthylation et de déméthylation sont bien connus dans l'hydrosphère. Il semblerait que les chances de méthylation dans les eaux oxiques soient très limitées, alors que la déméthylation soit très active, de part la photolyse et l'activité bactérienne. Dans les eaux anoxiques, comme le mercure est un métal chalcophile, il aura tendance à former, avec le soufre, des espèces aqueuses et des solides réduits tels que le cinabre ou métacinabre et des polysulfures de mercure. Ce mécanisme participe à la fixation minérale du mercure. Dans ces mêmes milieux, ce sont surtout les mécanismes de méthylation qui opéreraient. Ils seraient le fait des bactéries sulfato-réductrices [Morel *et al.* (1998)]. C'est sous cette forme méthylée qu'il serait le plus apte à se cumuler dans la chaîne alimentaire. ■



▲ **Cycle du mercure dans l'hydrosphère.**  
**BSR : Bactéries Sulfato-Réductrices.**  
*Mercury cycle in the hydrosphere.*  
*BSR (Bactéries Sulfato-Réductrices): sulphate-reducing bacteria.*



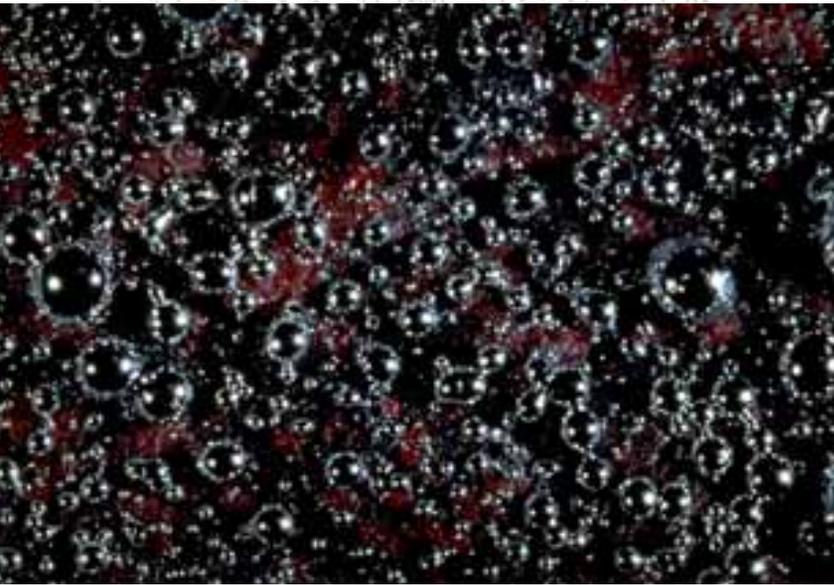
### Natural mercury and health

Although relatively scarce in the universe and having very few mineralogical species, mercury is actually found everywhere in the Earth's crust, air, water, and even in living organisms due to bioaccumulation. This distinctiveness can be ascribed to its physical-chemical properties: a liquid state at ambient temperature, a very low boiling point (357°C), a low vapour pressure that allows it to evaporate readily in most climates, a strong tendency to combine with chlorinated or sulphurated ions, and lastly, to form organometallic complexes.

In Europe, proscribing the use of mercury in industry counts among the measures for protecting human health, and it was interesting to raise

the question of the impact of natural mercury. Thus, the most significant natural impact is associated with volcanism, which produces peaks during large-scale eruptions. Volcanoes with a mercury production of 2,500 tonnes are annually responsible for 55% of atmospheric mercury of natural origin. But an important unknown quantity remains: how great is the contribution of undersea hydrothermal activity to the total amount in the hydrosphere? At present, on the basis of estimates made in various natural environments, mercury releases can be said to have tripled over the past 150 years. This means that, globally, two-thirds of the mercury present in the atmosphere and in the ocean is of human origin. Concerning natural mercury, it has no recognized impact on human health, except for personnel exposed in mercury mines (hydrargyrism). But the mercury cycle in the natural environment is not a closed one: despite heightened risk from bioaccumulation, mechanisms do exist that are capable of removing it from the natural environment. Thus, with the institution of environmental policies to substitute mercury and reduce releases, it can reasonably be hoped that several decades from now, we will witness a progressive decrease in atmospheric deposits and the amount of mercury accumulated in the biosphere. The process is already underway in the industrial nations, but a true challenge does remain, namely to curb mercury releases from coal-driven power plants, mainly in developing industrial countries.

“ Actuellement, il ne semble pas qu'il y ait eu de pathologie liée au mercure naturel... Les seules catastrophes connues sont liées à des faits d'origine anthropique...”



▲ **Gouttelettes de mercure sur cinabre (Almaden, Espagne).**  
Mercury droplets on cinnabar (Almaden, Spain).  
<http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/Main.html>

### Perspectives

Par rapport au mercure introduit dans la géosphère par l'activité anthropique, à l'exception des crises volcaniques, la participation du mercure naturel est relativement faible. Des interrogations subsistent cependant au niveau de l'origine du mercure présent dans la mer à l'exemple des valeurs mesurées dans certains poissons carnivores marins tels les thons jaunes [Kraepiel *et al.* (2003)]. Les teneurs en mercure de ces derniers, restées constantes sur plus de 35 ans malgré les fluctuations imposées par l'activité humaine, laissent supposer la participation d'une autre source pour le mercure contenu dans l'eau de mer : un apport hydrothermal sous-marin ?

À notre connaissance, il n'existe pas d'impact connu du mercure naturel sur la santé humaine si ce n'est, peut être, en relation avec son exploitation (hydrargyrisme des mineurs) et des utilisations très spécifiques comme colorant (le vermillon utilisé en peinture ou dans des cires pour colorer le sol des maisons méditerranéennes).

Le cycle du mercure anthropique dans le milieu naturel n'est pas en boucle fermée car il existe de nombreux mécanismes naturels assurant son piégeage.

Avec la mise en place de politiques environnementales visant à substituer le mercure et développer des technologies propres à diminuer les émissions, il est ainsi possible d'espérer, à l'échéance de quelques décennies, une décroissance progressive des dépôts atmosphériques et de la quantité de mercure cumulée dans la biosphère. Ce processus est déjà bien initié dans les pays industrialisés, mais le véritable challenge subsiste. Il consistera à limiter les émissions de mercure dues à la production d'électricité à base de charbon principalement en Inde et en Chine... ■

**Bibliographie :** A.M. L. Kraepiel, K. Keller, H.B. Chin, E.G. Malcom, F.M.M. Morel (2003) – Sources and variation of mercury in tuna. *Environmental Science and Technology*, 37, 5551 – 5558. D. Krabbenhoft et P. Schuster (2002) – Atmospheric mercury deposition during the last 270 years: A glacial ice core record of natural and anthropogenic sources. *Environmental Science and Technology*, 36, 2302 – 2310. F. M. M. Morel, A. M. L. Kraepiel et M. Amyot (1998) - The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 29, p. 543-566. D.B. Porcella, J.W. Huckabee, B. Wheatley (1995) – Mercury as a global Pollutant, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, Pays Bas, 1336 p. J.J. Rytuba (2000) – Mercury mine drainage and process that control its environmental impact. *The Science of the Total Environment*. 260, 57 – 71. Z. Xiao, J. Munthe, D. Stromberg, O. Lindqvist (1994) – Photochemical behavior of inorganic mercury compounds in aqueous solution. In *Mercury Pollution – Integration and synthesis*, ed. C. Watras, J. Huckabee, p. 581-592. Boca Raton, FL: CRC.



# Étude des risques sur les sites pollués : le rôle des processus naturels

Les polluants organiques sont soumis, dans les sols et les eaux, à des processus naturels (transport, sorption, dégradation) qui conditionnent leur devenir. La compréhension de ces processus est un point crucial permettant d'affiner le schéma conceptuel du site, et apportant par conséquent des informations de première importance pour élaborer le plan de gestion. Les points clés nécessaires pour observer et quantifier ces processus naturels sont détaillés dans cet article.



**Olivier Atteia**

INGÉNIEUR AGRONOME  
INSTITUT EGID  
atteia@egid.u-bordeaux.fr

**Alain Saada**

DOCTEUR EN CHIMIE  
SERVICE ENVIRONNEMENT  
ET PROCÉDÉS, BRGM  
a.saada@brgm.fr

Malgré la diversité des situations de pollution des sols ou des eaux souterraines, chacun comprend bien qu'avec le temps les polluants subissent des évolutions, qu'ils aient été introduits dans le sol à la suite d'un accident ou d'une fuite sur une installation, ou par lixiviation de déchets abandonnés sur le sol, placés dans un centre d'enfouissement technique ou dans une décharge.

Qu'il s'agisse de transfert par le mouvement des eaux souterraines, de processus d'absorption/décomposition, d'oxydoréduction, de transformations biologiques, plusieurs phénomènes agissent en concurrence. Leur modélisation étant complexe, certains ont pu considérer qu'il était plus expédient de « faire comme si » ces mécanismes n'existaient pas. Cette « approximation radicale » est clairement non rationnelle et il convient de poursuivre les programmes de recherche engagés pour développer des modélisations « réalistes » permettant d'apprécier les distances susceptibles d'être parcourues par les polluants, fixer les échelles de temps, mieux étayer la détermination des dispositifs de surveillance à mettre en place à « l'aval hydraulique » d'une source de pollution.

La compréhension des processus naturels (biodégradation, sorption...) qui déterminent, en l'absence d'intervention humaine, l'évolution des polluants introduits dans le sol

**Mesure de gaz sur une friche industrielle.**  
*Measuring gas in an industrial wasteland.*

© BRGM

(fuites, accidents, décharges) est essentielle pour estimer le devenir de la pollution sur un site. Ceci permet d'affiner le modèle de fonctionnement du site, et d'apporter des éléments utiles pour l'évaluation des risques et l'élaboration du plan de gestion du site. Toutefois, l'évaluation *a priori* de ces processus naturels, parfois appelés atténuation naturelle, nécessite une bonne connaissance du site, de la source de pollution, un suivi détaillé du panache de pollution et une estimation prédictive et fiable de l'évolution de celui-ci dans le contexte local du site.

### Historique et situation actuelle...

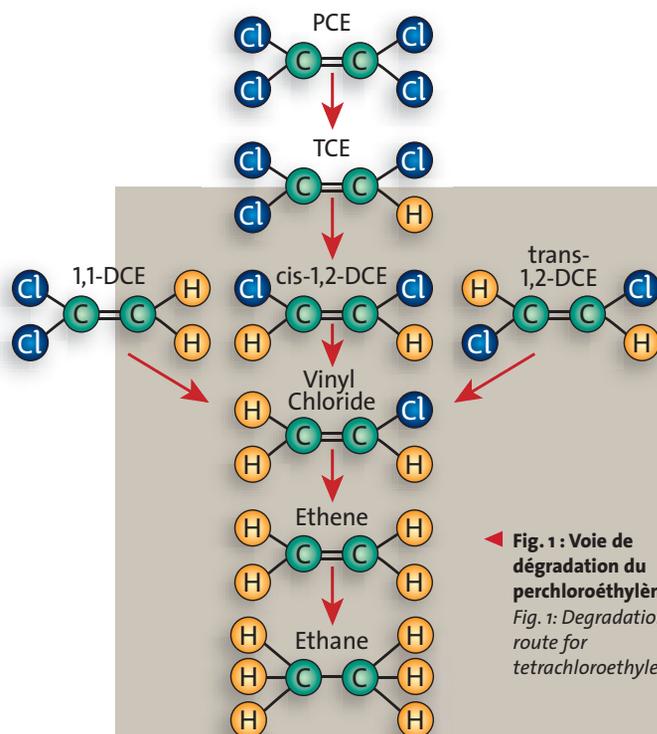
Au cours des années 90, le concept d'atténuation naturelle est sorti des laboratoires de recherche pour devenir un élément des modélisations communément utilisées pour la réhabilitation des sites contaminés aux États-Unis et dans certains pays européens, comme la Grande-Bretagne ou les Pays-Bas par exemple, et notamment la prévision de l'impact des stockages souterrains de produits pétroliers. En France, à l'heure actuelle, des réflexions sont conduites sur la manière de prendre en compte ces processus naturels (biodégradation, sorption...) dans l'évaluation du devenir de la pollution, afin d'affiner le modèle de fonctionnement du site, et apporter des éléments utiles pour une évaluation du risque réaliste et pour l'élaboration du plan de gestion du site. Il est donc nécessaire de bien cerner les différents mécanismes mis en jeu dans l'atténuation naturelle d'une pollution, afin d'être en mesure de quantifier son action sur un site donné, et notamment de pouvoir prédire l'extension maximale du panache et, éventuellement, la durée de restriction de l'usage de la ressource.

### Rôle majeur des conditions redox

Les réactions de biodégradation sont des réactions d'oxydoréduction et les conditions biogéochimiques du milieu vont conditionner l'efficacité de la biodégradation. Les hydrocarbures qu'ils soient légers comme les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes), ou lourds comme les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), sont oxydés lors de leur dégradation, les hydrocarbures lourds étant toutefois plus récalcitrants. Pendant de longues années, seules les réactions en milieu aérobie étaient étudiées et montraient une dégradation de ces différents hydrocarbures. Il a été démontré par la suite que ces hydrocarbures se dégradent à peu près dans toutes les conditions redox, même en l'absence d'oxygène, sous réserve que d'autres accepteurs d'électrons ou oxydants (nitrates, sulfates...) soient présents dans les eaux souterraines.

“ La compréhension des processus naturels qui déterminent, en l'absence d'intervention humaine, l'évolution des polluants introduits dans le sol est essentielle pour estimer le devenir de la pollution sur un site. ”

La dégradation des solvants chlorés est régie par des mécanismes plus complexes que pour les hydrocarbures. La dégradation des solvants chlorés se fait par élimination successive d'atomes de chlore. Le schéma de dégradation de la famille du perchloroéthylène (PCE) est donné sur la *figure 1*. Le PCE et le TCE (trichloroéthylène) ne se dégradent en conditions naturelles qu'en milieu très réducteur. Il semble que l'agent réducteur alors utilisé par les bactéries est l'hydrogène. Le dichloroéthylène (DCE) donne du chlorure de vinyle (CV) en conditions très réductrices, mais il peut aussi se transformer en Cl<sup>-</sup> et CO<sub>2</sub> en présence d'oxygène. Le CV a le même type de comportement, donnant de l'éthène en conditions très réductrices et pouvant aussi s'oxyder. Cependant, le CV est une molécule fille plus toxique que les substances mères et peut donc engendrer des risques plus importants si la dégradation n'est pas complète. Ainsi les conditions idéales de dégradation sont la présence d'un cœur de panache très réducteur conduisant à la



◀ Fig. 1 : Voie de dégradation du perchloroéthylène.  
Fig. 1: Degradation route for tetrachloroethylene.



◀ Mesures dans un piézomètre lors de l'opération de dépollution de la nappe à Mazingarbe, dans le nord de la France. Measurements in a piezometer during a groundwater de-pollution campaign in Mazingarbe, northern France.

© P. Lecomte, BRGM im@gé

disparition du TCE, le DCE et le CV étant dégradés en front de panache en conditions oxydantes. De ce fait, les deux risques majeurs de « défaillance » de l'atténuation naturelle pour les solvants chlorés sont :

I - la présence de PCE ou de TCE dans une zone aérobie du panache ne permettant pas la dégradation de ce type de polluant et

II - une dégradation incomplète conduisant à l'accumulation de CV dans l'aquifère.

Il existe aujourd'hui des outils, tels que ceux développés par l'US-EPA (Bioscreen et Biochlor), qui contiennent une feuille de calcul permettant de vérifier en première approche, si les conditions biogéochimiques favorables sont réunies sur le site, respectivement pour la dégradation des hydrocarbures et des solvants chlorés.

### Devenir de la source de pollution

L'ampleur des processus naturels a été mise en évidence aux États-Unis grâce à des statistiques effectuées sur l'extension des panaches de BTEX qui démontraient une extension pendant une dizaine d'années, une stagnation autour d'une taille de cinquante à cent mètres suivie d'une lente régression. Dans la première phase, la source produit plus de BTEX que ceux qui sont dégradés aux limites du panache. Ensuite on a un équilibre entre l'apport de la source et la consommation par dégradation ; enfin le flux sortant de la source décroît.

Ainsi la taille du panache à l'équilibre dépend fortement du flux sortant de la zone source. Or l'extension de cette zone ainsi que les concentrations de polluants au sein de celle-ci sont fort mal connues, et plusieurs années sont nécessaires pour déterminer si le panache est en phase d'accroissement ou stabilisé. Ces raisons

conduisent souvent à conseiller l'élimination de la source de pollution afin de mieux contrôler les processus naturels au sein du panache. Lorsque l'élimination de la source est impossible, un effort devra être porté sur la connaissance du terme source qui permettra de mieux prendre en compte l'atténuation des pollutions.

Des situations fort différentes peuvent se présenter en fonction du type de polluant. En présence d'une phase flottante de BTEX (produits plutôt solubles et donc mobiles), la localisation est facile et le mode de traitement classique, l'élimination de la source est donc une évidence. En présence de HAP (moins mobiles et plus stables), même en cas d'élimination d'une partie du sol, une source de pollution secondaire peut rester présente, au mur de l'aquifère, les HAP étant majoritairement plus denses que l'eau.

Dans le cas de pollutions historiques par des solvants chlorés, la phase organique est *a priori* présente au mur de la nappe et souvent très mal localisée (fig. 2). La mise en place d'un pompage simple à proximité de cette source peut avoir des effets néfastes. Ce pompage conduit souvent à un accroissement important des concentrations dissoutes proches de la source sans que les quantités de phase pure pompées soient significatives. Les alternatives sont de deux types : une localisation précise de la source et un traitement adapté, ou laisser

“ La modélisation peut constituer un excellent outil de compréhension des phénomènes et, dans certains cas, conduire à des prévisions fiables. ”



Face aux nouvelles exigences de l'expertise

## CPA Experts

apporte maîtrise technique  
et approche globale

- Construction - Bâtiment
- RC Professionnelle
- RC Produits
- Agro-Alimentaire
- TRC - Montage Essais
- Pollution

112 bis rue Cardinet 75017 Paris

Tél. : 01 53 70 14 60 - Fax : 01 53 70 84 45

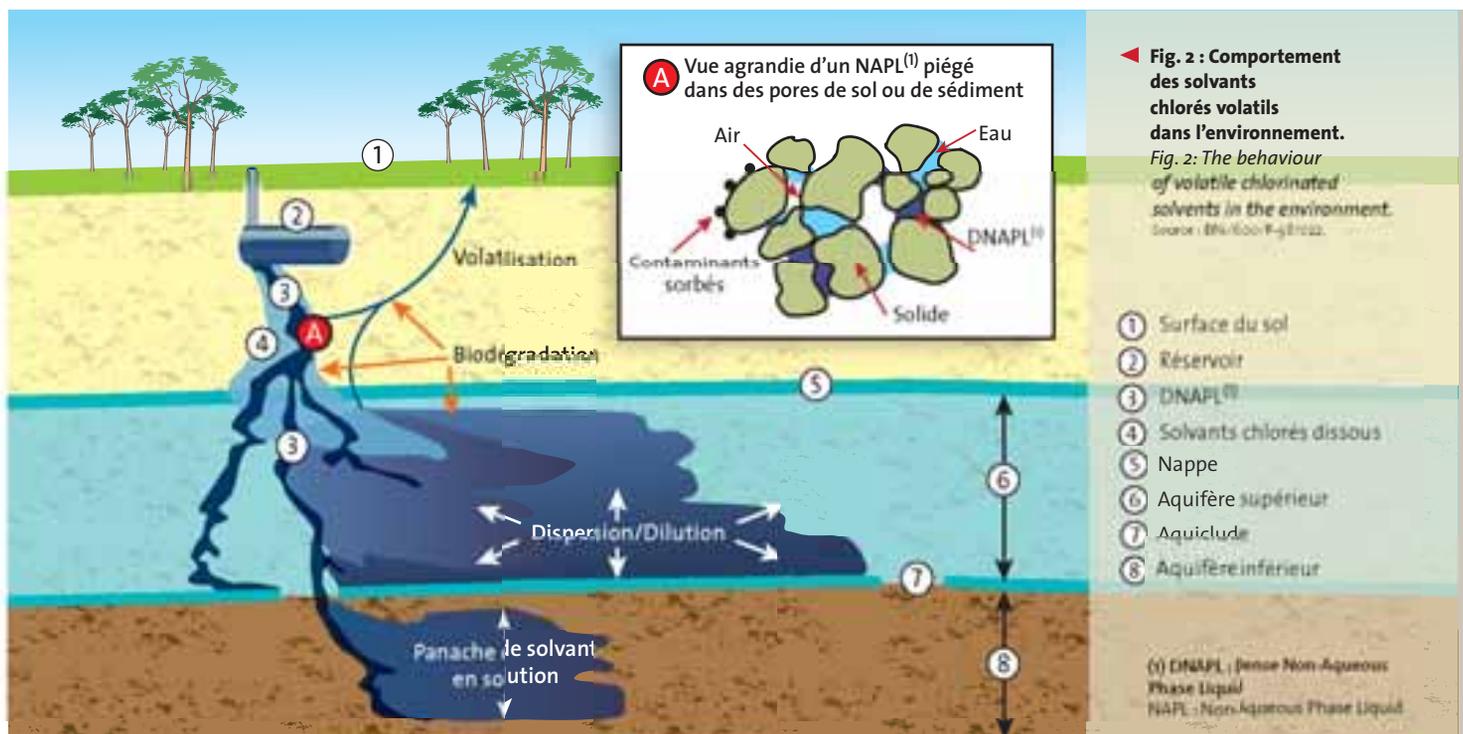
www.cpa-experts.com - Email : cpa@cpa-experts.com

la source en l'état en mettant en place un suivi détaillé des processus naturels occurrents.

Il est donc encore nécessaire de procéder à des recherches approfondies pour mieux quantifier les différents phénomènes. Ceci peut par exemple impliquer d'assurer sur quelques sites une évaluation de l'évolution du panache au moyen d'un réseau suffisant de surveillance des eaux souterraines (piézomètres implantés à l'aval hydraulique du site pollué).

Il est assez courant qu'un panache de pollution de plus de cent mètres de long fasse uniquement une dizaine de mètres de large. Les recommandations nord-américaines stipulant d'installer des lignes de piézomètres en travers du panache constituent un moyen d'obtenir une bonne caractérisation de l'extension latérale du panache. En outre, il pourra être nécessaire d'évaluer son extension verticale, en ayant recours à des équipements permettant de mesurer la qualité des eaux souterraines à différentes profondeurs (dispositifs en flûte de pan, par exemple). Cette caractérisation en trois dimensions du panache au cours du temps permettra de réaliser un bilan de masse précis sur différentes sections de l'aquifère, qui reste la meilleure preuve de la diminution massive de la quantité de polluants dans le panache, et par conséquent de l'efficacité de l'atténuation naturelle.

Dans une stratégie de recherche, le suivi temporel détaillé est aussi indispensable sur une durée de cinq





**Vue panoramique d'une friche industrielle (Nord-Pas-de-Calais).**  
*Panoramic view of an industrial wasteland (Nord-Pas-de-Calais).*

© Jean-Christophe Gourry

ou dix années. En effet, les sources de pollution sont souvent de composition complexe et, sur la majorité des sites, il existe une variation temporelle importante de la composition de l'eau en aval de la source. Un composé peut ainsi disparaître au cours d'une saison, en raison de la modification des écoulements, ce qui, sans suivi temporel, pourrait être interprété comme étant de l'atténuation naturelle.

### Intérêt et limites de la modélisation

Les spécialistes conviennent que la modélisation des processus de transport dans des aquifères hétérogènes est extrêmement complexe et par conséquent difficile à valider. L'atténuation naturelle faisant appel, outre le transport des polluants, à de nombreuses réactions, physiques (adsorption), chimiques et biologiques (dégradation, développement bactérien...), la modélisation de l'ensemble des processus est presque une gageure car la modélisation est nécessairement simplificatrice. Cependant, accompagnée de certains garde-fous, la modélisation peut constituer un excellent outil de compréhension des phénomènes et, dans certains cas, conduire à des prévisions fiables.

Sur la majorité des sites, la modélisation doit être abordée comme une technique heuristique, c'est-à-dire permettant de procéder par approches successives et de ne conserver que les hypothèses conduisant à un résultat proche de l'observation. Il est intéressant de rechercher toutes les possibilités qui peuvent mener aux concentrations observées sur le site. Avant d'attribuer une baisse de concentration au phénomène de dégradation, un regard attentif sur la dispersion ou le retard de certaines substances permet de modéliser une partie du comportement observé. Pour cette approche, les outils de l'EPA tels que Bioscreen et Biochlor sont tout à fait adaptés : ils permettent un travail rapide et s'inscrivent dans une démarche plutôt globale.

Sur les rares sites très documentés (indications sur les concentrations de toutes les espèces y compris les don-

## ► SOLS POLLUÉS – SANTÉ : QUELS ENJEUX ?

Jean-Luc Perrin et Dominique Gilbert

Bureau de la Pollution des Sols et des Pollutions Radioactives  
Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques, MEDD

Historiquement, la prévention des risques chroniques dont les sols pollués, au cœur des missions de l'inspection des installations classées, est partie de soucis de santé ou de salubrité. La loi de 1917 et le décret impérial de 1810, ancêtres du système actuel réglementaire, s'appliquaient aux « établissements dangereux, insalubres et incommodes ».

Les pouvoirs publics se sont organisés et ont mis en œuvre un ensemble de mesures pour réduire constamment l'exposition des populations aux pollutions et aux substances toxiques :

- actions de réduction des émissions des sources industrielles ou mobiles,
- amélioration de la qualité des produits par réduction de la teneur en substances toxiques (ex. combustibles), et limitation, voire interdiction, de l'usage de certaines substances (amiante, mercure...),
- suivi de la qualité des denrées alimentaires qui constituent la principale contribution au niveau global d'exposition,
- contrôle et amélioration de la qualité des différents milieux de vie (ex. qualité de l'air des agglomérations et des zones industrielles, objet de réglementations et de mesures de gestion particulières).

Les sols ont été longtemps considérés comme des milieux épurateurs, propres à accueillir toutes sortes de résidus alors qu'ils constituent, par nature, des milieux intégrateurs de toutes les pollutions. Au regard de trois siècles d'activité industrielle, le milieu sol est aujourd'hui enfin reconnu comme un milieu à part entière, à protéger et à surveiller.

L'affaire Métaeurop Nord a ainsi récemment conduit à une prise de conscience collective des enjeux financiers liés au passif environnemental en matière de sols pollués des activités industrielles. Le ministère de l'Écologie et du Développement Durable, qui définit et met en œuvre la politique publique en matière de sols pollués, a procédé, en concertation avec les acteurs concernés, à l'évaluation de sa politique dans ce domaine sur la base d'un retour d'expérience et propose actuellement une évolution de celle-ci. ■

<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>

neurs et accepteurs d'électrons, sur plusieurs dizaines de forages), un travail de modélisation plus détaillé peut être envisagé avec quelques outils qui permettent d'étudier le transport réactif en deux ou trois dimensions (RT3D, Phast, Feflow...). Ces modèles nécessitent une prise en main assez longue et conduisent à des résultats très variables selon le schéma réactionnel considéré. Il est possible d'avoir une certaine confiance dans les résultats obtenus si l'on applique deux règles de base de la modélisation : avoir toujours beaucoup plus de données que de variables à ajuster, et conserver des données situées en dehors de la fenêtre de calage afin qu'elles puissent être utilisées pour la validation du modèle. Or la nécessité de contrôler l'impact d'un site et donc de connaître les transferts conduit presque systématiquement à mettre en place à l'aval



### **The role of natural processes in assessing risks on polluted sites**

*Pollutants in soil and water, whatever their source and type, are clearly subject to alterations through the simultaneous action of a variety of mechanisms, among them transport by water, sorption, degradation and redox reactions. As building mathematical models that take all these mechanisms into account is an extremely complex undertaking, it is tempting to proceed as though such mechanisms did not exist. Such a simplistic approach, however, inevitably leads to overestimating the pollution's impact and accordingly to unreliable predictions of how contamination is liable to evolve over time. Understanding these natural*

*processes is therefore crucial to determine the outcome of pollutants, to enable a realistic conceptual model to be built for the site and to provide useful elements for risk assessment and the development of a site management plan. The aim of this paper is to focus on the key points that must be examined in order to quantify these natural processes. Firstly, biogeochemical conditions at the site must be determined so as to ascertain whether biodegradation of pollutants can occur there. For chlorinated solvents, strongly reducing conditions are necessary for dechlorination to occur, whereas for hydrocarbons and PAHs, which are oxidized during degradation, electron acceptors such as oxygen and nitrates are required. Secondly, the source of the pollution must, when possible, be removed, or at least accurately characterized and well controlled, especially if a pure organic phase is involved. Thirdly, the plume must be monitored effectively. The objectives of this monitoring are i) to determine whether the plume is expanding, stable, or shrinking and ii) to calculate the pollution mass balance accurately in order to demonstrate the efficiency of natural attenuation. Finally predictive modelling is necessary to estimate the maximum future extension of the plume and to define the plume monitoring plan. Depending on the problem's complexity, simple analytical tools or more complex numerical ones will be appropriate.*

« La démarche française de gestion des sites pollués est basée sur l'atteinte d'objectifs de réhabilitation et sur l'utilisation d'études de risque « réalistes » »

hydraulique un réseau de piézomètres où seront effectuées des mesures chaque trimestre ou chaque semestre. L'exploitation pendant une durée suffisante de ces dispositifs apporte un volume d'informations considérable qui trouve ici une utilité supplémentaire.

Face à une situation où un panache de pollutions apparaît stable ou en voie de régression, il n'est souvent pas simple d'apprécier si la cause est la résorption du « terme source » ou « l'atténuation naturelle des polluants émis vers le milieu ». Au demeurant, s'il est confirmé que le panache est en phase de régression, l'effort doit être porté sur l'estimation du temps nécessaire à sa résorption, et être jugé par rapport à la possibilité de conserver des conditions favorables pendant la durée suffisante, par exemple en maîtrisant la pression foncière. Si cette durée est de l'ordre de quelques dizaines d'années (en Grande-Bretagne, trente ans), la situation reste gérable. Au-delà, la gestion du problème devient plus aléatoire, à la fois pour des raisons techniques (fiabilité des modèles « prédictifs ») et administratives. La gestion de l'espace, fortement liée à la gestion du temps, dépend aussi du contexte socio-politique : type de ressource, usage à préserver. Là aussi, le fait de s'assurer que le panache est en voie de régression est primordial, puisque cela conditionne le fait qu'il n'y ait pas d'augmentation des risques s'il n'y a pas changement de l'usage de l'enjeu ou des eaux souterraines.

Un des points clés à prendre en compte dans le suivi des processus d'atténuation naturelle concerne le risque d'engendrer au cours de la dégradation une augmentation du risque sanitaire (par apparition de substances filles plus toxiques, accroissement de la mobilité). Ces risques méritent donc une attention particulière. Le risque d'extension de la pollution pourra être maîtrisé par un suivi à des fréquences rapprochées de l'évolution du panache au démarrage de la phase de surveillance permettant d'agir en temps et en heure en cas de dégradation de la situation. L'accumulation de métabolites toxiques concerne essentiellement les solvants chlorés de la famille du PCE, dont la dégradation peut conduire à une accumulation de CV. Ce métabolite doit par conséquent être suivi avec une attention particu-

lière au cours de la surveillance. Pour la famille des hydrocarbures, la dégradation se traduit par une diminution de la taille des molécules, ce qui induit une diminution de toxicité.

La démarche française de gestion des sites pollués est basée sur l'atteinte d'objectifs de réhabilitation et sur l'utilisation d'études de risque « réalistes », c'est-à-dire en cherchant à déterminer les valeurs les plus probables des paramètres et non à introduire à chaque stade du raisonnement des « coefficients de sécurité » non identifiés. La limitation de la prise en compte des processus naturels pour l'évaluation du devenir d'une pollution n'est donc pas tant d'ordre réglementaire que technique. Dans ce domaine, toutes les substances ne sont pas logées à la même enseigne. Si pour certaines, il existe un recul suffisant, pour d'autres, tout reste à faire. Quoi qu'il en soit, ce qui n'est pas encore possible aujourd'hui techniquement ou économiquement, peut le devenir à terme et la compréhension des processus naturels reste primordiale pour l'évaluation du fonctionnement du site. C'est tout l'enjeu des travaux menés actuellement dans ce domaine par de nombreuses équipes de recherche. ■



Même si elle n'a pas été polluée, une eau souterraine ne présente pas forcément un niveau de qualité qui la rendrait propre à la consommation. En effet, dans certains contextes géologiques particuliers, l'eau s'enrichit naturellement en éléments toxiques ou indésirables pour la santé humaine. Il en résulte des concentrations qui, naturellement, dépassent les normes de potabilité. Une bonne gestion des ressources en eau et des usages nécessite de comprendre ces phénomènes et de les localiser.

**La source du Lison, dans le Doubs.**  
*The Lison River spring in the Doubs Department.*  
© BRGM im@gé

# L'eau souterraine est-elle toujours potable à l'état naturel ?



**Ariane Blum**

HYDROGÉOLOGUE  
SERVICE EAU – BRGM  
a.blum@brgm.fr

**Laurence Chery**

HYDROGÉOCHIMISTE  
SERVICE EAU – BRGM  
l.chery@brgm.fr

**Hélène Legrand**

CHARGÉE DE MISSION  
BUREAU DE LA PROTECTION DES RESSOURCES  
EN EAU ET DE L'AGRICULTURE  
DIRECTION DE L'EAU – MEDD  
Helene.LEGRAND@ecologie.gouv.fr

L'eau souterraine, en fonction de la nature des sols et sous-sols dans lesquels elle a transité, peut s'être chargée en éléments chimiques indésirables. Dans le Puy-de-Dôme, par exemple, sur les 1 200 sources et forages, environ 10 à 15 % des points d'eau présentent des traces d'arsenic d'origine naturelle, à un taux parfois supérieur à 10 µg/L, norme de potabilité.

La connaissance du fond géochimique naturel d'une eau souterraine a pris une importance particulière avec le renforcement des normes sur l'eau potable, en 1998, et surtout avec la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE). En imposant, à échéance 2015, que les masses d'eau souterraine atteignent le « bon état », c'est-à-dire reviennent à leur état de référence, la DCE nous conduit à développer les moyens scientifiques d'évaluation de cet état naturel, notamment pour mieux estimer l'impact des activités humaines et son évolution.

En France métropolitaine, 62 % des volumes prélevés pour l'alimentation en eau potable proviennent des nappes. Dans de nombreuses communes, seules les eaux souterraines assurent l'approvisionnement en eau potable comme en témoignent les 35 000 captages répartis sur le territoire national. Les eaux souterraines constituent donc une réserve

stratégique pour la production d'eau potable dont la qualité est étroitement liée à la santé humaine.

Pour être distribuées, les eaux doivent respecter les normes de qualité imposées par la Directive européenne 98/83/CE et par son décret d'application en droit français (n° 1220 du 20 décembre 2001). Parmi les substances couvertes par ces textes figurent des substances minérales (*tableau 1*) dont les sources peuvent être doubles : naturelles et liées au contexte géologique d'une part, anthropiques et liées aux rejets des activités humaines d'autre part (rejets industriels, urbains ou encore épandages agricoles). La gestion de l'eau potable et la distribution d'une eau propre à la consommation humaine nécessitent donc de bien connaître l'origine de chaque élément et de pouvoir notamment distinguer les apports anthropiques des niveaux naturels de concentration. Ce constat est d'autant plus important que pour certaines substances minérales, il arrive que les concentrations dans les eaux souterraines dépassent naturellement les normes de qualité.

Dans ce contexte, la connaissance des états de référence, ou « fond géochimique », de chaque aquifère exploité pour la production d'eau potable est essentielle et a depuis longtemps conduit les pouvoirs publics à mener des études visant à :

- mieux comprendre le lien entre concentrations en éléments minéraux dans les eaux souterraines et environnement géologique [Chery (2006)],
- développer une méthode permettant de définir les états de référence des systèmes aquifères [Chery (2006)],
- cartographier les zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces minéraux [Chery et Gateau (1998) ; Brenot *et al.* (2006)].

### Concentrations en éléments mineurs dans les eaux souterraines

Les études de synthèse menées au niveau français [Chery (2006)] comme au niveau européen [projet BRIDGE ; Blum *et al.* (2006)] montrent que parmi les paramètres classés comme « chimiques » dans le décret n° 1220 du 20 décembre 2001, seuls l'arsenic, l'antimoine, le nickel, le sélénium, le fluor, et dans une moindre mesure le bore, sont susceptibles de dépasser naturellement dans les eaux souterraines les normes de qualité pour l'eau potable, et de poser ainsi des problèmes de santé. Pour tous les autres éléments, les concentrations ne dépassent pas, en règle générale, à l'état naturel, les normes de qualité. Fer et manganèse,

« La connaissance des états de référence, ou « fond géochimique », de chaque aquifère exploité pour la production d'eau potable est essentielle. »

**Tableau 1 : Normes de qualité des éléments minéraux susceptibles d'être naturellement présents dans les eaux souterraines.**

Table 1: Quality standards for mineral elements liable to occur naturally in groundwater.

	Élément	France, décret 2001-1220 µg/L	Directive 98/83/CE µg/L	Risque(s) associé(s)
Paramètres indicateurs	Al	200	200	Coloration, goût, maladie d'Alzheimer ? Encéphalopathies myocloniques
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	100	500	Odeur, goût
	Fe	200	200	Coloration, goût
	Mn	50	50	Formation de dépôts noirs
Paramètres chimiques	Sb	5	5	SbO <sub>3</sub> : cancer, réduction de la durée de vie ?
	As	10	10	Toxique, cancérogène (cutané)
	Ba	700	-	-
	B	1 000	1 000	Irritations gastro-intestinales Troubles de la reproduction ?
	Cd	5	5	Accumulation dans les reins Cancérogène (en inhalation)
	Cr	50	50	Cancer du poumon, génotoxicité
	Cu	2 000	2 000	Irritations intestinales Cirrhoses chez certaines personnes
	F	1 500	1 500	Fluorose dentaire et/ou squelettique
	Hg	1	1	Organique : affection du système nerveux central Inorganique : reins
	Ni	20	20	Allergène Inhalation : asthme, cancérogène, mutagène
	Pb	10	10	Aigu : système nerveux central, moelle osseuse, appareil digestif Chronique : système nerveux central (saturnisme)
	Se	10	10	Aigu : atteintes cutanées, respiratoires Chronique : appareil digestif, troubles neurologiques, dentaires Essentiel à faibles doses, toxique à doses élevées



éléments ubiquistes dans les roches, les sols et les eaux souterraines, ne sont pas présentés dans cet article, en raison de leur faible toxicité.

Afin de mieux comprendre l'origine d'éléments susceptibles de poser des problèmes pour la santé humaine et dont les concentrations dans les eaux souterraines peuvent dépasser les normes (arsenic, fluor, antimoine, sélénium et nickel), une description du contexte géologique favorable à leur présence est proposée dans les paragraphes suivants. Des exemples de niveaux de concentrations naturelles élevées en France et en Europe sont présentés.

### Antimoine (Sb)

Le trioxyde d'antimoine serait peut-être cancérigène et causerait des troubles réduisant la durée de la vie. Bien que l'antimoine soit peu abondant dans les roches comme dans les eaux souterraines, il arrive que, dans certains contextes géologiques particuliers, les concentrations dépassent 1 µg/L. Dans ces zones très localisées riches en antimoine, celui-ci est souvent associé au plomb (sulfo-antimoniures de plomb). Certaines eaux thermales peuvent contenir de fortes concentrations en antimoine (jusqu'à quelques centaines de µg/L en milieu volcanique principalement).

En France, des concentrations naturelles élevées en antimoine dans les eaux souterraines ont été observées dans plusieurs massifs comme l'Ardèche (27 µg/L dans des zones plombifères), les Alpes (quelques µg/L dans le massif de Belledonne) ou encore le Cap Corse (10 à 12 µg/L).

### Arsenic (As)

L'arsenic est un élément toxique. Il a été reconnu comme cancérigène par les spécialistes et est associé à divers symptômes comme des atteintes cutanées, des troubles cardio-vasculaires ou encore des atteintes pulmonaires. Notons que la forme trivalente de l'arsenic (As<sup>III</sup>) est plus toxique que la forme pentavalente (As<sup>V</sup>), et que les formes organiques sont les moins nocives. Ainsi, pour apprécier la toxicité de cet élément dans un point d'eau, il peut s'avérer nécessaire de réaliser sur le terrain des séparations As<sup>III</sup>/As<sup>V</sup> afin de déterminer la spéciation de l'élément.

Des concentrations dans les eaux souterraines de quelques µg/L à quelques dizaines de µg/L en arsenic sont assez fréquentes. Ce sont principalement dans les aquifères de socle et les aquifères sédimentaires, où existent des filons sulfurés, que les eaux souterraines sont susceptibles de présenter des concentrations

naturelles en arsenic élevées (fig. 1). Les conditions d'oxydoréduction jouent un rôle majeur dans la mise en solution de l'arsenic (voir Géosciences n° 2).

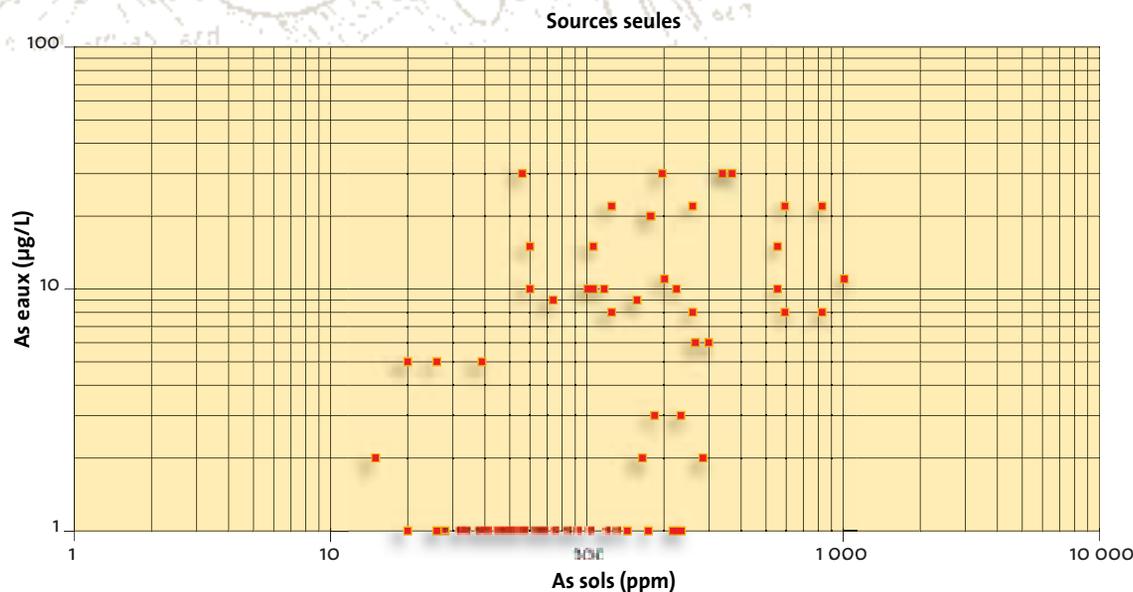
En France, dans plusieurs massifs granitiques, la présence d'arsenic naturel dans les eaux souterraines est connue. C'est par exemple le cas de zones granito-neissiques de l'Auvergne (jusqu'à 84 µg/L) ou des massifs des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc (jusqu'à 28 µg/L). Des teneurs de 100 à quelques centaines de µg/L ont également été relevées dans des milieux sédimentaires, comme dans l'aquifère du Bathonien supérieur et du Callovien dans le Haut-Rhin où la

### ► DURETÉ DE L'EAU : INCIDENCE SUR LES MALADIES CARDIO-VASCULAIRES ET LES ACCIDENTS VASCULAIRES CÉRÉBRAUX

Hélène Pauwels Service Eau, BRGM – h.pauwels@brgm.fr

La dureté d'une eau révèle sa capacité à réagir avec le savon pour produire de la mousse. Du point de vue du géochimiste, la dureté est la concentration totale en Ca + Mg exprimée en équivalent CaCO<sub>3</sub>. L'eau est douce lorsque sa dureté est inférieure à 60 mg/L et très dure au-delà de 180 mg/L. La dureté s'acquiert au cours de l'interaction de l'eau avec la roche. L'eau de pluie est très douce, mais lors de son infiltration, le CO<sub>2</sub> qu'elle contient (CO<sub>2</sub> atmosphérique et CO<sub>2</sub> produit par la désintégration de la matière organique contenue dans le sol) entraîne l'altération des minéraux qui accroît sa dureté. Ainsi, l'eau souterraine est plus dure que les eaux des rivières dont la dureté dépend de la contribution des eaux souterraines à leur débit. La nature du milieu géologique est un facteur important : les eaux des aquifères carbonatés sont plus dures que celles des aquifères des grès et des sables, elles-mêmes plus dures que les eaux des régions de socle (granite) ou volcaniques. L'eau dure présente des désagréments à l'utilisation, notamment par la formation des dépôts calcaires lorsqu'elle est chauffée. Par ailleurs, elle augmenterait la fréquence d'apparition de dermose

atopique, mais l'utilisation accrue de savon qu'elle nécessite pourrait être la véritable responsable. La consommation directe et l'utilisation en cuisine d'une eau dure contribueraient à la protection contre les maladies cardio-vasculaires et les accidents vasculaires cérébraux. Dès la fin des années 50, l'influence possible de la dureté sur la diminution du taux de décès par apoplexie a été constatée au Japon. Depuis lors, les études ont montré que c'est plus particulièrement le Mg, qui exercerait ce rôle préventif. Des corrélations inverses ont été mises en évidence entre le taux d'apparition d'infarctus du myocarde et la teneur en Mg (par exemple en Suède, Finlande, Espagne). Une étude récente (Ferrándiz *et al.*, 2004) montre que le rôle du Mg serait plus important face aux accidents vasculaires cérébraux que face aux accidents cardio-vasculaires. La teneur en Ca (par exemple 100 mg/L) d'une eau dure reste néanmoins un atout alors que les déficiences en Ca sont fréquentes chez les personnes âgées, et notamment chez les femmes pour qui la ménopause entraîne une baisse du taux d'absorption du Ca par l'organisme. ■



◀ **Fig. 1 : Relation entre la géochimie des sols et les concentrations dans les eaux pour l'arsenic en Auvergne et Limousin.**

D'après Barbier et Chery, 1997.

*Fig. 1: Relationship between soil geochemistry and arsenic concentrations in water in the Auvergne and Limousin regions.*

From Barbier and Chery, 1997.

présence de filons riches en éléments sulfurés explique ces occurrences. D'autres États européens sont également concernés par la présence d'arsenic naturel dans les eaux souterraines [Blum *et al.* (2006)]. C'est le cas de la Bulgarie (jusqu'à 10-20 µg/L dans les massifs cristallins), de la Belgique où la médiane des concentrations en arsenic dans l'aquifère sableux du Néogène est de 6 µg/L (valeurs maximales de quelques dizaines de µg/L), ainsi que la Hongrie où dans les niveaux les plus profonds (> 100 m) du bassin pannonien, plus de la moitié des captages présentent des teneurs en arsenic supérieures à la norme de 10 µg/L. La présence d'hydroxydes d'arsenic et les conditions réductrices du milieu expliquent ces valeurs.

### Nickel (Ni)

Le nickel est un allergène connu depuis longtemps. Il agit principalement par voie cutanée et par ingestion d'aliments et d'eau de boisson. Mais cette dernière source ne représente que 10 % de l'exposition journalière. Un certain nombre d'eaux d'alimentation, naturellement riches en nickel, ont des concentrations qui dépassent la norme de potabilité, et certains captages doivent donc être abandonnés. Il existe d'autres effets du nickel, en particulier suite à une exposition par voie respiratoire. Son inhalation peut provoquer de l'asthme et est, à forte dose, cancérigène. Des effets mutagènes ont également été mis en évidence.

Le nickel, élément relativement abondant dans les roches, se substitue facilement au fer et au magnésium dans les roches ferromagnésiennes. Il est ainsi principalement présent dans les minéraux sulfurés comme la pyrite (Fe,Ni)<sub>2</sub> ou la pentlandite (Fe, Ni)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>.

Dans les eaux souterraines, les concentrations en nickel sont généralement inférieures à quelques µg/L,

même pour des eaux issues de milieux potentiellement riches en nickel comme les basaltes à olivine. Des concentrations de quelques dizaines de µg/L sont tout de même possibles en particulier lorsqu'il y a réduction de la pyrite ou réduction d'oxydes de fer et de manganèse. C'est ainsi le cas des eaux de l'aquifère de la craie du bassin Artois-Picardie où les teneurs en nickel atteignent 100 µg/L. Le passage en captivité de la nappe explique ces anomalies.

La présence de nickel naturel dans les eaux souterraines est également observée dans d'autres aquifères crayeux européens. C'est le cas du bassin de Londres au Royaume-Uni (quelques µg/L) ou du Danemark où les concentrations atteignent 42 µg/L [Hinsby *et al.* (2003) dans Blum *et al.* (2006)].

“ Seuls l'arsenic, l'antimoine, le nickel, le sélénium, le fluor, et dans une moindre mesure le bore, sont susceptibles de dépasser naturellement dans les eaux souterraines les normes de qualité pour l'eau potable. ”

### Sélénium (Se)

Le sélénium est un élément à la fois essentiel et toxique. C'est un oligo-élément entrant dans la composition de protéines indispensables mais c'est aussi, à certaines doses, un élément nocif. Une intoxication au sélénium peut se manifester par des symptômes assez secondaires comme des atteintes cutanées ou respiratoires.

## ► SELENIUM MEDICAL GEOLOGY

**Fiona Fordyce**

ENVIRONMENTAL GEOCHEMIST  
BRITISH GEOLOGICAL SURVEY  
fmf@bgs.ac.uk

The naturally occurring element selenium (Se) is essential to human and other animal health in trace amounts but is harmful in excess.

Of all the elements, Se has one of the narrowest ranges between dietary deficiency ( $< 40 \mu\text{g day}^{-1}$ ) and toxic levels ( $> 400 \mu\text{g day}^{-1}$ ) [WHO (1996)] making it necessary to carefully control intakes by humans and other animals. Although Se is released to the environment from its use in the ceramic, pigment, photocopier and pharmaceutical industries, it is geology that exerts a fundamental control on the distribution of the element in the soils on which we grow the crops and animals that form the human food chain. Since diet is the most important source of Se in humans, the Se-status of crops, animals and therefore populations varies markedly around the world as a result of different geological conditions. Se concentrations in most rock types are very low ( $< 0.1 \text{ mg kg}^{-1}$ ), however, very high concentrations ( $\leq 600 \text{ mg kg}^{-1}$ ) have been reported in some phosphatic rocks, coals, black shales and mineralised areas [Plant *et al.* (2004)]. In animals and humans, selenium forms a vital constituent of the biologically important enzyme glutathione peroxidase (GSH-Px) and to date approximately 25 essential selenoproteins have been identified [Rayman (2005)]. Selenium deficiency, which is widespread in many parts

of the world, has been implicated in white muscle disease in animals and in a host of conditions in humans including cancer, a heart disease called Keshan Disease which occurs in China, Kashin-Beck disease, a bone and joint disorder found in Russia and China, immune system function, reproduction and thyroid function. In contrast, selenium toxicity, or selenosis, occurs rarely and has been reported in areas underlain by black shales and coals in the USA, China and Venezuela, and causes alkali disease in animals, and vomiting, diarrhoea, hair (photo 1) and

nail loss and nervous disorders in humans [Fordyce (2005)]. Work into the causes of Keshan Disease has proved that Se deficiency allows viruses to mutate. This is of increasing importance as recent evidence suggests that new strains of the influenza virus and avian flu are emerging in Se-deficient regions and that Se supplementation protects against these viruses [Beck *et al.* (2003)]. Recent work has also shown better health outcomes in HIV-AIDS patients given Se supplements [Kupka *et al.* (2004)], which is significant given the link between Se-deficient environments and areas where the disease is prevalent in Africa and Asia. Looking to the future, understanding the biogeochemical controls on the distribution and mobility of environmental Se is key to the assessment of Se-related health risks. Although overt clinical symptoms of Se toxicity and deficiency are rarely reported, the possible sub-clinical effects are at present poorly understood and should not be underestimated as medical science continues to uncover new essential functions for this biologically important element. ■



▲ **Photo 1: Hair loss as a result of selenium toxicity (China).**  
Photo 1 : Chute de cheveux due à la toxicité du sélénium (Chine).

© NERC BGS - Prof. Mao Dajun.

**References:** M.A. Beck, O.A. Levander and J. Handy (2003) – Selenium deficiency and viral infection 1. *Journal of Nutrition*, vol. 133, p.1463S-1467S. F.M. Fordyce (2005) – Chapter 15: Selenium deficiency and toxicity in the Environment. In: O. Selinus (editor). *Essentials of Medical Geology*. Academic Press, London, p. 373-415. R. Kupka, G.I. Msamanga, D. Spiegelman, S. Morris, F. Mugusi, D.J. Hunter and W.W. Fawzi (2004) – Selenium status is associated with accelerated HIV disease progression among HIV-1-infected pregnant women in Tanzania. *Journal of Nutrition*, vol. 134, no. 10, p. 2556-2560. J.A. Plant, D. Kinniburgh, P. Smedley, F.M. Fordyce and B. Klinck (2004) – Chapter 9.02: Arsenic and Selenium. In: B. Sherwood Lollar (editor). *Environmental Geochemistry*. H.D. Holland and K.K. Turekain (exec. editors). *Treatise on Geochemistry Series*, vol. 9, Elsevier, Amsterdam, p. 17-66. M. Rayman (2005) – Selenium in cancer prevention: a review of the evidence and mechanism of action. *Proceedings of the Nutrition Society*, vol. 64, p. 527-542. **World Health Organisation (1996)** – Trace elements in human nutrition and health. World Health Organisation, Geneva.

D'un point de vue chronique, des troubles gastro-intestinaux, des atteintes dentaires ou encore des anomalies neurologiques ont pu être observés. Aucun effet cancérigène n'a été établi. Dans ce contexte, la réglementation française et européenne impose une concentration maximale en sélénium pour l'eau distribuée de  $10 \mu\text{g/L}$ .

Les propriétés chimiques du sélénium sont proches de celles du soufre. Il est souvent associé au fer ou

à l'uranium. En présence de fer, il est susceptible de co-précipiter pour former de la ferrosérite  $\text{FeSe}_2$ . Les formes les plus oxydées peuvent être adsorbées sur des oxydes ferriques.

La présence de minéraux de sélénium est souvent associée à la présence de gisements d'uranium. Une telle association se rencontre dans des grès, sables ou conglomérats à restes de plantes correspondant à d'anciens dépôts fluviaux. Le sélénium est généralement

Matériels d'étude, surveillance et diagnostic pour :

**EAUX SOUTERRAINES, EAUX SUPERFICIELLES, SOLS, SEDIMENTS, DECHETS...**

### ... Mesure - Télémessure



Mini/Micro/Céra/CTD-Diver



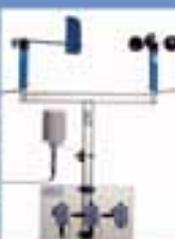
Relevé de sondes Diver sur le terrain



Modem GSM e+serie



Humidimètre TDR



Station météo GPRS

### ... Echantillonnage



Pompe péristaltique autonome



Pompe 12 Volts



Bailers



Bennes à sédiments



Carottier motorisé



Z.I. de la gare 37310 Reignac sur Indre (France-Europe)

Tél : 00 33 (0)2 47 94 10 00

Fax : 00 33 (0)2 47 94 17 13

WEB : [www.sdec-france.com](http://www.sdec-france.com)

Mail : [info@sdec-france.com](mailto:info@sdec-france.com)

PUBLICITÉ

sous forme de ferrosélide  $\text{FeSe}_2$  et de sélénium natif. Le front d'oxydoréduction (interface milieu oxydant – milieu réducteur) est la zone la plus riche en sélénium.

Dans les eaux souterraines, le sélénium est relativement rare mais dans certains contextes particuliers, des concentrations supérieures aux normes de qualité sont possibles. En France, les plus fortes concentrations connues sont celles des sources hydrothermales de la Roche-Posay (jusqu'à 60  $\mu\text{g/L}$ ) dans le département de la Vienne. D'autres anomalies ont également été mises en évidence dans le Bassin parisien [jusqu'à 36  $\mu\text{g/L}$  dans l'Eocène ; Vernoux *et al.*, (1998)]. Ailleurs en Europe, des teneurs significatives ont également été relevées dans des aquifères sableux. C'est le cas en Belgique de l'aquifère des dépôts Ledo-panisielien où la médiane des concentrations est de 1  $\mu\text{g/L}$  avec un maximum de 5,3  $\mu\text{g/L}$  [Walraevens (1990) dans Blum *et al.* (2006)].

#### Fluor (F)

De nombreux systèmes aquifères en Europe et dans le monde présentent, à l'état naturel, des concentrations en fluor largement supérieures à la norme autorisée pour l'eau potable de 1,5 mg/L. C'est pourquoi cet élément fait l'objet d'un article à part entière dans cette publication (Pauwels et Ahmed).

### Applications et perspectives

Toutes les connaissances acquises sur les relations entre concentrations en éléments traces dans les eaux souterraines et contexte géologique ont permis de développer une méthode utile pour estimer le fond géochimique d'un aquifère [Chery (2006)]. Selon les cas, cette méthode trouve trois niveaux d'application visant à aider les gestionnaires publics de l'eau :

► **une application prédictive** : connaître le fond hydrogéochimique d'une zone peu connue. Beaucoup d'aquifères captés pour l'alimentation en eau potable restent en effet mal connus. Dans ce contexte, comprendre l'origine de la présence d'un élément indésirable pour la production d'eau potable n'est pas toujours aisé. À l'aide des connaissances accumulées sur le contexte géologique favorable à la présence de chaque élément, la méthode offre un support pour la prévision des niveaux de concentrations attendus dans un aquifère ;

► **une application soustractive** : retrouver quel a été le fond géochimique naturel d'une zone désormais anthropisée. Il s'agit là de distinguer, lorsque la concentration d'un élément est élevée, la contribution des apports anthropiques par rapport à la contribution

## ▶ GLOBAL IMPACTS OF GEOGENIC ARSENIC – A MEDICAL GEOLOGY PERSPECTIVE



**Jose A. Centeno**

SENIOR RESEARCH SCIENTIST  
U.S. ARMED FORCES INSTITUTE OF PATHOLOGY  
(WASHINGTON, DC)  
Jose.Centeno@afip.osd.mil



**Robert B. Finkelman**

SENIOR RESEARCH SCIENTIST  
U.S. GEOLOGICAL SURVEY, RESTON (VA)  
rbf@usgs.gov

Arsenic contamination through natural (geogenic) and anthropogenic sources is a serious threat to humans all over the world. Natural sources of arsenic exposure may include contaminated groundwater, volcanic sediments, coal, and springs sourced by thermal waters. The number of people affected by arsenic is staggering, the problems life threatening, the scope global, and the potential for medical geology interventions – enormous. Medical geology has the objectives of identifying harmful geologic agents, determining exposures related to deteriorating health conditions, and developing sound principles, strategies, programs and approaches to eliminate or minimize health risks, from the naturally occurring physical and chemical agents in the environment [Selinus *et al.* (2005)]. In this paper, we explore the global health impacts from chronic arsenic exposure and provide examples where geogenic (natural) exposures to arsenic have impacted the health of millions of people worldwide.

### Geogenic sources of arsenic exposure

Arsenic is the most extensively studied of the metals and metalloids found in drinking water worldwide. Arsenic is released into the environment from both natural and anthropogenic sources. Global natural emissions of arsenic and arsenic compounds have been estimated to be 8,000 tons each year, whereas anthropogenic emissions are about three times higher [NRC (2000)]. Environmental natural exposure to arsenic is generally in the form of either arsenite ( $As^{3+}$ ) or arsenate ( $As^{5+}$ ). The former is the predominant form in drinking water from deep (anaerobic) wells, while the latter predominates under aerobic conditions.

Arsenic contamination of drinking water is a public health issue worldwide. The catastrophic health problems caused by arsenic in the well waters of Bangladesh and West Bengal, India, have been front page stories in mass-media and in scientific journals. Although estimates as to how many people are at risk vary, some as high as 100 million, there is no question that arsenic poisoning may affect tens of millions in Bangladesh alone, and in West Bengal it is suspected that about 6 million people are exposed to arsenic-contaminated drinking water above the 50  $\mu\text{g/L}$  As level. This situation has been called the “*greatest mass poisoning in history*”. What is not often reported is that the tens of millions of people exposed to arsenic in Bangladesh represent only a portion of the people who are at risk worldwide. Elevated levels of arsenic have been reported in water supplies of communities in Argentina, Austria, Brazil, Canada, China, Ghana, Greece, Hungary, Iceland, India, Japan, Korea, Malaysia, Region Lagunera (Torreon, Mexico), Inner Mongolia, Nepal, Romania, Taiwan, Vietnam, Zimbabwe, and the U.S. In addition, arsenic mobilized by coal combustion has caused severe health problems in China and Slovakia. In China alone several hundred million people commonly burn raw coal in unvented stoves that permeate their homes with high levels of toxic metals and organic compounds (see *Photo 1*). At least 3,000 people in Guizhou Province in southwest China are suffering from severe arsenic poisoning. The primary source of the arsenic appears to be consumption of arsenic-tainted chili peppers dried over fires fueled with high-arsenic coal [Zheng *et al.* (1996)].

### Health effects induced by chronic arsenic exposure

The future is bleak for many of the people exposed to high levels of arsenic from inhalation of arsenic-rich dust, ingestion of tainted food or groundwater. Inorganic arsenic has been recognized as a human poison since ancient times, and large doses can cause death. Lower levels of inorganic arsenic ingested may cause stomach and intestine irritation, with symptoms such as stomach ache, nausea, vomiting and diarrhea. Other effects may include respiratory conditions (e.g. bronchitis, rhinitis, shortness of breath, nasal congestion, etc), cardiovascular manifesta-

tions (e.g. hypotension, congestive heart failure, and cardiac arrhythmias), neurological (e.g. peripheral neuropathy, polyneuropathy), and gastrointestinal manifestations (e.g. diarrhea, hemorrhagic gastroenteritis, hepatocellular necrosis), hematological effects (e.g. anemia, leucopenia), developmental and reproductive effects (e.g. spontaneous abortions, stillbirths, low birth weights, congenital malfunctions, neonatal deaths), immunological effects, and a higher risk for diabetes mellitus. But perhaps the single most characteristic effect of long-term chronic oral exposure to inorganic arsenic is a pattern of skin changes. These include a darkening of the skin (e.g. hyperpigmentation and hypopigmenta-

▼ **Photo 2: These photographs show severe skin lesions from chronic arsenic poisoning. (a) The palms show multifocal hyperkeratotic lesions. (b) Non-healing ulcer near the groin from a suspected case of arsenic poisoning in Torreon, Mexico.**

photo courtesy of Dr. Elizabeth Meza, Torreon, Mexico. No biopsies were done to confirm these lesions.

*Photo 2 : Lésions de la peau dues à un empoisonnement chronique à l'arsenic. (a) Les paumes de la main montrent des lésions hyperkératotiques multifocales. (b) Ulcère non traité près de l'aîne (suspicion d'empoisonnement à l'arsenic à Torreon, Mexico).*

Photo reproduite avec l'aimable autorisation du Dr. Elizabeth Meza, Torreon, Mexique. Aucune biopsie n'a été réalisée pour confirmer ces lésions.





**Photo 1: Domestic coal-burning in Guizhou Province, China, demonstrating the practice of drying chili peppers over unvented ovens.**

Photo courtesy of Prof. Dr. Baoshan Zheng, Institute of Geochemistry, Guiyang, Guizhou Province, P.R. China.

*Photo 1 : Dans la province de Guizhou, Chine, le séchage des piments est réalisé au-dessus de fours démunis de conduit d'évacuation et fonctionnant au charbon.*

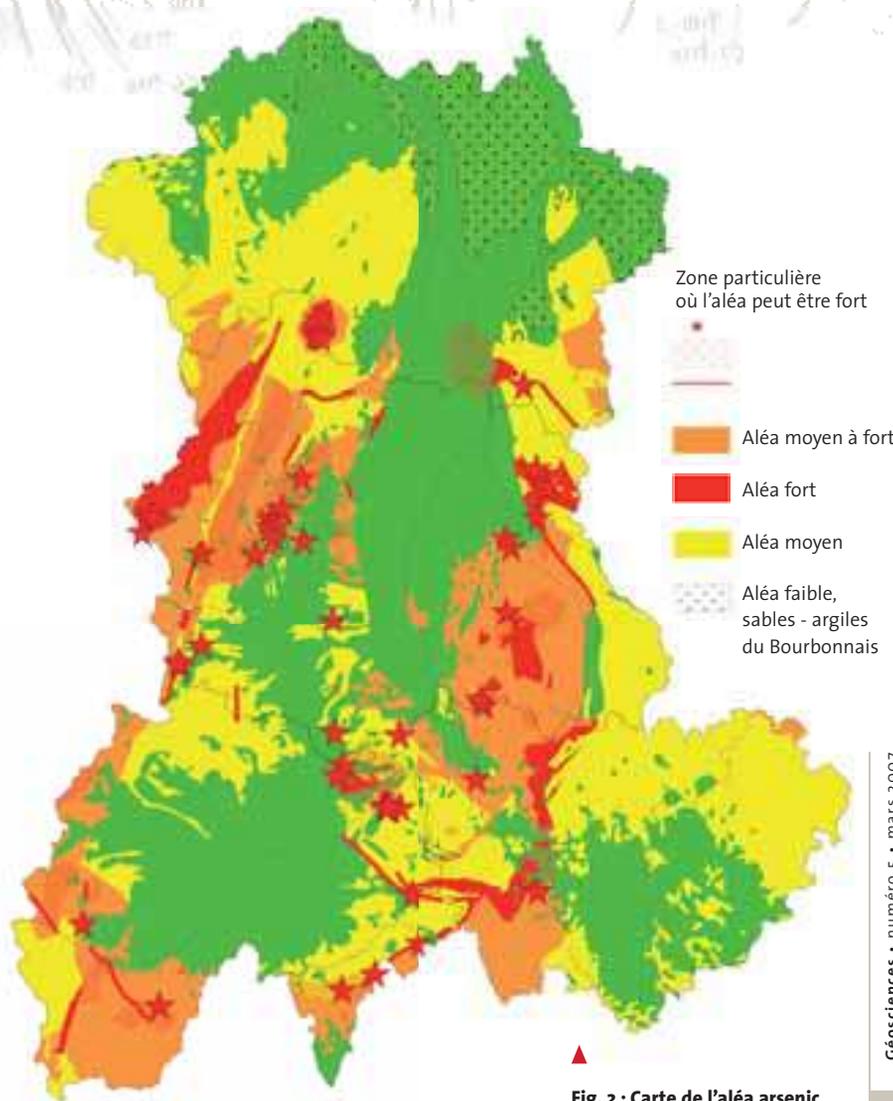
Photo reproduite avec l'aimable autorisation du Prof. Dr. Baoshan Zheng, Institute of Geochemistry, Guiyang, Guizhou Province, P.R. China.

tion) and the appearance of small lesions of the palms, soles, and torso (see *Photo 2*) [Centeno *et al.* (2000)]. Epidemiological evidence shows an association between inorganic arsenic in drinking water and increased risk of skin, lung, bladder, and kidney cancers [Smith *et al.* (1992)].

### The future – A medical geology opportunity

Biomedical scientists and public health officials are working with geoscientists to better characterize those natural sources of arsenic in the environment, so solutions to many of the health problems induced by chronic exposure to arsenic could be developed. For example, by studying the geological and hydrological environment, geoscientists are trying to determine the source rocks from which arsenic being leached into the ground water. They are also trying to determine the conditions under which the arsenic is being mobilized. For example, is the arsenic being desorbed and dissolved from iron oxide minerals by anaerobic (oxygen-deficient) groundwater or is the arsenic derived from the dissolution of arsenic-bearing sulfide minerals such as pyrite by oxygenated waters? The answers to these questions will allow the public health communities around the world identify aquifers with similar characteristics and more accurately determine which populations may be at risk from arsenic exposure. ■

**References:** O. Selinus, B. Alloway, J.A. Centeno *et al.*, Editors. In *Essentials of Medical Geology – Impacts of the Natural Environment on Public Health*. Elsevier – Academic Press, 2005, ISBN 0-12-636341-2. National Research Council. *Arsenic in drinking water*. National Academy Press, Washington, DC, 2000. B. Zheng, X. Yu, J. Zhand and D. Zhou (1996) – Environmental geochemistry of coal and endemic arsenism in southwest Guizhou, P.R. China. 30<sup>th</sup> International Geological Congress Abstracts, Vol. 3, p. 410. J.A. Centeno, F.G. Mullick *et al.* (2002) – Pathology related to chronic arsenic exposure. *Environ. Health Perspect.*, 110:883-886. A. Smith, C. Hopenhayn-Rich *et al.* (1992) – Cancer risks from arsenic in drinking water. *Environ. Health Perspect.*, 97:259-267.



**Fig. 2 : Carte de l'aléa arsenic (> 10 µg/L) dans les eaux souterraines de la région Auvergne.**

*Fig. 2: Map of arsenic hazard (> 10 µg/L) in groundwater in the Auvergne region.*

Source : Bertin *et al.*, 2006.

du milieu géologique. Ce niveau d'application est utile pour cibler les actions à mettre en œuvre pour protéger les systèmes exploités pour l'eau potable ;

► **une application prospective :** fournir des recommandations pour mieux gérer l'implantation de nouveaux captages. Puisque certains systèmes offrent naturellement une eau non conforme aux normes de qualité pour la production d'eau potable, il apparaît essentiel pour l'implantation de nouveaux captages d'identifier les zones susceptibles de présenter un fond géochimique élevé.

Dans la perspective de cette dernière application, différents travaux ont été menés en France à l'échelle régionale ou nationale pour délimiter les zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces. En Auvergne où de nombreux captages présentent des concentrations en arsenic supérieures à la norme de 10 µg/L, une cartographie de l'aléa arsenic (concentration supérieure à 10 µg/L dans les eaux souterraines) a été réalisée [Bertin *et al.* (2006)] (*fig. 2*).

À l'échelle du bassin, des travaux moins détaillés mais similaires ont été réalisés, à l'initiative de l'Agence de l'Eau du bassin Rhône-Méditerranée et Corse. Cette étude utilisant différentes sources de données (analyses chimiques dans les eaux souterraines et les cours d'eau, inventaire minier, analyses de sols et de fines d'alluvions) a été menée pour délimiter les zones susceptibles de présenter un fond géochimique élevé en éléments traces dans les eaux souterraines comme dans les eaux de surface [Brenot *et al.* (2006)] (fig.3).

Une étude au niveau national est actuellement en cours pour réaliser cette délimitation à l'échelle métropolitaine, mais aussi à terme pour les Départements d'Outre-Mer, sur financements du ministère de l'Écologie et du Développement durable, du BRGM et des Agences de l'Eau.

« Identifier les zones où il existe un risque de dépassement des normes pour l'eau potable est une étape essentielle pour les gestionnaires de l'eau et les services de la santé en particulier. »

Fond géochimique, valeurs seuils, qualité patrimoniale de l'eau. Derrière ces notions, il y a l'expression d'une nécessité pour tous les professionnels du domaine de l'eau : connaître la composition chimique naturelle d'un aquifère. Comment identifier dans la composition chimique actuelle d'une eau souterraine, la part des teneurs naturelles et celle des apports anthropiques (agricoles, industriels, domestiques) ? Comment répondre aux exigences de la DCE ?

Comment traquer les contaminations anthropiques, établir des stratégies de réhabilitation et anticiper l'évolution de la qualité d'une nappe ?

## ► LE PROJET EUROPÉEN BRIDGE

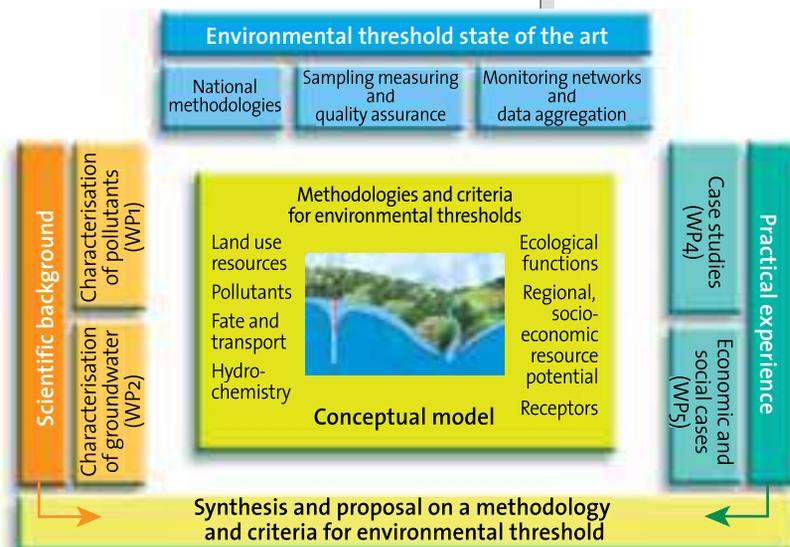
Anne-Marie Fouillac Service Métrologie, Monitoring, Analyse – BRGM – am.fouillac@brgm.fr

Le BRGM a coordonné, en 2005-2006, le projet européen BRIDGE qui regroupait 27 partenaires de 17 pays. Ce projet devait en particulier soutenir la mise en place de la directive européenne sur la protection des eaux souterraines (2006/118/CE) complémentaire à la DCE (Directive Cadre européenne sur l'Eau). Il était destiné à identifier les critères qui permettront la définition du bon état chimique d'une eau souterraine. Le cœur du projet consistait à élaborer une méthodologie commune pour l'établissement des valeurs seuils pour les polluants représentatifs de masses d'eau souterraines.

Parmi ces polluants on distingue les polluants dont l'origine est purement anthropique, tels que les produits chimiques synthétiques (phytosanitaires), des polluants géogéniques comme l'arsenic ou le fluor, qui peuvent également se trouver de façon naturelle dans l'environnement. Ainsi, ils présentent parfois une teneur élevée due à l'interaction entre l'eau et les roches encaissantes sans qu'aucune source anthropique ne soit présente (voir article ci-contre).

Il convenait donc dans l'élaboration de la méthodologie commune destinée à mettre en œuvre des valeurs seuils à l'échelle d'un bassin versant national ou d'une masse d'eau souterraine d'intégrer cette notion de bruit de fond naturel ou « fond géochimique ».

Outre la coordination du projet, le BRGM est intervenu sur la détermination des critères hydrogéochimiques et



hydrogéologiques des masses d'eau souterraines et sur la définition du bruit de fond naturel. Il a également contribué à l'étude socio-économique incluse dans ce projet et terminée fin 2006. ■



www.wfd-bridge.net  
 Projet financé par la DG Recherche de la Commission européenne  
 Contrat N° 006538 (SSPI)





In the same capacity as food, the liquids we drink constitute a major pathway into the human body for compounds, whether they be vital for our well-being or harmful. Particularly for groundwater, the chemistry of the water we drink is very much controlled by interactions with soils and rocks, contributing largely to the intake of compounds such as fluoride that are essential – but only in small quantities. In certain cases, however, concentrations can be too high, leading to the intake of doses with detrimental health effects on large populations in several countries.

**Artisanal brickworks in the Andhra Pradesh state, India. Fluoride in the coal and adsorbed onto clays is released during combustion.**  
*Briqueteries artisanales dans l'état d'Andhra Pradesh (Inde). Le fluor contenu dans les charbons et adsorbé sur les argiles est libéré durant la combustion.*

© M. Parizot

# Fluoride in groundwater: origin and health impacts



**Hélène Pauwels**

GEOCHEMIST,  
WATER DIVISION, BRGM  
h.pauwels@brgm.fr

**Shakeel Ahmed**

CO-HEAD OF THE INDO-FRENCH  
CENTRE FOR GROUNDWATER RESEARCH  
NATIONAL GEOPHYSICAL RESEARCH INSTITUTE  
(INDIA)  
shakeelahmed@ngri.res.in

Fluoride supplementation is widely recommended in mitigating dental health problems. However, excess doses prove dangerous to health and can provoke a potentially highly disabling disease, namely fluorosis. Fluoride in high doses attacks teeth and, in extreme cases, bones. Excess doses are generally due to the intake of fluoride-rich water. Groundwater with high levels of fluoride exists in many places throughout the world, particularly in developing countries, but high fluoride concentrations are also observed in groundwater in Europe and North America. The danger of fluoride remains concealed as it has no taste and does not form a deposit; consequently, a high percentage of population suffering from fluorosis is not aware of the risk until significant spread of the disease.

### Health effects due to excess fluoride

Soon after the insulation of elementary fluorine by Henri Moissan in 1886, for which he earned the Nobel Prize in 1906, its role in the human diet was recognized and it was recommended for pregnant women and children in the interest of dental health. Fluoride enters into the body through water, food, medicines and the use of toothpaste. However, the fluoride by water intake is almost completely absorbed by the human body,

*The daily ingestion of high fluoride levels is considered detrimental to health, and debates are currently on-going as to the alleged benefits of fluoride supplementation (including water fluoridation or medicines).*



◀ **A person suffering from fluorosis.**  
Cas d'une personne atteinte de fluorose.

Source: [www.fluoridealert.org/fluorosis-india.htm](http://www.fluoridealert.org/fluorosis-india.htm)

compared to that by food intake, where absorption efficiency is in some cases (e.g. certain meats and fishes) only about 25%. The recommended fluoride concentration in drinking water is around 1 mg/l.

Conversely, the daily ingestion of high fluoride levels is considered detrimental to health, and debates are currently on-going as to the alleged benefits of fluoride supplementation (including water fluoridation or medicines). The World Health Organization (WHO) 2004 guideline for fluoride in drinking water is 1.5 mg/l, a value adopted by many countries as a national standard. Nevertheless, because the daily quantity of water ingested varies, the maximum permitted concentration of fluoride must depend on the climate. Consequently, both China and India apply 1.0 mg/l as the standard value. Fluoride toxicity results from its bonding effects with calcium. The first and most common symptom of excess exposure to fluoride is dental fluorosis, which results from the interaction between fluoride and tooth enamel and causes staining, weakening and eventual loss of teeth. Skeletal fluorosis results from even higher exposure to fluoride. In its early stages, this disease manifests as osteosclerosis, involving the hardening and calcification of bones and causes pain, stiffness, and even irregular bone growth. In its advanced stages, crippling skeletal fluorosis involves severe bone deformation and debilitation. Once developed, the symptoms of fluorosis are irreversible. Links between high fluoride intake and other health problems, such as cancer and sudden infant death, are less clearly defined.

Nutrition and particularly dietary deficiencies in calcium (Ca) and vitamin C are recognized as important exacerbating factors of fluorosis. Comparative studies between groups of children with either inadequate or adequate intake of Ca showed highly significant differences in the manifestation of fluorosis; radiological investigations particularly indicate that a lower Ca intake results in progressively more severe bone manifestations.

## ▶ BORON Wolfram Kloppmann BRGM – [w.kloppmann@brgm.fr](mailto:w.kloppmann@brgm.fr)

Boron is an essential trace element both for plants and humans that occurs naturally in many groundwater resources. Whereas the narrow margin between boron deficiency and clearly pronounced toxicity symptoms is well known for many plants, we still lack data on the adverse health effects on humans. Based mainly on animal data, WHO recommends a limit of 0.5 mg/l for drinking water, and the EU Drinking Water Directive sets the level at 1 mg/l. Routine measurements of boron concentrations in groundwater were not available until recently, and many knowledge gaps persist concerning the status, the reasons and the impact of boron contamination of groundwater resources. The EU research project BOREMED allowed assessment of the magnitude of the "boron problem" in Mediterranean groundwater resources. The main vectors of anthropogenic boron pollution of surface and groundwaters in industrial countries are treated and untreated sewage effluents. But in all the investigated case studies, natural factors are preponderant in groundwater contamination: geothermal activity, marine intrusion, evaporite dissolution and desorption from clay minerals. The first statistical analyses of over 6,000 ground-

water points in France, Italy, Greece, Cyprus, Israel/Gaza reveal that 23% are above the recommended WHO value and 14.6% above the limit of the EU Drinking Water Directive.

Human boron exposure occurs primarily through food and water intake, but virtually all studies on the potential health impacts have focused on high-concentration oral exposure of laboratory animals resulting mainly in reduced fertility in the animals. No detrimental effect on human fertility was demonstrated in two epidemiological studies assessing long-term exposure to boron in Turkey. A regional scale geographical study in northern France supports the absence of health effects at moderate concentrations (<1 mg/l). Nevertheless, even low environmental exposure to boron can be responsible for a demonstrable biochemical effect by competitively inhibiting certain key enzyme reactions. For water managers, resources contaminated mainly by natural boron are particularly difficult to handle, as source control is impossible in cases where the contaminant comes from the aquifer material itself and virtually all available treatment technologies are inefficient with respect to boron. ■

**References:** WHO (1998) – Boron. Geneva, World Health Organization, IPCS (Environmental health criteria monograph), 204: 1-125. B.S. Sayli, E. Tüccar, A.H. Ellan (1998) – An assessment of fertility in boron exposed Turkish subpopulations. *Reprod Toxicol*, 12: 297-304. B.S. Sayli, E. Tüccar, A.H. Ellan (2001) – An assessment of fertility and infertility in boron-exposed Turkish subpopulations. 3. Evaluation of fertility among sibs and in "borate families". *Bio Trace Element Res*, 81: 255-267. C. Yazbeck, W. Kloppmann, P. Missy, R. Cottier, J. Sahuquillo, G. Debotte, G. Huel (2005) – Health impact of boron in drinking water: A geographical risk assessment in Northern France. *Environmental Geochemistry and Health*, 27, 419-427. G. Huel, Ch. Yazbeck, D. Burnel, P. Missy, W. Kloppmann (2004) – Environmental Boron exposure and activity of Delta-aminolevulinic Acid Dehydratase (ALA-D) in a newborn population. *Toxicological Sciences*, 80, 304-309.



Fluorosis occurs rapidly after the onset of high-fluoride water ingestion and children are the first casualties. As an example, Tibiri is a town in the southern centre of Niger where a well drilled in the 1980s supplied, between 1985 and 2000, some 29,000 inhabitants with high-fluoride waters. As a result, a whole generation of children, approximately 5,000, suffered from fluorosis, with half of them suffering from bone deformities, the more serious cases including huge heads, bowlegs and backs, crooked feet and excess limbs.

### Fluoride abundance and distribution in groundwater

Natural fluoride concentrations in groundwater are usually less than 1.0 mg/l, although values exceeding drinking-water standards are not uncommon in certain regions of the world. Groundwater concentrations are generally higher than those of surface water because of water-rock interactions. High-fluoride groundwater concentrations are reported, especially in active volcanic zones associated with geothermal sources, crystalline basement aquifers and arid sedimentary basins. Edmunds and Smedley (2005) established a world situation of documented high-fluoride groundwaters. These are found in many parts of the developing world with the worst-affected areas being the arid parts of China, India, Sri Lanka, West Africa (Ghana, Ivory Coast, Senegal), North Africa (Libya, Sudan, Tunisia), South Africa, the East African Rift Valley (Kenya, Uganda, Tanzania, Ethiopia, Rwanda), Northern Mexico, and Central Argentina.

Some of the highest fluoride contents in groundwater ever recorded in the world are in the East African Rift Valley with concentrations of up to 20 mg/l in Ethiopia (Wonji/Shoa area), and even more than 100 mg/l in Tanzania. Furthermore, the national standard for drinking water in Tanzania is fixed at 8 mg/l, thus reflecting the difficulties with compliance, a situation that is worsened by water scarcity. High-fluoride geothermal waters have been reported in other places around the world, such as New Zealand, the former Soviet Union, France – where typical fluoride contents in the Vichy area range between 3.8 and 8 mg/l –, and Mexico – notably in San Luis Potosí where concentrations reach 3.7 mg/l in places as the result of mixing between fresh groundwater and deeper thermal fluoride-rich waters.

Travi (1993) studied groundwater from the sedimentary aquifers of western Senegal and found

“High-fluoride groundwater concentrations are reported, especially in active volcanic zones associated with geothermal sources, crystalline basement aquifers and arid sedimentary basins.”

concentrations of up to 13 mg/l. The highest fluoride concentrations of sedimentary aquifers are encountered under (semi-) arid climate conditions: China, Sudan, Niger (see above) or Argentina where groundwater from Quaternary loess of La Pampa recorded up to 29 mg/l of fluoride. Nevertheless, groundwater under more temperate climates of Europe is not spared from fluoride contamination. Concentrations above the WHO guideline (1.5 mg/l), but rarely above 4 mg/l, are observed for example in the Ledo-Paniselian aquifer in Belgium, in the Permian carbonates of Lithuania, in the Lutetian limestone and marl aquifer near Paris, as well as in the Bajocian aquifer (Jurassic limestones) in Normandy (western France). Even groundwater from chalk may present high fluoride concentrations, for example in Maldon (Essex, Great-Britain) where the relationship between symptoms of dental fluorosis and consumption of fluoride-rich chalk groundwater was established as early as 1922.

High fluoride concentrations in groundwater from crystalline basement aquifers, particularly granite, are recognized in several areas of the world: Sri Lanka with up to 10 mg/l, and India, Senegal, Korea, and Wisconsin (US) with up to 7.6 mg/l.

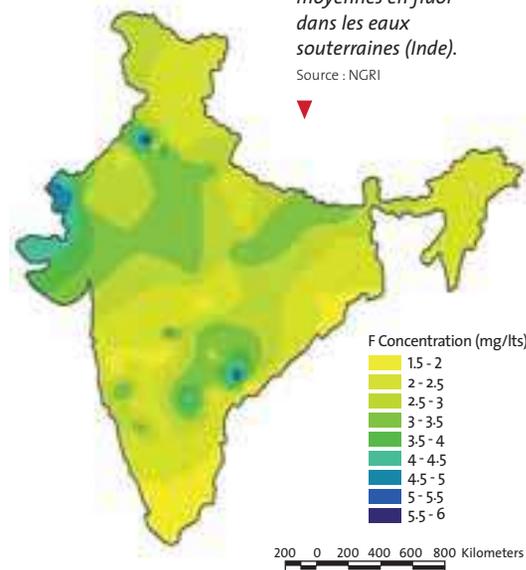
### Chronic fluoride exposure in India

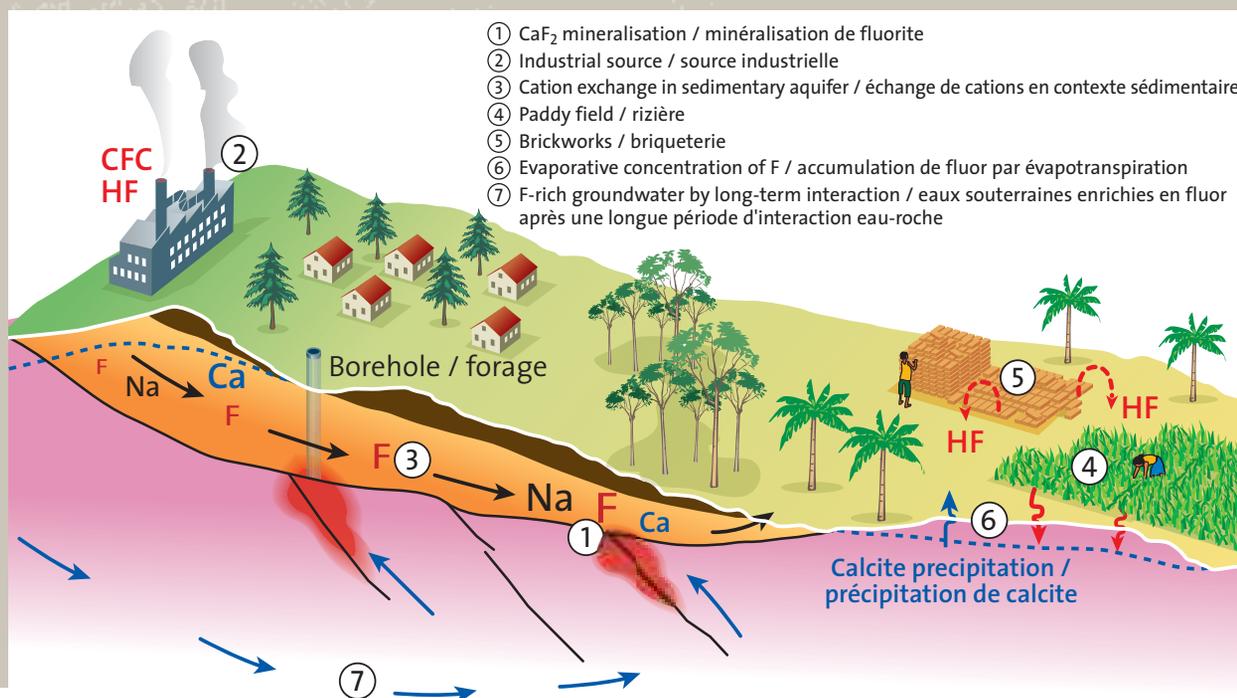
Fluoride problems in India have been recognized for several decades now [Rao et al., (1974)]. About 62 million people are at risk of developing fluorosis from drinking high-fluoride water and dental fluorosis is endemic in 14 states and 150,000 villages. The health problem is generally worsened by (I) a calcium intake of rural Indians of less than 400 mg/day (recommended intake is 800 mg/day), and (II) drinking large volumes of water daily due to climate conditions, making the suitable limit for fluoride concentration in drinking

Fig. 1: Map of mean fluoride concentrations in Indian groundwater.

Fig. 1 : Carte des teneurs moyennes en fluor dans les eaux souterraines (Inde).

Source : NGRI





◀ Fig. 2: Schematic diagram showing fluoride-concentrating factors in sedimentary and granite contexts..

Fig. 2 : Schéma présentant les principaux facteurs responsables de la contamination des eaux souterraines par le fluor en contextes granitique et sédimentaire.

Source : H. Pauwels (BRGM)

water only 0.6 mg/l. High-fluoride groundwaters are encountered in various geological contexts, including granites, gneisses, quartzites, basalts, dolerites sandstones [Saxena and Ahmed (2003)]. The problem is most pronounced in the states of Andhra Pradesh, Bihar, Gujarat, Karnataka, Madhya Pradesh, Punjab, Rajasthan, Tamil Nadu and Uttar Pradesh (figure 1). Only the small states in the northeastern corner of the country are free from fluorosis. Concentrations above 7 mg/l and up to 20 mg/l are reported in the crystalline aquifers of Karnataka and Andhra Pradesh respectively. However, Rajasthan is thought to be the most seriously affected by high fluoride concentrations. Ten percent of villages in Rajasthan have excessive fluoride contents in their water supply. In Central Rajasthan (Nagaur district), about 25% of the population is affected by dental fluorosis and about 10% by skeletal fluorosis.

### Processes involved in the genesis of fluoride-rich groundwater

Fluoride in groundwater is mainly derived from the weathering of rocks. In geothermal waters and volcanic zones, fluoride concentrations are related to the development of hyperalkaline volcanic rocks, the melts and volatile fractions of which accumulate large contents of fluoride. Therefore, groundwater stores fluoride directly from rock weathering and from high-fluoride geothermal waters. In crystalline bedrock aquifers, fluorine occurs in primary minerals, and is ubiquitous, especially in biotite and amphibole

“Fluoride in groundwater is mainly derived from the weathering of rocks.”

as a substitution for hydroxyl positions; it may also occur within mineralized veins. In sedimentary basins, the sources of fluoride are mainly fluorite ( $\text{CaF}_2$ ), fluoroapatite ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), and marine clays on which fluoride may be adsorbed.

Other sources of fluoride in groundwater exist apart from the weathering of rocks (figure 2). Except in volcanic areas, fluoride concentrations in pristine rainfall are naturally very low, but anthropogenic inputs can increase concentrations, including chlorofluorocarbons (CFCs) and other industrial emissions – especially those produced from coal burning, brick making and

**Fluorite ( $\text{CaF}_2$ ):** a mineral that contributes to and controls fluoride concentrations in groundwater. Fluorite ( $\text{CaF}_2$ ): minéral pouvant contribuer à et contrôler la teneur en fluor des eaux souterraines.

© BRGM (<http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/Main.html>)

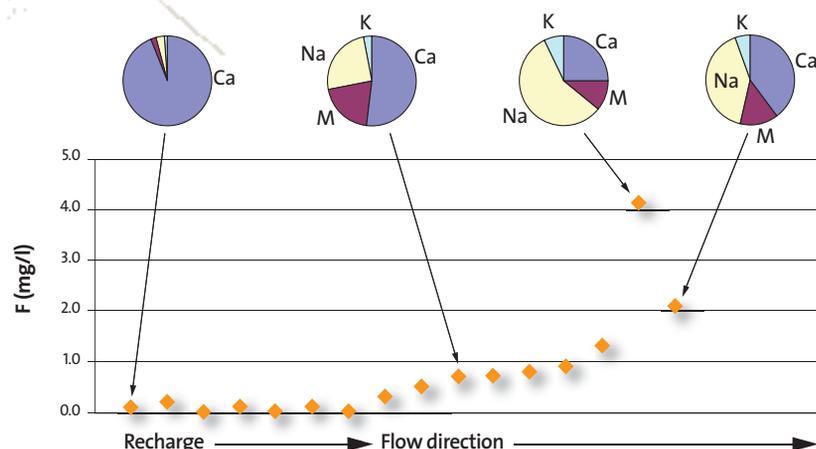


aluminium smelting. Concentrations in rainfall are low (<0.2 mg/l) compared to concentrations in groundwater, but evapotranspiration leads to an increase in fluoride concentration before reaching the water table. During the recharge process, the water interacts with the soils; the fluoride content within the soils depends on parent rock composition and anthropogenic input. Fluoride is adsorbed onto freshly precipitated hydroxide minerals, clay minerals and organic matter. In agricultural areas, fluoride contained as impurities of phosphate fertilizers may be a common and significant source. Moreover, fluorides are largely present in pesticides and fluorinated compounds account for 50% of the market. Within soils, the soluble fraction of fluoride is generally very low and the soils act as a sink rather than a source of fluoride. However, the highest fluoride solubility is observed in sodic soils.

Weathering, a key process regarding the mobilization of fluoride through groundwater, takes place and evolves along the groundwater flow path. Consequently, fluoride concentrations tend to increase in the direction of groundwater flow from the recharge to the discharge area (figure 3).

In heterogeneous contexts, such as crystalline aquifers, fluoride concentrations increase with depth, as does residence time. In other words, the older the water, the higher the fluoride concentration. Interaction time is thus a key parameter in fluoride concentration, and under temperate climates, where recharge ensures a significant flow rate, the increase of fluoride concentration is favoured within large basins compared to small aquifers. Under more arid conditions, however, such as in India where limited recharge implies a lower flow rate and increased reaction times, weathering and fluoride release are favoured.

Whatever the source of fluoride, once dissolved in groundwater, its concentration cannot increase indefinitely. Actually, fluorite ( $\text{CaF}_2$ ) presents a low solubility and, depending on the concentration of both calcium and fluoride, it may precipitate limiting the fluoride concentration in groundwater. Calcium is a key component in fluoride concentration, and the lower the calcium, the higher the fluoride. Any processes involving a decrease in calcium concentration favour the occurrence of high fluoride concentration. Such a decrease occurs through ion-exchange (substitution of Na by Ca on the mineral surface) during the circulation of groundwater within the aquifer, or through calcite (calcium carbonate) precipitation. Under arid climate



**Fig. 3: Evolution of fluoride concentrations in groundwater from a Jurassic limestone aquifer (southwestern France) according to the covered distance. Pie charts illustrate the increase of sodium (Na) and decrease of calcium (Ca) concentrations with fluoride increase.**

*Fig. 3 : Évolution des teneurs en fluor dans les eaux d'un aquifère calcaire jurassique (sud-ouest de la France) en fonction de la distance à la recharge. Évolution corrélative (diagrammes secteurs) des teneurs en sodium (Na) et en calcium (Ca).*

Source : Qualité naturelle des eaux souterraines. Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français, Collection Scientifique et Technique, BRGM Éditions, Orléans, 2006, 238 p.

conditions, due to the enhanced evapotranspiration of shallow groundwater, this latter process is critical and leads to the formation of so-called calcrete. For all these reasons, high-fluoride groundwater is typically of the sodium-bicarbonate type with relatively low calcium concentrations (< 20 mg/l) and with neutral to alkaline pH values (around 7-9).

Depending on the climatic conditions, human activity also probably worsens fluoride background in groundwater, and not only through the spreading of fluoride-bearing compounds. Irrigation has recently been largely developed in India and both sodicity and salinity of the soil are increasing in many irrigation schemes, two factors that increase the mobility of fluorides within soils, and which in turn may become a source of fluoride for groundwater by losing its role as a sink.

In a hard-rock context, cyclic variations of fluoride concentrations in groundwater are, with the highest values, recorded after monsoon recharge. This would indicate that at least in some cases, fluoride increase is more related to mobilization from soils rather than to interaction with primary minerals.

### Prospects for the mitigation of fluoride-related problems

Evidence shows that several factors (hydrological, lithological, climatic, and anthropogenic) have an impact on the fluoride concentrations in groundwater, which in turn can have serious adverse effects on human health. Several methods of fluoride removal exist to reduce concentrations before supplying water to the population, but limitations are substantial. The electro-dialysis or reverse osmosis technique requires skilled operators and is costly. The most popular methods include adsorption / ion exchange and precipitation. The former includes, for example, exchange



▲ **Paddy fields in Andhra Pradesh, India. Irrigation contributes to the salinization and sodification of soils, thus decreasing their capacity to retain fluoride.**  
*Rizières dans l'état d'Andhra Pradesh (Inde). L'irrigation entraîne la salinisation des sols, réduisant les capacités de rétention du fluor.*

© Indo-French Centre for Groundwater Research

onto clays, activated carbon or zeolites. The latter uses generally aluminous or calcic compounds. Some of these techniques have only been applied at the prototype scale, whereas others are widely applied at either the domestic and community scales. This, for example, is the case of the Nalgonda technique based on the addition of aluminous (Al) compounds, which was developed and applied for the first time in Andhra Pradesh. However, the production of sludge and the large volume of residual Al constitute severe limitations. Moreover, in most rural communities, it is impossible to monitor processes and fluoride concentrations, which makes it difficult to replace any necessary media in time. This problem is worsened for use at domestic scale.

In other situations, where fluoride-rich waters result from a mixing between groundwaters of different composition, or where high heterogeneity exists within the aquifer, the rethinking of borehole construction design and operation may constitute an interesting alternative to decreasing the fluoride content of water.

Besides the mitigation measures applied directly to water just before or after its abstraction, *in situ* treatment, which has received much less attention to date, should also be considered. Under arid climatic conditions in particular, where evapotranspiration and soils play a primordial role in fluoride contamination, soil treatment may be an efficient solution. Finally, it could be worth investigating several adaptation strategies, such as actions devoted to restricting soil salinization, paying particular attention to the most vulnerable areas. ■



### **Le fluor dans les eaux souterraines : origine et impacts sanitaires**

*La teneur en fluor dans les eaux souterraines est contrôlée par des réactions avec le sol et les roches. Selon la teneur résultante, la consommation d'eau peut largement contribuer à une bonne santé dentaire. Cependant, l'excès de fluor entraîne le développement d'une maladie dangereuse et handicapante : la fluorose. Cette maladie apparaît rapidement après le début de l'exposition et les enfants en sont les principales victimes. Les symptômes sont variés : depuis la simple apparition de tâches dentaires jusqu'à des déformations osseuses graves. Pour pallier ces effets potentiellement néfastes, l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) a fixé la valeur guide à 1,5 mg/l. Des teneurs largement supérieures sont observées dans les eaux souterraines à travers le monde. Les origines anthropiques du fluor existent, mais le milieu géologique reste le principal pourvoyeur ; les contextes géologiques sensibles étant les zones volcaniques, les roches cristallines et certaines roches sédimentaires d'origine marine. Le temps d'interaction eau-roche est primordial vis-à-vis de la libération du fluor vers les eaux souterraines.*

*Ainsi en Europe, des teneurs élevées sont rencontrées dans les grands bassins aquifères. En zone aride, la faible recharge des nappes augmentant le temps d'interaction, de nombreux pays en voie de développement sont confrontés à des teneurs excessives en fluor dans leurs eaux souterraines. Le continent Indien est particulièrement touché ; la fluorose dentaire y est endémique dans 14 états. Outre l'altération des roches, les principaux cofacteurs incluent : 1 – une évapotranspiration importante menant à la précipitation du carbonate de calcium, le calcium ainsi immobilisé ne pouvant plus limiter les teneurs en fluor par précipitation d'un autre minéral (la fluorite :  $\text{CaF}_2$ ) ; 2 – une salinisation des sols induite par l'irrigation.*

*Des solutions techniques existent pour réduire le problème. Cependant, les coûts de mise en œuvre, la gestion des résidus de traitement ou la difficulté de suivre l'efficacité du traitement restent souvent autant de facteurs limitants.*



# Le thermalisme, la médecine que la Terre nous a donnée

Thérapeutique millénaire, le thermalisme concourt en France à la santé d'un demi-million de personnes traitées dans une centaine de stations thermales. Les soins utilisent eaux minérales, boues, gaz et vapeurs thermaux. Douze orientations thérapeutiques sont reconnues par la sécurité sociale ; les stations sont agréées en fonction de la nature de leurs eaux pour une ou plusieurs orientations. La recherche vise à mieux connaître la nature et le mécanisme d'action des produits thermaux et à établir le service médical rendu par la cure thermale.

74

THERMALISME



## Christian-François Roques

PROFESSEUR EN MÉDECINE PHYSIQUE  
ET RÉADAPTATION, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE 3  
PRÉSIDENT DU CONSEIL SCIENTIFIQUE  
DE L'AFRETH  
VICE-PRÉSIDENT DE LA FÉDÉRATION MONDIALE  
DU THERMALISME ET DU CLIMATISME  
christian-francois.roques@wanadoo.fr

Soin thermal en piscine (Luchon).  
Thermal treatment in a pool (Luchon).

© BRGM im@gé

Le thermalisme est une thérapeutique médicale, mise en œuvre sur prescription médicale, qui utilise les eaux minérales et leurs dérivés selon de multiples modalités d'application. Son utilisation en Europe remonte à l'Antiquité. Elle concerne, en France, le demi-million de curistes qui chaque année bénéficient de cure thermale, et la centaine de milliers de personnes dont l'activité est liée au thermalisme. Une eau est déclarée minérale lorsque, jaillissant d'une source identifiée, elle possède des caractéristiques physico-chimiques déterminées et constantes, une pureté microbiologique et a démontré l'existence d'un bénéfice pour la santé. Il existe ainsi en France environ sept cents sources d'eau minérales répertoriées et utilisées dans l'embouteillage et/ou le fonctionnement de la centaine de stations thermales du territoire métropolitain et d'outre-mer. Ces sources jaillissent dans des lieux déterminés par la géologie. Elles sont situées pour l'essentiel dans des régions de montagnes (Pyrénées, Alpes, Massif central, Vosges) ; quelques-unes se trouvent près des côtes, plus rarement dans des zones peu accidentées (figure 1).

“  
Le thermalisme fait  
essentiellement appel  
à l'utilisation de l'eau  
minérale, de boues,  
de vapeurs et  
de gaz thermaux.”

## Historique

Le thermalisme fait essentiellement appel à l'utilisation de l'eau minérale, de boues, de vapeurs et de gaz thermaux. À l'utilisation de ces produits naturels s'ajoute, le cas échéant, la pratique d'exercices, de massages notamment, pour ne citer que les principaux éléments. Les Romains ont largement utilisé les ressources thermominérales de l'Italie et des pays qu'ils occupaient pour alimenter leurs thermes dont l'importance sanitaire et plus encore sociale était essentielle. En France, bien des stations ont été exploitées dès l'époque romaine ; elles portent des noms qui évoquent le mot latin *aquae* – les eaux – que l'on retrouve dans Ax, Dax, Aix. Après les destructions dues aux invasions barbares, et le long immobilisme du Moyen Âge, il fallut attendre la Renaissance pour que soit retrouvé le chemin des eaux utilisées notamment, à l'époque, pour soigner les mauvaises plaies par armes à feu. Les XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles redonnent une vitalité médicale nouvelle aux eaux minérales, les stations se structurent, s'équipent en termes d'installations thermales, de voirie. Parallèlement avec Théophile de Bordeu, l'utilisation des eaux minérales s'inscrit dans une approche médicale organisée autour de la classification physico-chimique des produits thermaux. Les eaux minérales sont utilisées en fonction de leurs propriétés physico-chimiques pour traiter de manière spécifique les affections des curistes. Le XIX<sup>e</sup> siècle, avec l'apparition du chemin de fer, va voir se développer fortement les stations thermales qui deviennent des centres d'excellence médicale où l'on peut consulter les meilleurs médecins de l'époque, précurseurs de nos spécialistes car particulièrement orientés sur les pathologies traitées dans la station. Après la deuxième guerre mondiale, la cure thermique entre dans le champ des thérapeutiques remboursées par la toute nouvelle assurance maladie ; parallèlement, en fonction de leurs revenus, les curistes peuvent bénéficier d'une prestation financière d'aide au déplacement et à l'hébergement. Le thermalisme social est né. Ces dernières années, le thermalisme s'est caractérisé par une exemplaire démarche qualité et sécurité des produits thermominéraux, procédures, établissements thermaux. Parallèlement la recherche est en train de trouver un élan renouvelé (génie biologique et médical, biologie et sécurité des produits thermaux, service médical rendu).

**Fig. 1 : Carte des stations thermales en France métropolitaine.**

Fig. 1: Map of the thermal spas in metropolitan France.

Source : CNETH.



## ► PRESCRIPTION ET REMBOURSEMENT D'UNE CURE THERMALE

La cure dure trois semaines (dix-huit jours de traitement). Elle est prescrite par le médecin traitant sur un formulaire spécial. Les soins thermaux sont prescrits par le médecin thermal et mis en œuvre dans l'établissement thermal. Il y a environ six cents médecins thermaux, spécialistes ou généralistes titulaires de la capacité d'hydrologie médicale. La cure peut associer la prise en charge d'une indication principale et d'une indication secondaire ; elle peut, dans des conditions le justifiant, être réalisée dans le cadre d'une hospitalisation (hôpital thermal, maison d'enfants à caractère sanitaire).

Les contre-indications au thermalisme sont d'ordre général et correspondent à des affections évolutives susceptibles d'être aggravées par la cure (cancers en phases évolutives, maladies inflammatoires en poussée, infections actives) et à des maladies ne permettant pas de supporter la cure sur le plan général, notamment insuffisances cardiaque et respiratoire.

Les soins thermaux et la surveillance médicale sont remboursés sur la base du tarif de responsabilité de la sécurité sociale (maladie, affection de longue durée, invalidité, pensions de guerre, accidents du travail et maladies professionnelles). Une prestation d'hébergement et de transport peut être allouée selon des conditions de ressource. ■



◀ **Source du Par à Chaudes-Aigues (Cantal) : émergence d'eau thermale à 82 °C.**

*The Par spring in Chaudes-Aigues (Cantal Department) discharges 82°C thermal water.*

© BRGM im@gé

## Les produits thermominéraux

Ils naissent des particularités de la géologie : les eaux sont chargées de minéraux par un long cheminement souterrain et jaillissent dans des sources le plus souvent situées dans des régions montagneuses ; les vapeurs sont produites par des eaux de température très élevée ; les limons sont le substrat végétal des boues et sont recueillis dans des cours d'eaux et autres sites aquatiques ; les gaz jaillissent principalement dans des accidents volcaniques (essentiellement gaz carbonique) ou montagneux d'autre nature (hydrogène sulfuré, radon) pour ne citer que quelques exemples. Les eaux sont caractérisées par leur composition chimique (quantité et nature des minéraux contenus sous forme ionique), pH, température. Les eaux sont classées sur le plan thérapeutique en fonction de leur composition chimique :

- ▶ eaux sulfurées sodiques ou calciques,
- ▶ eaux sulfatées,
- ▶ eaux chlorurées sodiques – salées –,
- ▶ eaux bicarbonatées gazeuses,
- ▶ eaux faiblement minéralisées – moins de 500 mg par litre – et en particulier oligo-métalliques (cuivre, arsenic, sélénium, zinc...),
- ▶ eaux ferrugineuses.

On considère aussi leur température et on distingue :

- ▶ des eaux hyperthermales dont la température est supérieur à 50 °C,
- ▶ des eaux mésothermales ou thermales dont la température est comprise entre 35 °C et 50 °C,
- ▶ des eaux hypothermales dont la température est comprise entre 20 °C et 35 °C,
- ▶ des eaux froides dont la température est inférieure à 20 °C.

Les eaux minérales peuvent être bues, mises au contact des tissus (muqueuses respiratoires et digestives, plaies principalement), administrées sous forme de bains individuels ou collectifs, de douche à des degrés de pression variables (de moins de 1 bar à environ 6 bars). L'eau thermale, notamment lorsqu'elle est riche en barégine (véritable plancton thermal présent dans certaines eaux minérales et qui leur donne de l'onctuosité) est un adjuvant précieux du massage manuel qui peut se faire à sec ou sur un sujet immergé ou aspergé d'eau thermale.

Les vapeurs peuvent être respirées (humages), administrées sous forme de bains localisés (mains et pieds dans les étuves de Berthollet), généralisés (en étuve individuelle ou en site naturel – *vaporarium* –), de jets dirigés sur les zones à traiter.

Les gaz sont administrés sous forme de bains dans des étuves individuelles ou collectives, en applications localisées sur les zones à traiter, en adjonction à des bains d'eau minérale.

Les boues thermales (péloïdes) sont formées d'un limon recueilli en site naturel et mûri au contact de l'eau thermominérale pendant plusieurs mois, éventuellement enrichi de plancton thermal. Elles contiennent des substances minérales, organiques et des micro-organismes vivants. Leurs propriétés biologiques sont multiples ; on a montré leur action anti-inflammatoire, antiradicalaire, immunostimulante en particulier. Les boues artificielles utilisées dans certaines stations sont préparées extemporanément en mélangeant une argile (bentonite le plus souvent, kaolin...) avec de l'eau thermale ; elles ne subissent pas de maturation, ne contiennent pas de micro-organismes, et sont principalement utilisées pour leurs caractéristiques thermodynamiques. Les boues peuvent servir à des bains complets, rarement utilisés pour des raisons d'hygiène ; elles sont le plus souvent appliquées sur la ou les zone(s) à traiter (illutions, cataplasmes...).

## Quelles orientations thérapeutiques ?

Le thermalisme en France est organisé autour de douze orientations médicales : rhumatologie, voies respiratoires, phlébologie, dermatologie, neurologie, affections psychosomatiques, gynécologie, voies digestives et métabolisme, voies urinaires et métabolisme, affections des muqueuses buccales, troubles du développement de l'enfant, maladies cardio-artérielles. Ces orientations sont principalement liées à la nature des produits thermominéraux présents et exploités

dans la station, mais aussi aux compétences et techniques de soins développées et mises en œuvre sur chaque site. Sur le *tableau 1*, on présente les éléments essentiels, mais non exhaustifs de cette classification.

Eaux	Orientations
Sulfurées	Rhumatologie ORL Respiratoire
Sulfatées	Neurologie Rhumatologie Dermatologie Stomatologie
Chlorurées sodiques	Rhumatologie Gynécologie Enfants
Bicarbonatées	Digestif Diabète Phlébologie Rhumatologie
Bicarbonatées et chlorurées	Respiratoire Rhumatologie Dermatologie Stomatologie Enfants
Oligo-minérales	Urinaire Phlébologie Rhumatologie

▲ **Tableau 1 : Eaux minérales et orientations thérapeutiques essentielles.**

*Table 1: Mineral water types and primary therapeutic orientations.*

En **rhumatologie** la cure thermale améliore de très nombreuses situations chroniques : lombalgie chronique, coxarthrose et gonarthrose, arthrose des mains et des pieds, rhumatismes inflammatoires en dehors des poussées évolutives (polyarthrite, spondylarthrite, rhumatisme psoriasique), fibromyalgie, suites de chirurgie ostéoarticulaire, séquelles d'algodystrophie notamment. À cela sont en train de s'ajouter les cohortes de patients victimes du Chikungunya. La cure rhumatologique est une cure externe utilisant principalement des eaux chaudes et faite essentiellement de balnéation, d'applications de boues, de douches, de massages, d'exercices.

Dans le domaine **respiratoire**, asthme, bronchite chronique, rhino-sinusite chronique, otite chronique ou récidivante, pharyngite chronique sont les affections les plus emblématiques. Les patients bénéficient principalement de techniques de humage, inhalations, aérosols, lavages, exercices respiratoires.

En **phlébologie**, les eaux ne sont pas chaudes ; elles sont administrées sous forme de bains, douches ; les exercices de marche, les massages de drainage complètent l'essentiel de l'arsenal thérapeutique dont bénéficient les sujets porteurs d'insuffisance veineuse chronique,

avec ou sans troubles trophiques (ulcères variqueux), de séquelles de phlébite, voire de lymphoedème. Les techniques carbogazeuses (bains, injections), les exercices dans l'eau améliorent les artériopathies chroniques et la maladie de Raynaud.

En **pathologie digestive et urinaire**, longtemps l'essentiel du traitement fut la cure de boisson (cure interne), complétée pour le tube digestif par une mise en contact de l'eau thermale et de la muqueuse digestive (goutte à goutte rectal, entérocluse notamment). On y associe des pratiques externes de massage du cadre colique, de bains généraux, de douches, de cataplasmes abdominaux ou lombaires. Les colopathies fonctionnelles, les séquelles d'amibiase sont les indications digestives essentielles ; les infections urinaires chroniques et la lithiase rénale, les indications urinaires principales. Au plan métabolique, diabète non insulino-dépendant, obésité, surcharge pondérale, dyslipémies constituent le champ d'intervention où les techniques thermales doivent être complétées par de l'exercice et de l'éducation du patient.

Les indications **gynécologiques** (douleurs pelviennes chroniques, infections chroniques, stérilité par séquelles infectieuses) justifient balnéation, applications de cataplasmes de boues, administration locale (douches, irrigations...) de produits thermaux.

PUBLICITÉ



▲ **Soin respiratoire : inhalation de gaz hydrothermaux.**  
*Respiratory treatment: inhalation of hydrothermal gases.*

L'enseignement du thermalisme concerne les professions médicales, paramédicales et les professionnels du thermalisme. Le thermalisme figure au programme du deuxième cycle des études médicales. Il est cependant très diversement enseigné dans les diverses facultés de médecine ; seule la faculté de médecine de Montpellier conserve un module optionnel consacré au thermalisme. Les médecins généralistes exerçant en station thermale peuvent se former dans le cadre de la capacité de médecine thermale, diplôme national de troisième cycle organisé par plusieurs facultés de médecine. Il n'y a pas de formation spécifique au thermalisme dans le cursus des études d'infirmier ou de masseur-kinésithérapeute. L'Institut du thermalisme de Dax a créé un diplôme d'université d'infirmière en milieu thermal et un diplôme d'université de masseur kinésithérapeute en milieu thermal ; ces diplômes sont ouverts aux personnes titulaires d'un diplôme d'État. La formation des agents thermaux est organisée par diverses structures : entreprises, GRETA, Institut de Dax (licence professionnelle, diplôme d'université d'agent des services thermaux, diplôme d'université d'aide soignant thermal, diplôme d'université de responsable d'établissement d'hydrothérapie).

La recherche est un problème essentiel pour le thermalisme. Jusqu'à dans les années 50, les stations thermales ont été des foyers de recherche aussi bien clinique que biologique. Les contraintes de la méthodologie des essais cliniques, les progrès de la biologie, les contraintes de la démographie médicale ont progressivement réduit l'effort de recherche. La recherche thermale se réanime depuis quelques années : travaux de recherche biologique publiés dans de bonnes revues, essais cliniques

thermaux qui bénéficient d'une meilleure approche méthodologique et sont publiés dans de prestigieux journaux médicaux édités dans des pays sans pratique ou tradition thermales. Le développement de la recherche, à l'initiative de l'AFRETH (Association française pour la recherche thermale), est prometteur. Les études publiées à ce jour permettent tout d'abord d'établir la supériorité des produits thermominéraux (eaux minérales, boues, gaz...) et du traitement thermal lorsqu'on les compare à leurs semblables non thermominéraux (eaux de réseaux urbains, boues artificielles, traitements rééducatifs délivrés en milieu usuel). Les études cliniques démontrent d'ores et déjà l'intérêt du traitement thermominéral dans de nombreuses affections musculo-squelettiques notamment (lombalgie chronique, sujets arthrosiques – genoux, hanches, mains, colonne cervicale –, sujets porteurs de rhumatismes inflammatoires – polyarthrite rhumatoïde, spondylarthrite ankylosante, rhumatisme psoriasique –, fibromyalgie...). L'approche médico-économique doit compléter l'approche clinique.

Les études scientifiques approfondissent aussi la connaissance du mécanisme d'action des produits thermominéraux, considérés comme un véritable médicament, le médicament thermal. Elles s'intéressent également à la sécurité, notamment microbiologique, toxicologique, des produits utilisés dans les établissements thermaux, s'intégrant pleinement dans la démarche qualité engagée depuis de nombreuses années par les exploitants thermaux. Elle intéresse aussi bien la production et la gestion des produits thérapeutiques que les soins thermaux, voire les pratiques complémentaires thermales. ■

En **dermatologie**, bains, douches, pulvérisations, applications de produits dermocosmétiques, massages permettent de lutter contre nombre de dermatoses chroniques au premier rang desquelles psoriasis et dermatite atopique chronique. La cure thermale est également très profitable pour les brûlés dont elle contribue à favoriser une cicatrisation harmonieuse.

Les **affections des muqueuses buccales** (parodontopathies, stomatites chroniques, intolérances aux prothèses, aphtoses...) sont améliorées par les bains buccaux, les douches et autres soins de bouche.

Des techniques voisines des techniques rhumatologiques permettent d'améliorer des **situations neurologiques** : séquelles paralytiques d'origine centrale (hémiplésies notamment) ou périphérique (notamment séquelles de poliomyélite, de syndrome de Guillain Barré). Complétées par des techniques de psychothérapie et de relaxation, elles s'utilisent également dans la prise en charge des **affections psychosomatiques**, en particulier troubles anxieux et dépressifs, dystonies neuromusculaires et neurovégétatives.

L'enfant peut tirer bénéfice de cures thermales pour des affections respiratoires, cutanées et également pour des **troubles du développement**. Ces derniers regroupent principalement des troubles de type ostéoarticulaire et l'énurésie ; dans cette dernière

indication, la psychothérapie, le changement de milieu sont des éléments thérapeutiques essentiels.

### Le thermalisme en quelques chiffres...

Les établissements thermaux sont placés sous le contrôle du **ministère de la Santé** qui est assisté de l'**AFSSAPS** (Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé) pour apprécier la qualité des produits thermaux, et de l'**Académie de médecine** qui établit les propriétés thérapeutiques des eaux, produits et traitements thermominéraux. Les cent quatre stations thermales sont conventionnées avec la sécurité sociale. Elles mettent en œuvre la centaine de soins répertoriés et normalisés regroupés en forfaits par orientation thérapeutique ; quatre à six soins quotidiens sont

#### Soin thermal pédiatrique.

*Thermal treatment in pediatrics.*

© CNETH

#### Soin dermatologique : application d'argile.

*Skin treatment: application of clay.*

© Corbis



En France, les établissements thermaux sont placés sous le contrôle du ministère de la Santé qui est assisté de l'AFSSAPS pour apprécier la qualité des produits thermaux, et de l'Académie de médecine qui établit les propriétés thérapeutiques des eaux, produits et traitements thermominéraux.

obligatoires en fonction de l'orientation. Les établissements doivent satisfaire aux obligations d'hygiène, en particulier à l'absence de germes pathogènes dans les eaux thermales.

Le **ministère du Tourisme** est l'autorité de tutelle des stations thermales qui bénéficient habituellement du statut de stations classées (avantages fiscaux et administratifs, possibilité d'exploiter des établissements de jeu).

95 % des soins délivrés par les cent vingt établissements thermaux français sont des cures médicales remboursées par la sécurité sociale qui dépense ainsi environ deux cents millions d'euros par an (soins délivrés par les établissements et honoraires médicaux). Les 5 % restants sont représentés par du thermalisme non remboursé (étrangers, cures « libres ») ou non médical (remise en forme). Le chiffre d'affaires global du thermalisme est de l'ordre du milliard d'euros. Les emplois générés, directs, indirects et induits (*tableau 2*), concernent plus de 100 000 personnes. Cette activité génère des contributions sociales et fiscales significatives. Le coût moyen d'une cure ressort à environ 1 500 €, dont le quart correspond aux frais de cure (soins et surveillance médicale), le reste représentant les dépenses de séjour (60 % du total) et d'autres natures. L'activité thermale est très inégale selon les indications (*tableau 3*)

## Avenir du thermalisme

Il repose sur de nombreux éléments. Diversifier et enrichir l'offre de soins concernant la pathologie actuellement prise en charge dans les stations thermales en la complétant de programmes éducatifs, d'entraînement notamment dans le cadre d'une véritable créno-réadaptation, élargir le thermalisme aux domaines de la prévention, des soins de suite et de réadaptation, de l'accompagnement du vieillissement, constituent quelques pistes prometteuses. Par ailleurs, le caractère écologique et respectueux de l'environnement inscrit le thermalisme dans un concept concret de développement durable. Le caractère global de la prise en charge des personnes qui effectuent une cure thermale correspond bien à l'attente des patients qui souhaitent être considérés en tant que personnes malades et non en tant que porteurs d'une affection



## Balneology, the cure that Earth has given us

Balneology is a medical therapy, implemented on medical prescription, that makes use of mineral waters, steam, gases and hot mud according to a variety of means of application. In France, it concerns half a million patients who benefit yearly from a course of treatment at a spa. Water is classified as mineral when, issuing from an

identifiable spring, it possesses specific and consistent physical-chemical properties and microbiological pureness and has demonstrated its capability to benefit health. Thus, there are approximately 700 recognized mineral springs in France used for bottled water and/or the operation of some hundred thermal spas in metropolitan France and the Overseas Departments. These springs flow in spots determined by their geology. In large majority, they lie in mountainous areas (the Pyrenees, the Alps, the Massif central and the Vosges), although a few are located near the coast. Twelve therapeutic orientations are recognized by the social security ("sécurité sociale") that reimburses the treatments (lasting three weeks): rheumatism, the respiratory tract, phlebology, dermatology, metabolism-digestive tract, metabolism-urinary tract, gynaecology, childhood developmental disorders, neurology, psychosomatic disorders, cardioarterial disease and ailments of oral mucous membranes. Research is striving to gain a better understanding of the nature and biological properties of thermo-mineral products. It likewise aims to confirm the medical benefit accrued; interesting scientific proof demonstrates the efficacy of balneology, notably in rheumatology, dermatology, phlebology, neuropsychiatry and metabolism. Furthermore, the economic importance of balneology is essential for the mainly mountainous regions where the spas are situated. Thus, the employment of some one hundred thousand individuals is connected with balneology.

**Tableau 2 : Thermalisme et emploi.**

Table 2: Balneology and jobs.

CNETH (2004)

Emplois	Postes	ETP (*)
Directs	13 800	8 200
Indirects	40 330	15 230
Induits par les achats	13 530	4 510
Induits par les consommations	40 600	20 300
Induits par les investissements	2 400	600
TOTAL	110 660	48 840

(\*) Equivalent Temps Plein

**Tableau 3 : Prévalence des diverses orientations du thermalisme.**

Table 3: The relative importance of the various orientations in balneology.

CNETH (2004)

	%
Rhumatismes	65
Voies respiratoires et ORL	14
Pathologies digestive, urinaire, troubles métaboliques	7,5
Troubles circulatoires	6,5
Dermatologie	4
Affections psychosomatiques	2
Autres	1

déterminée.

Enfin, le thermalisme contribue fortement à l'aménagement du territoire et réalise une redistribution de la richesse créée particulièrement significative ; on peut à ce titre parler d'une thérapeutique citoyenne.

Thérapeutique multimillénaire, le thermalisme s'affirme comme une thérapeutique moderne notamment par la qualité des soins et des produits thermaux, son utilité sanitaire, le caractère global de la prise en charge de la personne soignée, l'importance et la qualité de la recherche qui est en train de se développer, la dimen-



L'eau du robinet et l'eau en bouteille sont souvent mises en concurrence, ce qui suppose de bien connaître leurs spécificités, leurs qualités, leurs impacts sur l'environnement. Issues essentiellement du milieu souterrain, les eaux du robinet sont dans la plupart des cas traitées au contraire des eaux en bouteille libres de toute contamination. Mais dans tous les cas, les contrôles qualitatifs nombreux, les normes microbiologiques, les contraintes réglementaires recherchent une protection globale des consommateurs.



## Boire l'eau du robinet ou l'eau en bouteille



**Philippe Vigouroux**

HYDROGÉOLOGUE  
RESPONSABLE EAU MINÉRALE,  
SERVICE EAU  
BRGM  
[p.vigouroux@brgm.fr](mailto:p.vigouroux@brgm.fr)

**Thierry Pointet**

HYDROGÉOLOGUE  
SERVICE EAU  
BRGM  
[t.pointet@brgm.fr](mailto:t.pointet@brgm.fr)

Les épisodes caniculaires récents ont conduit les consommateurs à augmenter leur consommation d'eau et à s'interroger, à la lumière de nombreux articles parus dans la presse, sur l'eau qui leur était proposée.

Le choix entre eau du robinet et eau en bouteille conduit à la nécessité de mieux comprendre ce qui se cache derrière chacune de ces appellations.

Cet article a pour objet d'apporter des éléments d'appréciation sur cette question, à la lumière, notamment, des réflexions du monde des professionnels (cf. encadrés de la Chambre syndicale des Eaux Minérales et du Centre d'information sur l'eau, représentant respectivement eau en bouteille et eau du robinet). Les deux « boissons » sont présentées, aux plans technique et réglementaire, sur un mode plus parallèle que comparatif afin d'aider chaque consommateur à se faire une idée plus juste sur les eaux auxquelles il a accès.

### Des spécificités à chaque eau

Il est utile de rappeler les points essentiels qui caractérisent eaux du robinet et eaux en bouteille, du point de vue de la production et de la consommation.

Les eaux du robinet (AEP<sup>(1)</sup>) proviennent à 60 % de gisements souterrains avec 35 000 captages et une production globale annuelle de 4,4 milliards de m<sup>3</sup> (volume 2004 d'eau domestique facturée<sup>(2)</sup>) en France.

Les gisements concernés sont d'extension telle qu'une protection naturelle globale ne peut pas, dans la majorité des cas, être assurée. Les eaux « brutes » prélevées dans le milieu souterrain sont le plus généralement traitées, souvent à titre préventif, pour garantir la qualité sanitaire de l'eau distribuée au long de réseaux d'extension souvent importante (des centaines de kilomètres pour les grandes agglomérations et un total de 800 000 km à l'échelle nationale). L'usage de l'eau du robinet pour la boisson ne représente que 1 % de la consommation « à la maison » (44 millions de m<sup>3</sup>, soit 700 litres par an par personne ou environ 2 litres par jour).

Les eaux en bouteille, qui regroupent les eaux de source<sup>(3)</sup> et les eaux minérales, sont issues à 100 % de gisements souterrains. La production annuelle d'eau

		2001	2002	2003	2004	2005
Eau minérale	Marché national	4 515	4 498	4 495	4 402	4 250
	Exportation	2 090	2 116	2 240	2 203	2 300
Eau de source	Marché national	2 500	2 630	2 660	2 610	2 700
	Exportation	400	420	450	480	450
Production totale		9 505	9 664	9 845	9 695	9 700
Production pour le marché national		7 015	7 128	7 155	7 012	6 950
		74 %	74 %	73 %	72 %	72 %

en bouteille (cf. tableau 1 et figure 1) représente en France environ 10 milliards de litres (soit 10 millions de m<sup>3</sup>) dont les trois-quarts pour le marché national.

Avec environ 150 litres par an et par personne, l'eau en bouteille représente en France environ 20 % de l'eau de boisson consommée<sup>(4)</sup>.

**Tableau 1 : Production annuelle d'eau en bouteille en France (en millions de litres).**  
Table 1: France's annual production of bottled water (in millions of litres).

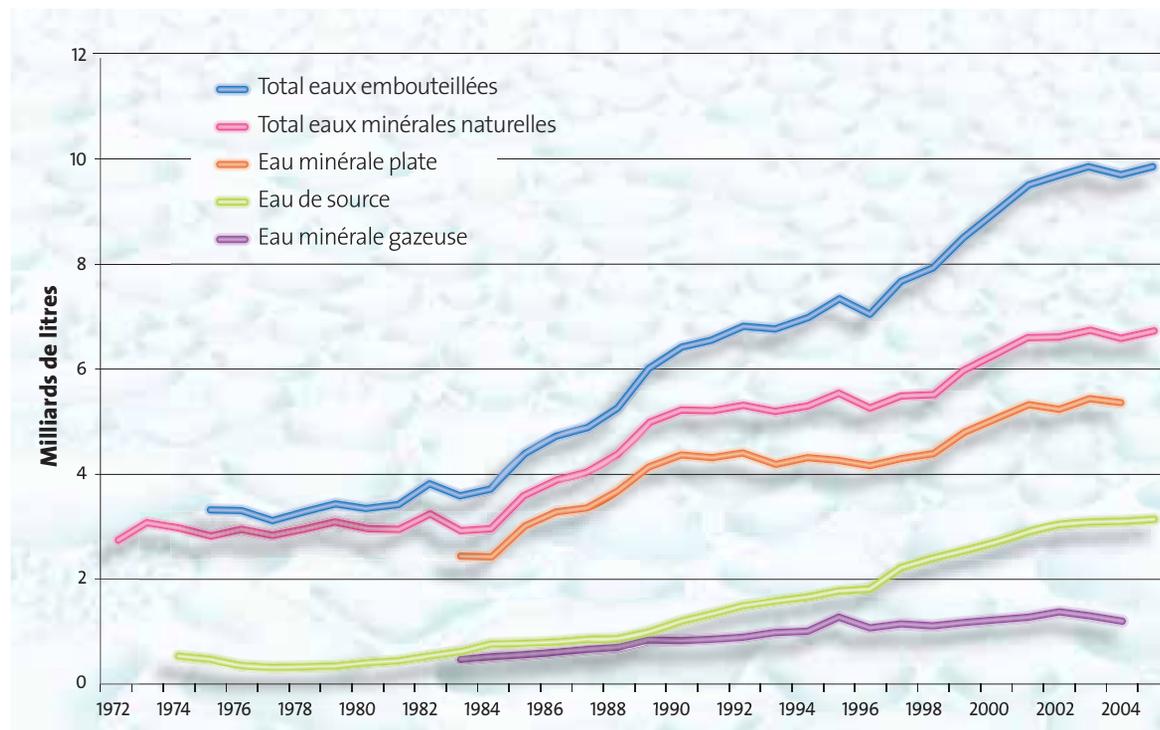
Source : Chambre Syndicale des Eaux Minérales et Syndicat des Eaux de Source.

(1) AEP : Alimentation en Eau Potable ; volume distribué de 5,6 milliards de m<sup>3</sup> – cf. IFEN 2001 (www.ifen.fr).

(2) Données du Centre d'information sur l'eau (www.cieau.com).

(3) La notion de « source » est à mettre en relation avec un gisement et le mode d'exploitation de celui-ci. Une « source » désigne ainsi un gisement exploité par une émergence naturelle ou un forage.

(4) Un taux assez élevé pour l'Europe, la France figurant au même niveau que la Belgique, derrière l'Italie (300 l/an/hab.) et devant l'Espagne et l'Allemagne (130 l/an/hab.).



**Fig. 1 : Production d'eaux conditionnées en France.**  
Fig. 1: Production of packaged water in France.

Source : Chambre Syndicale des Eaux Minérales et Syndicat des Eaux de Source.



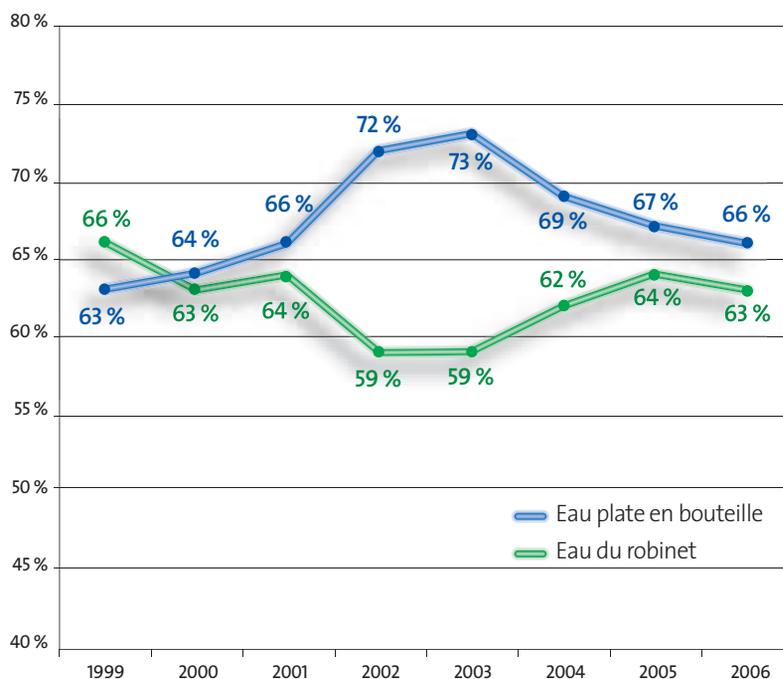
“  
En 2006, 63 % des personnes  
interrogées déclaraient boire  
de l'eau du robinet au moins  
une fois par semaine.”

Les traitements microbiologiques ne sont pas autorisés pour les eaux en bouteille. Les cent dix unités de production d'eau en bouteille en France<sup>(5)</sup> représentent seulement quelques centaines de captages exploités. Ceux-ci sont naturellement protégés et les eaux toujours mises en bouteille sur le site même de leur extraction, sans transport par canalisation en dehors du site de production.

La consommation d'eau du robinet et d'eau en bouteille peut être appréciée par les enquêtes réalisées auprès des consommateurs (cf. figure 2). En 2006, 63 % des personnes interrogées déclaraient boire de l'eau du robinet au moins une fois par semaine (dont 45 % « plusieurs fois par jour ») alors que 66 % affirmaient consommer de l'eau en bouteille au moins une fois par semaine (dont 48 % « plusieurs fois par jour »). Pour les eaux en bouteille, les données présentées ne concernent que l'eau plate et sont donc à relativiser compte tenu de la consommation d'eau gazeuse.

D'un point de vue économique, la différence de coût entre les eaux du robinet et les eaux en bouteille est importante (facteur 100) mais n'est pas toujours bien connue du consommateur. Le consommateur d'eau en bouteille est surtout influencé par la perception qu'il a de la qualité de l'eau du robinet. Des enquêtes<sup>(6)</sup> spécifiques montrent que, dans certaines régions, 46 % des consommateurs préfèrent l'eau en bouteille dont 22,6 % du fait de la pollution (craintes de produits toxiques et de risques pour la santé). Ces chiffres semblent traduire, dans les régions concernées, une perception de la dégradation de la qualité des eaux exploitées plus forte pour l'eau distribuée que pour l'eau en bouteille.

Des critères différencient de manière importante les deux types d'eaux : volumes consommés, importance relative du gisement, composition physico-chimique, caractéristique bactériologique, contexte environnemental, approche réglementaire.



▲  
**Fig. 2 : Déclaration de consommation d'eau en France (au moins 1 fois par semaine).**

Fig. 2: Declared water consumption in France (at least once a week).

Source : C.I.EAU.

### Une approche différente de la qualité

Pour les eaux du robinet provenant des nappes (soit 60 % des cas), il n'existe pas de différence fondamentale entre un gisement d'eau du robinet et un gisement d'eau en bouteille. Il existe plutôt un intérêt spécifique de chaque catégorie d'exploitant envers le gisement, inhérent à chaque activité.

Pour l'exploitant d'eau du robinet, le critère déterminant est la quantité d'eau disponible, constamment disponible : la pénurie n'est pas acceptable. La qualité vient ensuite car tout défaut peut être compensé par un traitement approprié : il existe toujours une solution technique à un problème de qualité initiale. En revanche, pour l'exploitant d'eau en bouteille, le traitement n'est pas autorisé et la qualité est primordiale. Elle

“  
Le consommateur d'eau en bouteille  
est surtout influencé par la perception  
qu'il a de la qualité de l'eau du robinet.”

(5) Données de la Chambre Syndicale des Eaux Minérales et du Syndicat des Eaux de Source.

(6) Enquête « Mission Planification Directive Cadre » de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (AEAG) - Novembre 2003.



**► PROTÉGER LES GISEMENTS D'EAU MINÉRALE : LA SAUVEGARDE DE NOTRE TERROIR**Béatrice Adam Chambre Syndicale des Eaux Minérales – beatrice.adam@csem.fr

Une eau minérale naturelle plate ou gazeuse est par définition une eau souterraine protégée. Cette protection naturelle est liée à chaque fois à des conditions géologiques particulières qui favorisent les temps de circulation longs et, notamment dans le cas des eaux minérales plates, des systèmes poreux permettant de mettre en jeu une filtration naturelle. Cependant, si cette protection naturelle est la garantie indispensable à la pureté de l'eau minérale naturelle, les professionnels de l'eau minérale ont su mettre en place des protections complémentaires afin d'anticiper les éventuels impacts environnementaux futurs de l'Homme sur la nature. Ainsi, certains gisements hydrominéraux bénéficient d'une protection réglementaire issue du code de la santé publique basée sur la Déclaration d'intérêt public (DIP). Cette DIP permet de mettre en place un périmètre de protection dans lequel des prescriptions sont en vigueur. Il s'agit généralement avant tout de limiter des activités qui fragilisent la protection naturelle. Les forages et certains ouvrages souterrains peuvent être soumis à autorisation préfectorale, limitant ainsi les atteintes aux couches géologiques jouant ce rôle protecteur. La maîtrise foncière peut être dans certains cas mise en œuvre ; il s'agit alors pour l'exploitant de cibler la zone d'infiltration des eaux de pluie qui deviendront eau minérale, d'acquiescer les terrains, et d'en assurer la gestion.

Les dimensions des gisements souvent gigantesques, les circulations rarement simples peuvent également nécessiter une politique à plus grande échelle et s'appuyer sur des partenaires locaux. Cette politique partenariale peut prendre plusieurs aspects soit par le biais de convention directe entre l'exploitant et les acteurs locaux (agriculteurs, artisans...), soit par le biais d'association regroupant les élus des territoires concernés (émergence et *impluvium*), les acteurs locaux (population, agriculteurs...) et l'exploitant. Cette politique partenariale aboutit à une démarche concertée financée par l'exploitant en partie ou en totalité. Elle vise à engager des actions dans les domaines de l'équipement public en matière d'assainissement, de la gestion des espaces naturels, de la gestion des activités agricoles (pratiques agro-environnementales), de l'information et de la sensibilisation des populations.

La présence de ces gisements hydrominéraux et les politiques de protection engagées sont une véritable opportunité pour le territoire concerné. L'eau minérale naturelle « produit du terroir » est une richesse culturelle et socio-économique locale reconnue, et à travers le déploiement de ces politiques environnementales, un facteur de développement durable. ■

conditionne la pérennité de l'exploitation. L'objectif de qualité implique une eau non vulnérable, dont l'origine est connue, dont les échanges avec le milieu géologique sont analysés, dont la qualité est stable, au prix d'une étude géologique conséquente.

*Entre l'eau du robinet et l'eau en bouteille, une différence notable porte sur l'importance accordée à la ressource exploitée. La qualité de la ressource est essentielle pour l'eau en bouteille qui ne peut pas être traitée. Le facteur qualité de la ressource est moins impératif pour les eaux du robinet puisque les traitements sont autorisés. Le facteur quantité (débit exploitable) est le facteur prépondérant dans le cas des eaux du robinet.*

*Nota : Certains articles font référence à des eaux souterraines exploitées pour de l'eau en bouteille et distribuées localement au robinet. De tels cas existent certes (même eau au robinet et dans la bouteille), pour le plus grand bénéfice de quelques habitants. On doit cependant s'interroger sur la représentativité de telles situations. Ces cas particuliers ne peuvent pas, en toute rigueur, être présentés comme des généralités au regard du nombre très faible d'abonnés desservis en comparaison aux millions d'abonnés à l'eau du robinet. Il convient d'être prudent par rapport à une présentation, à l'évidence tendancieuse, de certaines situations.*

“ Pour l'eau en bouteille, les contrôles dépassent plusieurs centaines par jour, et plusieurs milliers par an pour l'eau du robinet. ”

**Des caractéristiques physico-chimiques particulières**

Chaque boisson possède des critères de potabilité très précis avec des contrôles stricts qui garantissent le respect de la qualité de référence.

Les eaux du robinet contiennent des éléments minéraux et des oligo-éléments, comme toutes les eaux souterraines. La minéralisation des eaux du robinet est variable selon les situations d'exploitation. Les normes en vigueur<sup>(7)</sup> dites « normes eau potable » imposent une qualité d'eau distribuée définie, pour chaque élément, sur la base de concentrations maximales à ne pas dépasser. La qualité de l'eau du robinet peut varier en un point donné sous réserve qu'aucun dépassement de teneur ne soit constaté. À défaut, l'eau sera traitée avant distribution, mais, dans tous les cas, le consommateur dispose d'un produit conforme au plan sanitaire.

(7) cf. décret n° 2001-1220 du 20 décembre 2001 – Limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine.



La composition des eaux en bouteille est naturelle<sup>(8)</sup> puisque les traitements ne sont pas autorisés à l'exception de l'élimination de certains éléments instables<sup>(9)</sup>. De nombreuses eaux en bouteille possèdent une composition physico-chimique conforme aux « normes eau potable ». Certaines eaux minérales présentent des concentrations qui dépassent ces normes : l'eau est alors prisée pour sa qualité gustative ou pour une vertu thérapeutique. Dans tous les cas, le consommateur a accès à un produit naturel de grande qualité.

Les contrôles de qualité effectués sur les eaux consommées sont très nombreux : pour l'eau en bouteille, les contrôles dépassent plusieurs centaines par jour<sup>(10)</sup> et plusieurs milliers par an<sup>(11)</sup> pour l'eau du robinet.

*La différence principale entre eau du robinet et eau en bouteille porte sur la caractérisation « normative » de la qualité de l'eau consommée. Les eaux en bouteille ont la composition physico-chimique naturelle des eaux du gisement exploité (hors séparation d'éléments instables ne dénaturant pas la composition de l'eau).*

## Conformité microbiologique

Toutes les eaux distribuées, au robinet ou en bouteille, sont microbiologiquement conformes aux normes de santé et dûment contrôlées.

(8) Cette composition est totalement stable pour les eaux minérales.

(9) Les seuls traitements autorisés sont des traitements physiques qui ne dénaturent en rien la composition minérale de l'eau. Ces traitements sont destinés à retirer des éléments instables (tels que le fer, le soufre, le manganèse, etc.), qui pourraient précipiter et donner des dépôts : les eaux gazeuses par exemple qui sont souvent ferrugineuses peuvent donc être déferrisées.

(10) cf. sites de certaines grandes marques (< [www.evian.fr](http://www.evian.fr) > < [www.vittel.com](http://www.vittel.com) >...).

(11) cf. sites de grandes villes (< [www.sagep.fr](http://www.sagep.fr) > < [www.grandlyon.com](http://www.grandlyon.com) >...).

Si nécessaire, les eaux du robinet peuvent, à nouveau, subir des traitements à l'aide de produits désinfectants, utilisés souvent à titre plus préventif que curatif, pour éliminer les contaminations possibles lors du parcours en réseau.

Les eaux en bouteille sont par définition, naturellement protégées et exemptes de toute contamination microbologique à l'émergence. Aucun traitement microbologique n'est autorisé et l'eau souterraine extraite est ainsi mise en bouteille sous sa forme naturelle.

*Entre eau du robinet et eau en bouteille, il existe principalement une différence sur le caractère naturel de l'eau consommée et l'absence de traitement microbologique des eaux en bouteille.*

## Des approches environnementales divergentes

Les eaux du robinet sont soumises aux actions anthropiques dans l'environnement plus ou moins éloigné des captages, avec présence de nitrates, pesticides, métaux lourds... Les distributeurs d'eau ne disposent pas toujours de moyens d'action étendus pour faire évoluer les situations, et doivent tenir compte de la qualité de l'eau brute extraite et mettre en œuvre, en tant que besoin, des techniques de traitement.

▲ **Bloc « rinçuse, soutireuse, boucheuse » dans une unité d'embouteillage.**  
A rinsing/filling/capping line in a bottling plant.

© Nestlé - Waters

## ► POUR UNE COMMUNICATION PARTAGÉE SUR L'AVENIR DE LA RESSOURCE

Monique Chotard Directeur du C.I.EAU

La disponibilité de l'eau est une des causes majeures d'inquiétude pour l'avenir de notre planète. Vrai sujet souvent objet de faux débats.

Sur l'eau en tout cas tout se dit, le juste et l'erroné.

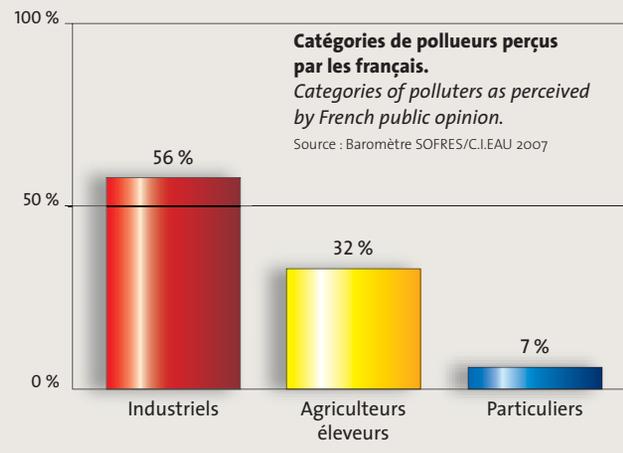
Les études du C.I.EAU montrent qu'il existe un certain flou dans l'opinion entre quantité ou qualité des ressources, entre quantité ou qualité de l'eau du robinet.

Cependant, ils sont une large majorité (80 %) à avoir confiance dans l'eau du robinet. Leurs inquiétudes portent plus sur l'avenir de l'état des milieux naturels que sur les pénuries à venir car ils estiment que globalement la France ne manquera pas d'eau à court ou moyen termes. Comment faire une information concrète et précise ?

Il ne faut pas se tromper de discours. L'usage de l'eau pour la consommation domestique ne représente que 25 % des consommations. Aussi, lorsque les seules économies au robinet sont mises en avant, le discours n'est pas crédible pour le public. Les consommateurs ne veulent pas être les seuls à se limiter car ils ont conscience que l'agriculture et l'industrie jouent un rôle bien plus important dans l'utilisation de la ressource.

Certes, chaque geste compte, et il ne faut pas décourager les comportements individuels mais si l'on veut faire naître une nouvelle culture de l'eau, ce n'est pas à ce seul niveau, loin de là, qu'il faudra agir.

L'action devra porter sur une sensibilisation démontrant que l'addition de comportements individuels et collectifs est la bonne réponse. Agriculteurs, éleveurs, industriels de l'énergie et des biens de consommation, collectivités locales devront eux aussi faire la preuve de leur implication.



La nouvelle culture de l'eau doit être partagée.

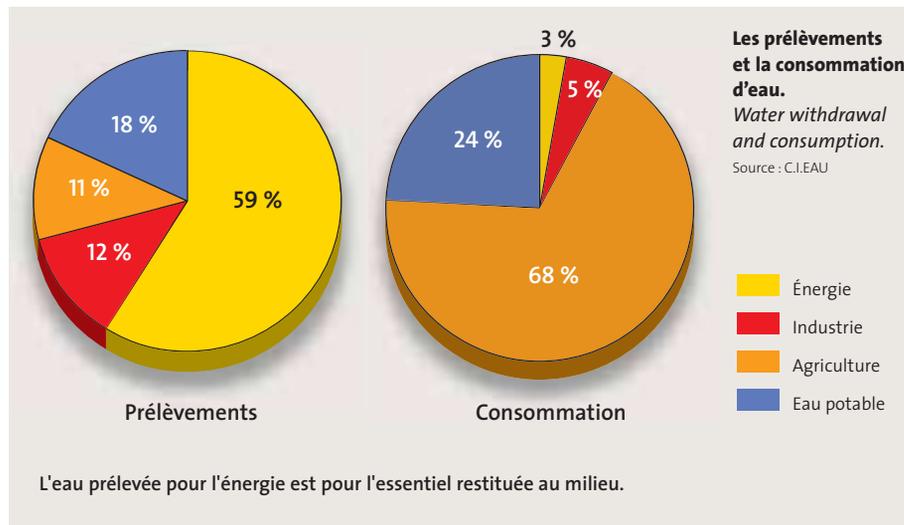
Il faut se garder de faire croire que l'utilisation de l'eau par tel ou tel est abusive.

Chacun des utilisateurs agit pour le bien commun et la vie en société. Pour une nouvelle culture, il faut que **tous** les consommateurs d'eau optimisent leur utilisation des ressources en prenant leur part de responsabilité à la fois dans la préservation de la quantité et de la qualité de l'eau disponible.

Pour créer une nouvelle culture de l'eau, il faut d'abord une pédagogie pour éviter le développement d'idées fausses, et ensuite une communication pour expliquer l'utilité économique et sociale de chaque secteur ainsi que les efforts qu'ils fournissent pour préserver l'eau.

Alors et alors seulement, au lieu d'aphorismes sur l'avenir de l'eau qui n'ont pas de portée sur les comportements mais seulement sur les attitudes, se développera un discours mature où chacun aura un rôle et une responsabilité à la mesure de son influence sur la disponibilité de la ressource. ■

Le C.I.EAU est un organisme créé, en 1995, par les principales entreprises françaises assurant le service de l'eau en délégation, afin de mettre à disposition de nombreux publics (consommateurs, médias, scolaires, professions de santé, acteurs de l'eau...) des informations sur toutes les questions se rapportant à l'eau du robinet, service, qualité, prix, réglementation, eau et santé ([www.cieau.com](http://www.cieau.com)).



Pour mémoire, après usage, l'eau du robinet est recyclée en grande partie dans le processus d'assainissement des eaux usées avant retour à l'environnement.

Les eaux en bouteille sont produites sur des sites où le souci environnemental est très présent puisque la protection des gisements est nécessaire à la pérennité de l'activité. La gestion durable de la ressource est donc le moteur de nombreux investissements destinés à préserver l'environnement. L'influence indirecte du produit « manufacturé » (la bouteille) sur l'environnement n'est

cependant pas négligeable. La production d'eau en bouteille possède un coût écologique notable, sur le plan énergétique (fabrication et transport) et sur le plan du recyclage des contenants. L'eau en bouteille est, à ce titre, un produit industriel comme beaucoup d'autres, avec un service rendu qui a un coût écologique.

*Sur le plan environnemental des différences marquées opposent eau du robinet et eau en bouteille. L'influence de l'environnement sur l'eau du robinet nécessite souvent des traitements. En contrepartie l'influence de l'eau du*



### Faucet water or bottled water?

Faucet water and bottled water are two beverages frequently compared. How are they alike and how are they different? Consumers should be provided with a few pertinent reference points. Sixty percent of all faucet water comes from underground. Its production, from 35,000 wellheads, is stupendous (4.4 billion m<sup>3</sup> tapped), but only 1% of the potable water distributed (transiting through thousands of kilometres of waterlines) is actually drunk.

Bottled water comes exclusively from groundwater. Its production, on some one hundred sites in France, is approximately 10 million m<sup>3</sup>, or 10 billion bottles. The water is distributed in its bottle. For bottled water, the resource's quality is essential since it cannot be treated. For faucet water, on the contrary, treatment is allowed. The amount of water tapped is an important factor for faucet water since a well and its distribution system supply many uses other than drinking water.

As to quality standards, faucet water may undergo treatment. Bottled water, on the other hand, possesses the natural and stable physico-chemical composition of the aquifer from which it is tapped, although a few of its elements may be unstable. In terms of microbiology, there is a difference between the natural character of the water consumed and the untreated state of bottled water.

From an environmental standpoint, interactions go both ways. The environment's influence on faucet water is obvious, to an extent where it may justify treatment. For bottled water, the environment around the wellheads is permanently protected. Conversely, while faucet water's impact on the environment is insignificant aside from waste water, that of bottled water is not, simply because of what happens to the bottles themselves.

From a regulatory standpoint, codes guarantee the specific properties of each, and consumer protection in all instances. Succinctly, bottled water might be said to be comparable to an "organic" product, with one minor difference: the bottle's environmental impact (in energy and recycling).

*robinet sur l'environnement est négligeable. Pour l'eau en bouteille, l'influence de l'environnement sur le produit conduit à rechercher des conditions environnementales très précises, mais l'influence de la bouteille d'eau sur l'environnement ne peut être négligée.*

### Protections réglementaires au bénéfice du consommateur

Les eaux du robinet doivent respecter la réglementation « eau potable », au prix de traitements adaptés. La protection des captages est établie au titre des Déclarations d'utilité publique (DUP). Des périmètres de protection « éloignés » protègent les captages, ils sont cependant d'extension toute relative au regard de la zone d'alimentation totale. Au-delà, des Schémas d'aménagements et de gestion des eaux (SAGE) gèrent au mieux, pour certains sites, la qualité de l'eau à l'échelle du bassin.

Les eaux en bouteille sont soumises à des procédures complexes et contraignantes pour l'obtention des autorisations d'exploitation et d'embouteillage. Naturellement protégées par définition, ces eaux bénéficient de protections réglementaires spécifiques, concentrées sur le secteur proche des captages. Certaines eaux minérales bénéficient de protections plus étendues au titre de l'intérêt qu'elles représentent via des Déclarations d'intérêt public (DIP). L'établissement de périmètres de protection incluant le gisement sur toute son extension peut, dans ce cas, être envisagé.

*Sur le plan réglementaire, les différences entre eau du robinet et eau en bouteille garantissent la spécificité de chacun de ces produits. Dans tous les cas, l'objectif est la protection du consommateur.*

“ L'origine souterraine – ressource – et l'enjeu qu'elle représente supposent que l'on garantissent l'intégrité des gisements. ”

Les eaux du robinet sont majoritairement d'origine souterraine, souvent peu éloignées du lieu de consommation mais doivent être traitées en tant que besoin. De leur côté, les eaux en bouteille sont intégralement d'origine souterraine et sont donc naturellement protégées et distribuées sans traitement. Les sources sont diverses, souvent distantes des lieux de consommation et se distinguent par leur composition naturelle.

L'eau en bouteille est en quelque sorte comparable à un produit « bio » pour les produits de consommation courante, à une nuance près : le poids environnemental (énergie et recyclage) de la bouteille.

L'origine souterraine – ressource – et l'enjeu qu'elle représente supposent que l'on garantisse l'intégrité des gisements qui ne va pas forcément de soi, au moins pour les gisements peu profonds qui peuvent être exposés à des pollutions diffuses et des pollutions ponctuelles. La surveillance par des personnes de métier est une garantie pour le consommateur ; elle entre dans les actions du BRGM notamment, et apporte un outil scientifique d'appui aux politiques publiques. ■

**Périmètre de protection des sources d'Armentières (Yonne).**

*Protection zone surrounding the Armentières springs (Yonne Department).*

© BRGM J.F. Vernoux

En France, plus de la moitié de la population est alimentée en eau potable grâce aux nappes d'eau souterraine. Face au risque de contamination accidentelle des captages d'eau potable, les périmètres de protection constituent l'outil réglementaire de base. Il reste néanmoins d'importants efforts à faire pour assurer la protection de l'ensemble des captages existants et au-delà, pour préserver voire restaurer la qualité des ressources en eau souterraine. Plusieurs pistes existent pour atteindre chacun de ces objectifs, et notamment pour mieux assurer la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine.



# Protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine



**Didier Pennequin**  
CHEF DU SERVICE EAU – BRGM  
d.pennequin@brgm.fr



**Jean-François Vernoux**  
HYDROGÉOLOGUE  
SERVICE EAU – BRGM  
jf.vernoux@brgm.fr



**Charles Saout**  
CHEF DU BUREAU DES EAUX  
DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ  
charles.saout@sante.gouv.fr



**Gaëlle Château**  
INGÉNIEUR DU GÉNIE SANITAIRE  
BUREAU DES EAUX  
DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ  
gaelle.chateau@sante.gouv.fr



**Anne Pillebout**  
INGÉNIEUR DU GÉNIE SANITAIRE  
BUREAU DES EAUX  
DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ  
anne.pillebout@sante.gouv.fr

L'eau est indispensable pour le maintien de toute forme de vie sur la Terre, mais c'est également un puissant vecteur de transport de nombreuses maladies, et de toutes sortes de produits nuisibles ou toxiques pour la santé humaine. Certains l'avaient reconnu très tôt, comme Hippocrate qui, quatre siècles avant Jésus-Christ, attirait déjà l'attention de ses confrères sur le lien qui existe entre une eau de bonne qualité et la santé humaine.

Or l'activité de l'homme depuis un peu plus d'un siècle et demi génère un nombre croissant de produits nuisibles et toxiques qui peuvent, si rien n'est fait, atteindre les ressources en eau et les dégrader en les polluant. Face à ce danger, il convient de protéger au mieux les captages d'eau destinée à la consommation humaine, qui sont par nature des zones de dépression hydraulique attirant vers elles les flux souterrains et les pollutions éventuelles qui seraient entraînées. Les technologies actuelles permettent de traiter un grand nombre d'agents contaminants, mais pas tous. En matière de produits phytosanitaires par exemple, les meilleures technologies de traitement disponibles, compte tenu de leur rendement, ne permettent pas, au-delà d'un certain seuil de contamination des ressources en eau, de respecter les limites de qualité fixées pour l'eau de boisson. Enfin, les considérations économiques et la nouvelle législation, comme la

directive cadre européenne sur l'eau d'octobre 2000, imposent une approche préventive portant sur la préservation (voire l'amélioration) de la qualité de la ressource en eau.

Cet article entend aborder le sujet de la protection des captages d'eau potable en France, les problèmes rencontrés et les perspectives qui s'ouvrent. Il se focalise sur les captages d'eau souterraine, qui prélèvent actuellement en France de l'ordre de 6,5 milliards de m<sup>3</sup> par an, soit près de 50 % du volume total annuel d'eau soutiré de l'ensemble des ressources en eau.

### Les outils de base de la protection des captages d'eau

La protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine pour être efficace doit s'effectuer à la fois sur la base des réalités physiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques du système aquifère concerné (aussi complexes soient-elles), et de celles du tissu socio-économique qui s'y est juxtaposé.

Cette protection doit être établie en prenant en considération la zone amont du point de captage, sur l'étendue d'un secteur qu'il faut déterminer en fonction du niveau de protection recherché, des vitesses de transfert de l'eau, de l'hydrodynamique et des variations spatio-temporelles des réservoirs concernés (nappe, rivière, etc.), de leur degré d'interconnexions hydrauliques et des activités humaines pouvant présenter un risque de détérioration de la ressource en eau.

En pratique, pour assurer cette protection, deux grandes catégories d'outils de base sont à la disposition des gestionnaires de la ressource en eau et des captages d'eau potable : les outils d'ordre technique et les périmètres de protection.

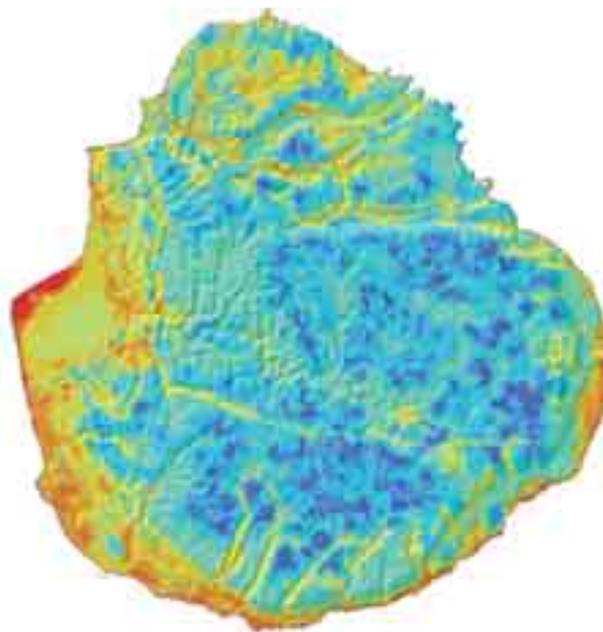
#### Les outils techniques

Aujourd'hui, de nombreux outils techniques peuvent être mobilisés dans le cadre de la délimitation des zones de protection et plus généralement de l'élaboration des périmètres de protection. Il serait illusoire ici de vouloir tous les présenter, c'est un sujet à part entière. Il est donc proposé de n'aborder brièvement que deux grandes familles d'outils, qui en intègrent implicitement plusieurs autres.

► Les premiers sont les bases de données, les SIG et leurs produits dérivés. Il existe en effet aujourd'hui une quantité importante de données stockées dans

“ La protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine pour être efficace doit s'effectuer à la fois sur la base des réalités physiques, hydrogéologiques et hydrogéochimiques du système aquifère concerné, et de celles du tissu socio-économique qui s'y est juxtaposé. ”

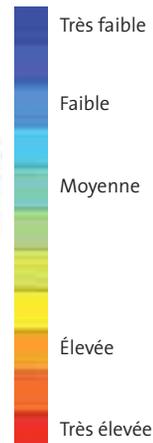
des grandes bases de données (BSS, ADES, SIGES, BASIAS, BASOL, etc.), souvent accessibles *via* Internet, qu'il est possible de valoriser à travers des tableurs, des calculateurs spécifiques et des SIG. Ainsi, des cartes de vulnérabilité aux infiltrations des pollutions, aux remontées de nappe, des synthèses hydrogéologiques, des bilans d'évolution de la qualité des eaux et des niveaux piézométriques sont disponibles pour plusieurs secteurs (*figure 1*). D'autres formes d'informations peuvent aussi être générées comme des cartes de risques aux infiltrations de polluants, du pouvoir d'atténuation naturelle du sous-sol, des interconnexions hydrauliques entre réservoirs, des zones



**Fig. 1 : Exemple de carte de vulnérabilité** (Bézèlgues *et al.*, 2006).

*Fig. 1: An example of vulnerability map* (Bézèlgues *et al.*, 2006).

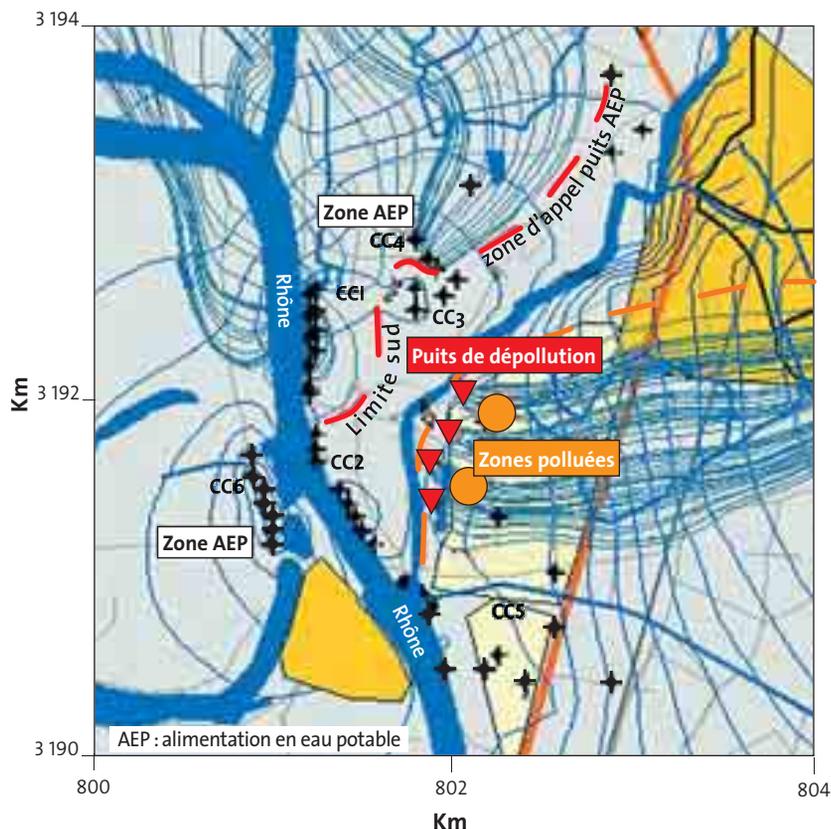
Vulnérabilité intrinsèque de la nappe principale de Marie-Galante



d'appel des captages d'eau, etc. Lorsque cette information valorisée existe sous une forme exploitable et à une échelle de précision adaptée pour l'élaboration des périmètres de protection, elle facilite et accélère grandement l'élaboration des dossiers techniques. Elle facilite aussi la tâche de l'hydrogéologue agréé, lui donne des éléments concrets et permet même dans certains cas au maître d'ouvrage de prendre des mesures de protection préliminaires.

► Par ailleurs, les modèles mathématiques sont d'excellents outils qui permettent de comprendre et de simuler le fonctionnement des systèmes aquifères dans différents contextes climatiques et d'exploitation. Ils permettent aussi d'établir les degrés de connexion entre les réservoirs constitutifs des systèmes aquifères et l'évolution éventuelle de cette connexion dans le temps. Les modèles peuvent également déterminer précisément, en deux ou trois dimensions, l'étendue des zones d'appel des captages, et leurs évolutions spatio-temporelles en fonction des variations climatiques et des fluctuations des pompages du secteur. Ils peuvent aussi calculer les vitesses de transfert des particules d'eau et des polluants, ainsi que leurs cheminements dans une infinité de cas de figure. Ils permettent enfin de déterminer les solutions optimum de protection des captages d'eau.

Toutes les informations générées par ces deux catégories d'outils peuvent être utilisées pour établir de manière efficace les périmètres de protection réglementaires. Dans de nombreux cas même, les modèles mathématiques sont capables de fournir au moindre coût des informations essentielles avec un degré de précision et de fiabilité en adéquation avec les besoins. En effet, à moins de se situer dans un aquifère parfait, monocouche, homogène et isotrope, ce qui est rarement, voire jamais le cas, les éléments fournis par un modèle des écoulements en cheminement (ou trajectoire) inverse apportent une réponse utile fiable, qui permet ensuite de délimiter le périmètre de protection sur la base d'éléments tangibles. L'hydrogéologue agréé, pour établir l'étendue de son périmètre de protection, peut ainsi se baser sur les informations correspondant à un temps de transit vers le captage de 20, 50, 100, 200... jours, selon ses besoins. À ce jour, ces outils restent néanmoins largement sous-utilisés pour l'élaboration des périmètres de protection, alors que leur utilisation pour rechercher l'origine des sources de pollution et mettre en place des dispositifs de protection des captages d'eau potable contre une pollution avérée est plus répandue (figure 2).



### Les périmètres de protection

L'objectif des périmètres de protection réglementaires vise à assurer la protection sanitaire de l'eau destinée aux consommateurs, et plus concrètement la protection des points de captage ponctuelles et accidentelles pouvant survenir dans leur proche environnement. Ils n'ont pas pour objet d'assurer une protection contre les pollutions diffuses qui relèvent d'un problème plus global de protection de la ressource, pris en compte par ailleurs dans la législation générale.

Même si elle était prévue par le décret-loi du 30 octobre 1935, l'instauration de périmètres de protection concernant tous les points de prélèvement (captages d'eau souterraine et d'eau superficielle, y compris les ouvrages ne bénéficiant pas de protection

▲ **Fig. 2 : Exemple d'utilisation d'un modèle d'écoulement inverse pour établir et dimensionner un dispositif de protection de captages d'eau potable au moyen de 4 forages de piégeage des contaminants installés en aval d'une zone polluée (les forages de dépollution sont représentés par les triangles rouges inversés) (Pennequin et al., 2003).**  
 Fig. 2: An example using a flow model in reverse to create and design a barrier device for potable water catchments consisting of four boreholes to trap contaminants placed upstream from a polluted area (the de-pollution boreholes are indicated by inverted red triangles) (Pennequin et al., 2003).

“ L'objectif des périmètres de protection réglementaires vise à assurer la protection sanitaire de l'eau destinée aux consommateurs, et plus concrètement la protection des points de captage contre les sources de pollutions ponctuelles et accidentelles pouvant survenir dans leur proche environnement. ”

naturelle) n'est réellement devenue obligatoire que par les lois sur l'eau du 16 décembre 1964 et surtout du 3 janvier 1992 (cf. encadré ci-dessous). Cette dernière donnait cinq ans aux collectivités concernées pour se mettre en conformité avec la loi et a aussi étendu cette obligation aux ouvrages existant antérieurement à la publication de la loi de 1964. Récemment, la loi de politique de santé publique du 9 août 2004 a simplifié la procédure tant au niveau technique qu'administratif, et a fourni davantage d'outils aux collectivités pour protéger leurs captages.

### ► HISTORIQUE DE LA LÉGISLATION CONCERNANT LES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION DES CAPTAGES

En France, la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine est une préoccupation ancienne. Dès le début du siècle dernier, la garantie d'une eau potable par la mise en œuvre de mesures préventives autour du point de captage d'eau est en effet l'une des premières préoccupations des hygiénistes : la notion de périmètre de protection des points de prélèvement d'eau souterraine apparaît pour la première fois dans l'article 10 de la loi du 15 février 1902. Dans cette loi, il est spécifié qu'en même temps que l'acquisition des terrains en pleine propriété, le décret déclarant d'utilité publique le captage d'une source détermine un périmètre de protection dans lequel l'autorité préfectorale a la possibilité d'interdire notamment les épandages d'engrais et la réalisation de forages. Cette notion est étendue par la suite à tous les types de captage d'eaux souterraines, via la circulaire du 12 juillet 1924 qui donne, pour la première fois, des instructions précises aux géologues pour l'étude des projets d'alimentation en eau potable. Le décret-loi du 30 octobre 1935 renforce encore la notion de périmètre de protection.

Depuis, le concept a beaucoup évolué, et le caractère obligatoire de l'instauration de périmètres de protection autour de tous les captages est apparu avec les lois sur l'eau 64-1245 du 16 décembre 1964 (articles 7 et 8) et 92-3 du 3 janvier 1992 (articles 13-1 et 14-1). Devant la difficulté de mise en œuvre des périmètres de protection, plusieurs textes complémentaires comme les circulaires du 24 juillet 1990 et du 8 janvier 1993 sont également sortis visant à faciliter la démarche. Mais c'est surtout la loi 2004-806 relative à la politique de santé publique du 9 août 2004 et la mise à jour correspondante du code de la Santé publique qui ont permis de lever un certain nombre de verrous et d'accélérer la démarche, notamment en la simplifiant et en donnant des outils supplémentaires aux collectivités locales.

Le concept de « périmètre de protection » est également repris dans la législation européenne, dont la directive cadre sur l'eau du 23 octobre 2000 (zones de sauvegarde), et il est probable qu'il sera intégré dans la directive relative à l'eau destinée à la consommation humaine lors de sa prochaine révision. Il est aussi préconisé par l'OMS dans ses recommandations de 2004 au titre du développement des plans de sécurité sanitaire (*water safety plan* - WSP). ■

PUBLICITÉ

## En avant première avec HACH LANGE Electrochimie numérique

pH, O<sub>2</sub> (LDO), conductivité ...

- Innovation : aller au cœur de l'Electrode, le numérique permet les performances extrêmes
- Reconnaissance intelligente : les Electrodes INTELLIGAL sont automatiquement identifiées
- Reproductibilité : sondes indépendantes, les Electrodes INTELLIGAL garantissent en mémoire leurs données d'étalonnage pour plus de précision

- Fiabilité du résultat : message visuel et sonore du résultat stabilisé
- Manipulation simple : messages dans et en français
- Usabilité optimale : grand écran 40x60mm



**NOUVEAU !**

- Usage intuitif : menu direct en un seul touché
- Simplicité : une seule connexion pour tous les types de sondes

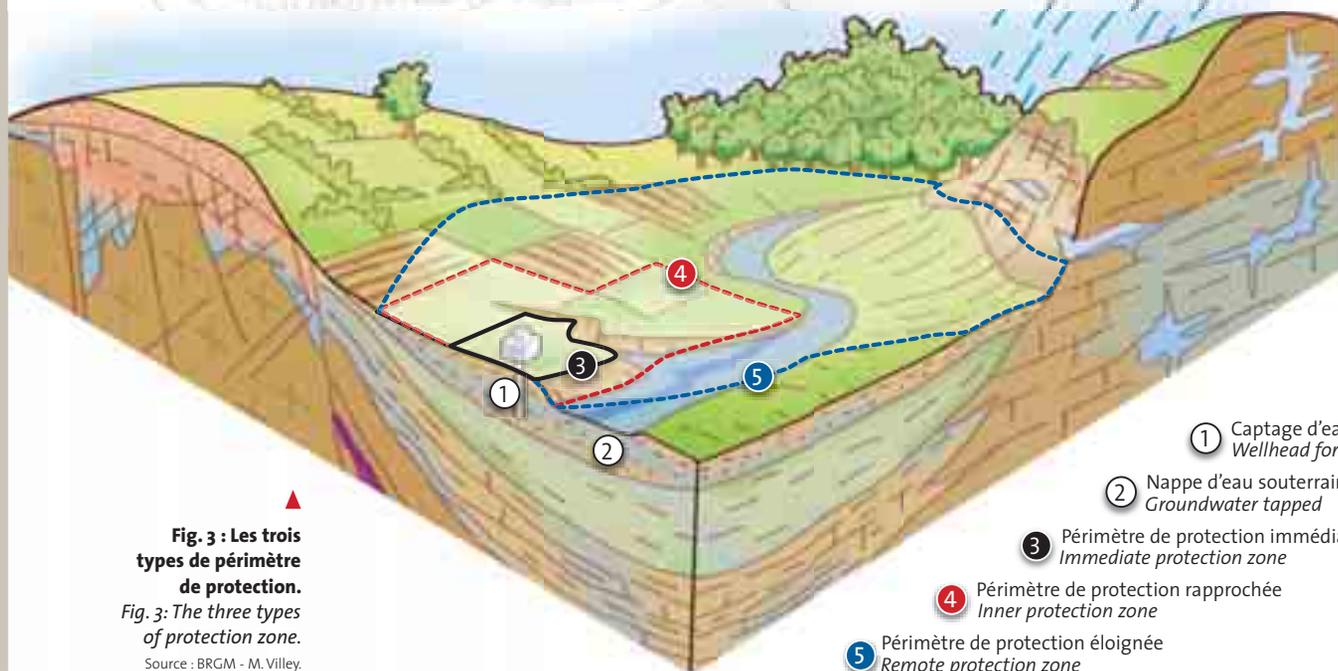
- Polyvalence : sondes adaptées pour les eaux usées potables et industrielles
- Résistance : des sondes de terrain à toutes formes (câble 30 m, y compris pour le pH)
- Confort : pas d'étalonnage ni de polarisation pour la sonde d'oxygène dissous (LDO)

- Les avantages : 25 ans d'expérience dans le monde entier, 1000000 de sondes produites dans le laboratoire des Electrodes

www.electrochimie.hach-lange.fr  
Hotline : 01 40 15 60 70

**HACH LANGE**

UNITED FOR WATER QUALITY



**Fig. 3 : Les trois types de périmètre de protection.**  
 Fig. 3: The three types of protection zone.  
 Source : BRGM - M. Villey.

- ① Captage d'eau potable  
Wellhead for potable water
- ② Nappe d'eau souterraine captée  
Groundwater tapped
- ③ Périmètre de protection immédiate  
Immediate protection zone
- ④ Périmètre de protection rapprochée  
Inner protection zone
- ⑤ Périmètre de protection éloignée  
Remote protection zone

Les périmètres de protection sont déterminés réglementairement autour des points de prélèvement après une étude hydrogéologique et la constitution d'un dossier technique. Leur établissement officiel s'inscrit dans le cadre d'une procédure de déclaration d'utilité publique (DUP). Les documents qui en résultent sont opposables à un tiers.

Trois niveaux de périmètre de protection peuvent être mis en place pour chaque captage (figure 3) :

► **le périmètre de protection immédiate** : premier niveau de protection, obligatoire, comprend le terrain directement adjacent au point de captage et a pour objet d'éviter les injections directes de polluants dans les eaux exhaurées. Ce terrain doit être acheté par le propriétaire du captage et doit être entièrement clôturé. Aucune activité n'est tolérée à l'intérieur, à l'exception de celles qui sont liées à la maintenance des ouvrages ;

► **le périmètre de protection rapprochée** : zone de protection étendue autour et en amont du point de captage en fonction de la nervosité du système aquifère et des risques liés au contexte socio-économique. Sa taille et sa géométrie peuvent donc varier considérablement selon le cas de figure. Son objectif est de protéger le captage contre les pollutions entraînées par les écoulements souterrains. Les activités humaines potentiellement dangereuses et polluantes pour la ressource y sont réglementées (réglementations particulières d'un niveau plus contraignant que celui de la réglementation générale), voire interdites ;

► **le périmètre de protection éloignée** : troisième niveau de protection, non obligatoire. Lorsqu'il est mis en œuvre, ce périmètre est souvent d'une relativement grande étendue autour et en amont du point de captage. Sa superficie et sa géométrie varient de manière significative d'un captage à l'autre, en fonction des conditions hydrogéologiques, du degré d'urbanisation et de l'existence d'activités polluantes potentielles. Les activités humaines peuvent faire l'objet d'un complément de réglementation selon leur nature et leur distance du point de captage.

**Des avancées et des solutions pour accélérer la mise en œuvre des périmètres de protection**

Pour les captages d'eau souterraine, sur les 34 050 points de captage en France, environ 49 % étaient dotés en octobre 2006 de périmètres de protection réglementaires par DUP, représentant 67 % des volumes prélevés pour la consommation humaine. Ce taux de protection varie de manière significative d'un département à l'autre (figure 4).

De manière générale, un retard important a été pris dans l'élaboration des périmètres de protection réglementaires ; en effet, la loi sur l'eau de 1992 avait fixé comme échéance la date du 1<sup>er</sup> janvier 1997 pour l'établissement de tous les périmètres de protection. Plusieurs raisons sont évoquées pour expliquer ce retard :

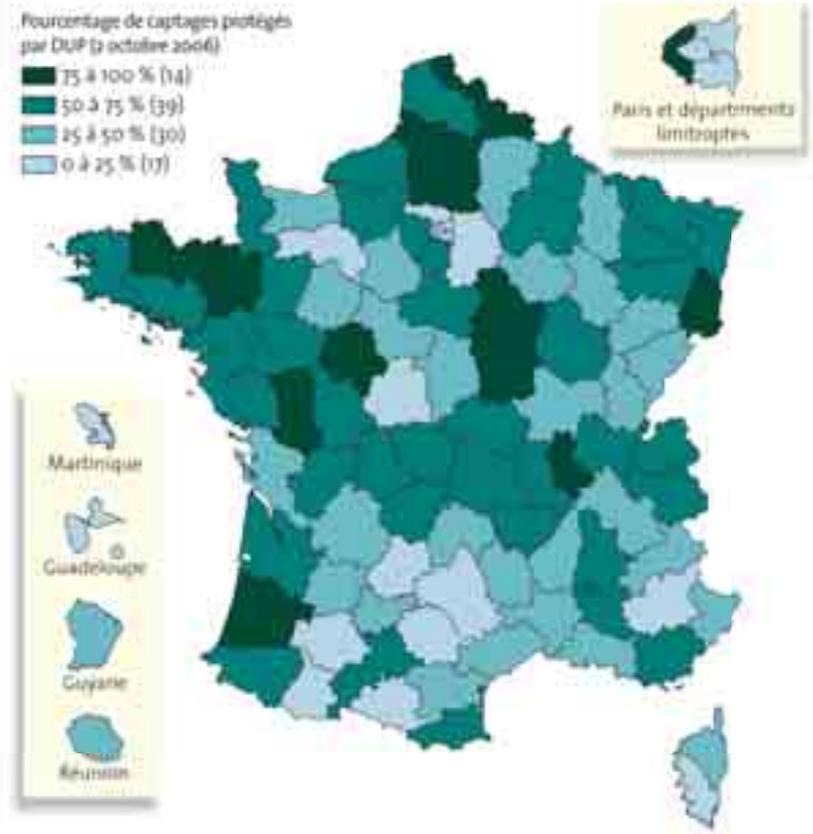
- 1 - le fait de ne pas voir l'intérêt de s'engager dans la procédure,

- 2 - un manque d'informations et/ou de données disponibles et facilement accessibles,
- 3 - un cahier des charges ou guide méthodologique destiné à accompagner la démarche parfois trop général, voire inadapté à certains contextes hydro-géologiques,
- 4 - un amalgame et une confusion parfois dans les objectifs qui visent à la fois la protection des captages et celle de la ressource entraînant des situations trop contraignantes, voire inextricables,
- 5 - le caractère complexe de certains sites, pouvant parfois générer un coût démesuré (ex. : milieux fortement urbanisés, karst),
- 6 - des lourdeurs et des complexités excessives dans la procédure.

Afin d'essayer de faciliter la mise en œuvre de la procédure de protection des captages, plusieurs mesures ont été tentées visant surtout à informer les acteurs et à accompagner la démarche. Au début des années 1990, les autorités ont par exemple élaboré un certain nombre de documents méthodologiques diffusés par circulaires (circulaires du 24 juillet 1990 et du 8 janvier 1993) destinées à préciser la manière d'opérer en insistant sur la mise en place à l'échelle départementale d'une cellule d'animation et de coordination visant à donner un nouveau souffle à la démarche. Ces tentatives n'ont pas eu tous les échos attendus.

Pourtant dans certains secteurs des démarches originales et/ou des initiatives d'accompagnement efficaces ont permis de faire avancer plus vite la procédure de protection des captages, comme par exemple dans les Côtes-d'Armor (cf. encadré ci-contre).

En outre, aujourd'hui, beaucoup de freins qui existaient dans le passé ont pu être levés, et d'autres peuvent l'être encore en valorisant notamment les nombreuses données disponibles avec les outils techniques décrits ci-dessus, pour mettre à disposition des hydrogéologues agréés des informations synthétiques, sous forme de cartes thématiques, de notes de synthèses ou d'atlas hydrogéologiques. L'expérience acquise permettrait aussi maintenant de faire un guide technique détaillé pour l'élaboration des dossiers pour chaque famille de situations rencontrées en France ; des actions vont déjà dans ce sens, comme l'étude en cours de réalisation par le BRGM sur le Gard et l'Hérault, commandée par les DDASS de ces deux départements. Elle débouchera en particulier sur des règles adaptées au contexte hydrogéologique



▲ **Fig. 4 : Taux d'achèvement par département des procédures de protection par DUP des captages d'eau destinés à la consommation humaine (octobre 2006).**

Fig. 4: The Department-by-Department completion rate of DUP protection procedures for groundwater catchments intended for human consumption (October 2006).

Source : Ministère de la Santé et des Solidarités/DASS/SISE-Eaux.

### ► L'ÉTABLISSEMENT DES PÉRIMÈTRES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU POTABLE DANS LES CÔTES-D'ARMOR

Le département des Côtes-d'Armor a mis en place, depuis une vingtaine d'années, une démarche complète pour aider les collectivités à établir les périmètres de protection de leurs captages pour l'alimentation en eau potable. Cette démarche repose sur un partenariat entre les différents acteurs concernés : services de l'État, conseil général, chambre d'agriculture, agence de l'eau et collectivités, concrétisé dans un protocole d'accord départemental. En outre, le conseil général met à disposition des collectivités une cellule d'assistance technique qui intervient tout au long de la procédure : étude de faisabilité, constitution du dossier de déclaration d'utilité publique, mise en œuvre des périmètres de protection. Cette démarche a permis d'atteindre un taux d'établissement de périmètres de protection de près de 85 % fin 2004. Plus récemment, elle a été complétée par la mise en place d'un suivi des périmètres de protection instaurés comprenant, au niveau départemental, la réalisation d'un système d'information géographique, et au niveau local, l'établissement de bilans sur la mise en œuvre des mesures de protection pouvant déboucher sur des propositions de renforcement de ces mesures. ■

Source : Marjolet et Herbreteau, 2005.

régional pour l'élaboration des dossiers préparatoires aux périmètres de protection.

La nouvelle législation en place, dont la directive cadre européenne sur l'eau d'octobre 2000, contribue aussi à mieux clarifier les objectifs de protection des ressources et des captages, en séparant les deux démarches. Ceci permet aujourd'hui d'éviter des retards liés à des amalgames qui ont parfois été faits dans le passé, et qui ont conduit à fixer des objectifs de protection des captages démesurés, trop ambitieux et donc trop contraignants, bloquant ainsi la procédure.

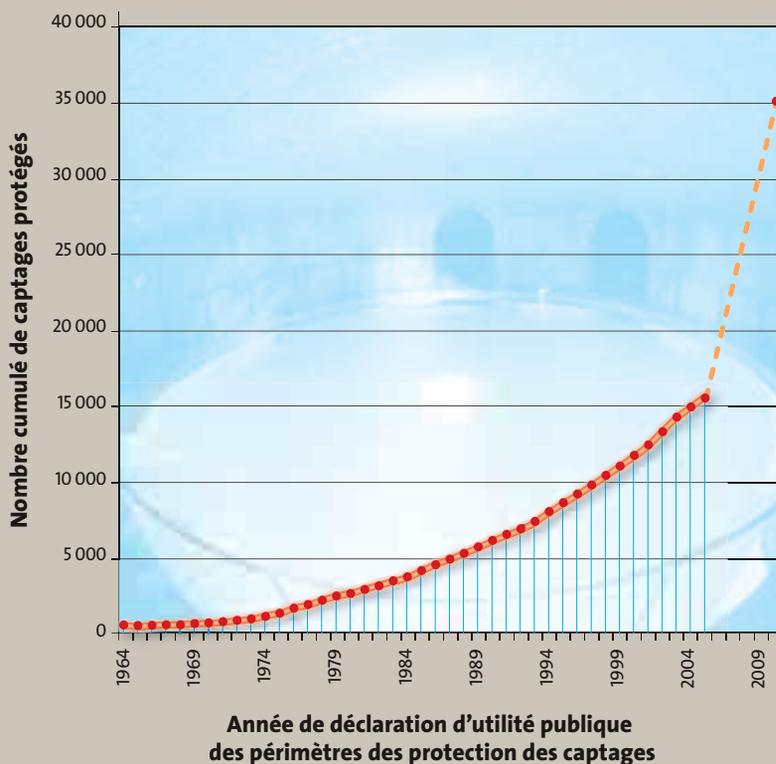
Enfin, les modifications récentes de la procédure de mise en œuvre des périmètres de protection ont fourni de nouveaux outils aux collectivités locales, notamment en :

- donnant au maître d'ouvrage la possibilité de préempter pour l'acquisition de terrains dans le périmètre rapproché, et de faire inscrire dans les baux ruraux des modes d'utilisation raisonnée du sol compatible avec le maintien de la bonne qualité de la ressource ;
- renforçant l'implication des élus en leur rappelant l'intérêt de préserver le capital « eaux de consommation » sur leur territoire, compte tenu des enjeux sanitaires et de leur responsabilité en ce domaine.

Toutes ces mesures récentes et les changements qui sont intervenus dans la législation ont déjà contribué à accélérer significativement la démarche de mise en place des périmètres de protection au cours des dernières années (figure 5). Ceci va dans le sens des nouveaux objectifs fixés par le PNSE, à savoir la réalisation de 80 % des périmètres de protection pour fin 2008 et 100 % pour fin 2010.

### L'efficacité des périmètres de protection en place

Les périmètres de protection s'inscrivent dans l'objectif global de délivrer au robinet du consommateur une eau répondant aux normes de potabilité que la législation impose à l'eau destinée à l'alimentation publique, et constituent une protection de proximité face aux pollutions accidentelles. Au-delà, la préservation de la ressource en eau se situe à une échelle plus globale, généralement celle du bassin d'alimentation du captage. Les actions engagées dans ce sens visent



la préservation à long terme du milieu aquatique et ont plutôt pour cible les pollutions chroniques et diffuses susceptibles d'affecter la qualité des aquifères (nitrates, pesticides).

Certains cas de pollution de captages permettent de rappeler périodiquement aux responsables l'intérêt de la mise en œuvre des périmètres de protection. Cependant, l'importance du sujet mériterait de mieux démontrer leur efficacité, qui ne se remarque en effet qu'*a contrario* par les conséquences des pollutions. La direction des études économiques et de l'évaluation environnementale du ministère de l'Écologie a réalisé en 2005 une première évaluation de l'efficacité environnementale des périmètres de protection des captages [Buisson (2005)]. Celle-ci a notamment cherché à évaluer, sur un nombre important de captages, la corrélation éventuelle entre la qualité de l'eau et l'existence d'un périmètre de protection. Elle met en évidence un apport positif des périmètres de protection dans la lutte contre certains types de pollutions ponctuelles. Ainsi l'existence d'une DUP augmenterait en moyenne de 70 % la probabilité de ne pas avoir de streptocoques au point de captage. À l'inverse, aucun lien n'apparaît entre l'évolution du taux de nitrate ou des pesticides et l'existence d'une DUP, ce qui semble logique au regard de l'objectif des périmètres de protection.

**Fig. 5 : Évolution de la mise en œuvre des périmètres de protection en France : réalisations et objectif 2010.**  
 Fig. 5: Evolution of the implementation of protection zones in France: achievements and objective for 2010.

Source : Ministère de la Santé et des Solidarités/DASS/SISE-Eaux.



### Siège social

28, rue de La Baume  
75008 Paris  
Tél. : (33) 1 53 75 99 11  
sade.recrut@sade-cgth.fr  
www.sade-cgth.fr

Intervenant dans les domaines de l'eau potable et de l'assainissement, la Sade (*Veolia Eau*) est le spécialiste de la conception, la construction, la réhabilitation et la maintenance des réseaux et des ouvrages associés.

Ses atouts : sa longue expérience, une présence géographique en France et à l'international privilégiant la proximité avec ses clients, un Bureau d'Etudes intégré, la recherche constante de la qualité, de l'innovation (*brevets*) et du progrès.

De la simple réparation de fuites aux projets clés en main, la Sade est au service des collectivités locales et est partenaire des industriels. Elle est en mesure de proposer des variantes techniques innovantes et des solutions sur-mesure : études hydrauliques, diagnostic des réseaux et des ouvrages, forages et captages, pose et réhabilitation de conduites, équipements électromécaniques et épuration des eaux usées, mise en conformité des installations hydrauliques, protection incendie, stockage et rejet des effluents, ...



## Recherche et production d'eau souterraine Protection de la ressource

**Leader en France dans sa spécialité, la Sade a acquis une solide expérience dans le captage des eaux souterraines par forages et par puits : eau potable, eaux minérales, eaux de process, irrigation, géothermie, ...**

**Intervenant en amont de la filière eau, ses équipes exercent leur expertise auprès de clients publics et industriels, adaptant les solutions à la nature des terrains rencontrés, en France et à l'international.**

### • Etudes et diagnostics

**Etude de faisabilité :** contexte géologique et hydrogéologique

**Evaluation des ressources :** développer les périmètres de protection de la ressource pour réduire l'exposition des captages aux pollutions accidentelles

**Analyse de l'environnement :** sous-sols, périmètres de protection

**Dossier réglementaire :** loi sur l'eau, déclarations, ...

### • Travaux neufs

Piezomètres  
forages d'essai  
forages d'exploitation  
installations complètes  
Puits de gros diamètre

### • Travaux sur forages existants

Diagnostique et identification des causes  
inspection caméra  
Contrôle de la cimentation (CBI / VBI)  
Diagraphies  
Techniques de régénération et de réhabilitation

*D'une manière générale, l'efficacité des périmètres de protection est fortement conditionnée par l'adéquation entre le niveau de protection recherché, le degré d'urbanisation existant avec ses risques de pollutions potentielles, et les caractéristiques des réservoirs concernés.*

Dans le rapport de mars 2003 de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France [Miquel (2003)], le dispositif « périmètres de protection » est jugé peu efficace. En fait, il met plutôt en avant les difficultés de mise en œuvre en insistant sur le décalage entre l'enjeu stratégique, qui suppose une responsabilité collective, et la mise en œuvre et le financement d'une procédure, qui reposent aujourd'hui sur les maires et les communes, en concluant sur le fait que l'échelon communal n'est pas l'échelon adapté pour la protection des eaux. Mais les clarifications récentes des objectifs pour la protection de la ressource et pour celle des captages impliquant une démarche duale, séparée mais complémentaire, peuvent peut-être aujourd'hui adoucir quelque peu cette conclusion.

D'une manière générale, l'efficacité des périmètres de protection est fortement conditionnée par l'adéquation entre le niveau de protection recherché, le degré d'urbanisation existant avec ses risques de pollutions potentielles, et les caractéristiques des réservoirs concernés (aquifères et eaux de surface associées). Ainsi, chaque cas de figure est différent, et la démarche doit être adaptée en conséquence. Pour aller dans ce sens, des mesures originales et innovantes – allant souvent au-delà de l'attendu réglementaire – sont mises en œuvre dans certains secteurs pour accroître l'efficacité des périmètres de protection, et notamment lorsque cela est possible :

- 1 - avec le rachat par le maître d'ouvrage de terrains supplémentaires dans le périmètre de protection rapprochée (aujourd'hui, le maître d'ouvrage n'a obligation d'acheter que les terrains inclus dans le périmètre de protection immédiate),
- 2 - avec le boisement de ces terrains (pour une réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires, la création de zones de dénitrification, et/ou pour générer une source de revenu complémentaire pour le maître d'ouvrage...),
- 3 - en concluant des accords particuliers de bonne conduite environnementale avec le tissu socio-économique local (agriculteurs, industriels...). En outre, ces mesures originales contribuent aussi parfois à débloquer certaines situations et à accélérer la mise en œuvre des périmètres de protection.

Les encadrés ci-dessous et ci-contre en sont deux exemples venant de Bretagne et de Bourgogne.

Par ailleurs, il paraît important, une fois la protection en place, d'assurer un suivi de l'efficacité de cette protection, et d'effectuer un bilan périodique de manière à pouvoir la faire évoluer au gré des nouvelles connaissances et de l'évolution de l'environnement, une démarche qui commence à être mise en place à certains endroits comme en Bretagne (cf. encadré ci-dessous).

#### ► LA COMMUNE DE LANDRÉVARZEC (FINISTÈRE) VA BOISER LE PÉRIMÈTRE DE PROTECTION DU CAPTAGE D'EAU

Dans le cadre de sa politique pour la protection et l'amélioration de la qualité de l'eau, la commune de Landrévarzec est propriétaire d'une trentaine d'hectares de terrains agricoles, sur la commune de Briec, dans le département du Finistère. Ces terrains, conformément à la loi, constituent une ceinture naturelle entourant le site de Lanvern, captage d'alimentation d'eau potable desservant la commune. Pour assurer la protection durable de ce milieu sensible, un périmètre de protection rapprochée a été défini, afin de soustraire cet environnement à l'impact de plus en plus important de l'activité humaine. L'acquisition récente de la plupart des terrains, ainsi que l'entretien annuel et souvent coûteux de ces anciennes parcelles agricoles, a conduit la commune de Landrévarzec à envisager le boisement de ce site. En effet, le boisement constitue une protection naturelle des sols contre l'érosion ; il participe à la mise en valeur et au renouvellement des humus. Après quelques années de premiers investissements financiers, il permet ensuite de démarrer une production de bois, générant ainsi une source de revenus qui ira en s'améliorant. Le boisement de terres agricoles présente de nombreux avantages :

- les sols ne reçoivent plus de produits phytosanitaires, ni de fertilisants comme quand ils sont soumis aux pratiques agricoles courantes. La teneur en azote des sols forestiers est bien moindre que celle des sols cultivés ;
- le couvert forestier intercepte les précipitations, diminue le ruissellement, réduit l'érosion des sols et favorise l'infiltration profonde des eaux ;
- le boisement constitue un écosystème stable avec une grande diversité faunistique et floristique ;
- à moyen terme (cinq à six ans), le coût d'entretien d'un boisement est bien moindre que celui d'un terrain agricole laissé en friche (fauchage annuel des chardons, rumex, orties, lande...). À long terme, les bois peuvent servir à approvisionner la commune en bois de chauffage et peuvent même être une source de revenus lorsque les surfaces sont importantes (bois d'industrie, de charpente, bois d'œuvre...).

Source : [www.glazik.com/actualites.php?idlettre=27](http://www.glazik.com/actualites.php?idlettre=27)

## ► LES MESURES DE PROTECTION DE LA SOURCE DE CÉRILLY (EAU DE PARIS)

Manon Zakeossian Responsable Protection de la Ressource – Unité Eaux Souterraines, EAU DE PARIS

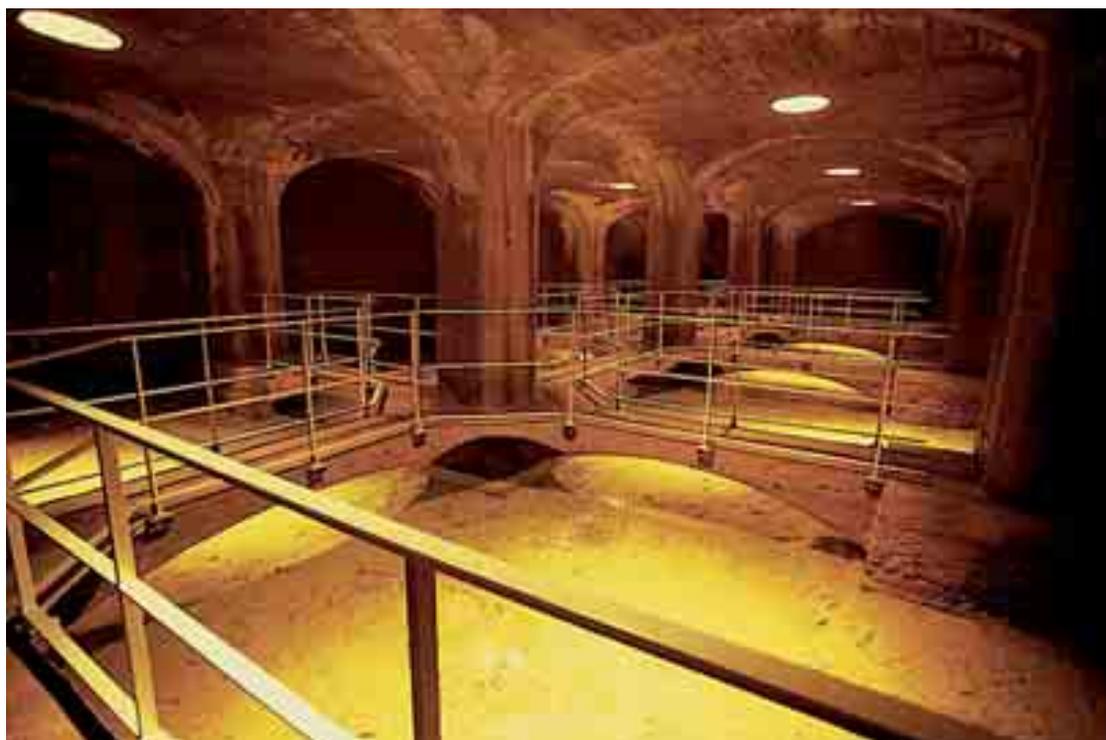
Le bassin d'alimentation des sources dites « hautes » situées dans la vallée de la Vanne, à la limite de l'Yonne et de l'Aube, représente environ 30 000 hectares. La production moyenne de ces ressources est de 60 000 m<sup>3</sup>/j et l'adduction gravitaire de leur eau vers Paris a été déclarée d'utilité publique en 1866. De nombreuses études réalisées depuis cette période ont permis de définir les limites du bassin d'alimentation et les zones de plus forte vulnérabilité. Ces captages sont alimentés par la nappe de la craie dans un contexte karstique, caractérisé par des circulations très rapides entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Les eaux captées en période de crue sont turbides liées à la nature même de l'aquifère, et des contaminations ponctuelles par des produits phytosanitaires peuvent survenir. Tenant compte de l'ensemble des connaissances disponibles et de l'enjeu sanitaire de cette ressource pour les consommateurs parisiens, l'hydrogéologue agréé a défini un périmètre de protection rapprochée morcelé de taille importante (environ 2 000 hectares), comportant des contraintes agricoles adaptées au contexte et aux problèmes de qualité rencontrés. En amont du captage de Cérilly, qui appartient à cet ensemble de sources, le rapport de l'hydrogéologue agréé prévoit en particulier la mise en place de bandes enherbées de dix mètres de large, de façon

localisée, le long de cours d'eau sensibles. Cependant, la singularité de ce dossier de périmètre de protection rend son instruction particulièrement longue et complexe. EAU DE PARIS a donc fait le choix, depuis plusieurs années, d'acquérir la maîtrise foncière des parcelles concernées, afin de mettre en place rapidement les aménagements nécessaires et de faciliter l'instruction du dossier. La compétence de la SAFER de Bourgogne, sollicitée pour la mise en œuvre de ce projet, a permis l'acquisition de 26 hectares en cinq ans. Après l'acquisition de ces terrains, EAU DE PARIS souhaitait y maintenir l'activité agricole. Les parcelles achetées ont donc conservé leur usage agricole, sous réserve du respect d'un cahier des charges adapté à leur niveau de vulnérabilité : les agriculteurs qui en bénéficient, sous la forme d'un prêt à usage gratuit, les entretiennent sous forme de jachère ou les cultivent en ayant recours à l'agriculture biologique ou raisonnée (réduction des doses apportées d'azote et de produits phytosanitaires). ■

### Source de Cérilly (Yonne).

*The Cérilly spring (Yonne Department).*

© SAGEP - M. Zakeossian



## Perspectives pour l'avenir

La protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine est aujourd'hui au centre d'un certain nombre de préoccupations et d'évolutions récentes de la législation, notamment en France (loi de politique de santé publique de 2004, Plan national santé environnement). La directive cadre européenne sur l'eau a rappelé l'importance de protéger ces captages d'eau et le fait que cette protection devait s'effectuer à deux niveaux, d'une part, à celui de la ressource dans son ensemble, et d'autre part, au droit de la zone de captage sur une étendue qu'il faut définir. Les notions de « zone protégée au titre de l'alimentation en eau potable » et de « zone de sauvegarde » en témoignent. Cette idée de démarche duale est reprise dans le projet de loi sur l'eau.

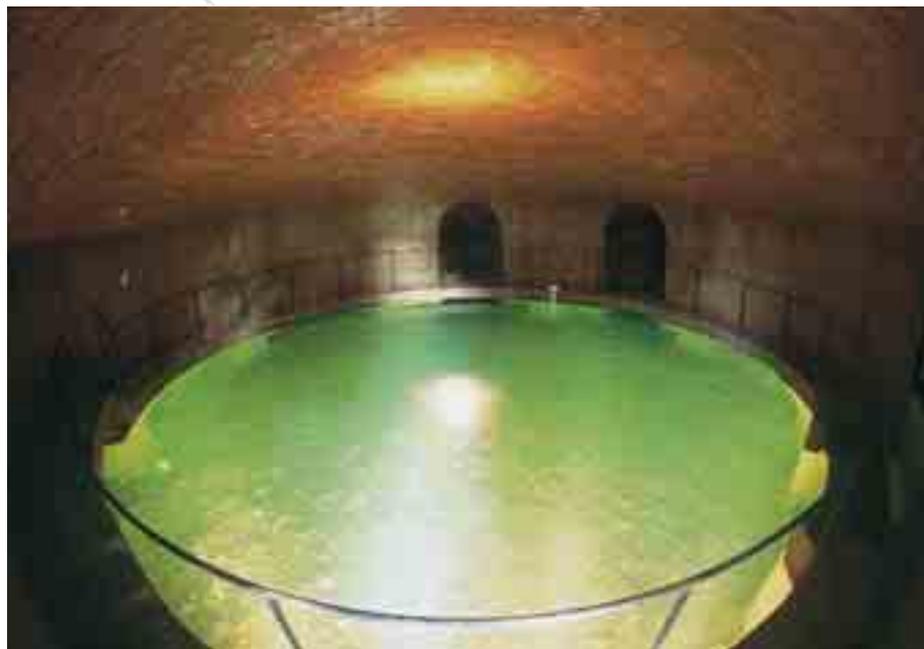
Dans ce nouvel élan cependant, un défi important attend l'ensemble des acteurs concernés par la protection, à la fois de la ressource et des captages d'eau pour l'alimentation humaine. Il faut :

- 1 - encore mieux pouvoir séparer les deux démarches sur le terrain, tout en maintenant une parfaite synergie entre elles de manière à pouvoir assurer leur complémentarité nécessaire ;
- 2 - accélérer le processus de protection des captages afin d'atteindre les objectifs fixés par le PNSE, sans compromettre la qualité des protections qui seront mises en place.

Les évolutions récentes de la législation devraient avoir suffisamment clarifié pour tous le concept de protection duale de la ressource et des captages. Elles devraient permettre de relever aisément la première partie du défi et ainsi faciliter la mise en œuvre de la démarche de protection des captages.

La deuxième partie du défi nécessite, malgré les nouveaux outils disponibles en matière de procédure de protection des captages, de pouvoir encore l'accélérer, et de plus que doubler dans certains départements le rythme actuel pour réaliser l'objectif d'instauration de 100 % des périmètres de protection pour fin 2010, fixé par le PNSE.

Un moyen d'accélérer les démarches serait sans doute de réduire le temps d'élaboration des dossiers techniques en mettant notamment à disposition des responsables et des hydrogéologues agréés en matière



▲ **Source d'Armentières, un captage protégé.**  
*The Armentière spring, a protected water intake.*  
 © Eau de Paris

d'hygiène publique des dossiers de synthèses, cartes et bilans issus de la valorisation des nombreuses données qui existent aujourd'hui, et qui sont dispersées dans les différentes bases de données spécialisées. Mais ces synthèses devront être adaptées à la démarche de protection des captages, tant au niveau de leur contenu que de l'échelle de restitution. En outre, le recours, lorsque c'est possible, à des modèles existants de bassin pour calculer l'extension des zones d'appel et les temps de transfert, permettrait de fournir aussi rapidement des éléments concrets, précis et utiles pour l'élaboration des périmètres de protection. La réalisation et la mise à disposition d'un guide technique détaillé de la démarche pour les différents contextes rencontrés en France seraient également un atout.

Enfin, il existe en matière de protection des captages un certain nombre d'initiatives volontaristes, innovantes et originales qui vont dans le sens d'une efficacité accrue des périmètres de protection, qu'il faudrait pouvoir mieux valoriser auprès de la profession et des

“ La directive cadre européenne sur l'eau a rappelé le fait que cette protection devait s'effectuer à deux niveaux, d'une part, à celui de la ressource dans son ensemble, et d'autre part, au droit de la zone de captage sur une étendue qu'il faut définir. ”

“ Il existe en matière de protection des captages un certain nombre d’initiatives volontaristes, innovantes et originales qui vont dans le sens d’une efficacité accrue des périmètres de protection. ”

maîtres d’ouvrage des captages, comme les contrats ou accords de bonne conduite environnementale conclus avec les acteurs économiques locaux présents dans le périmètre de protection rapprochée, ou le rachat de terrains dans ce même périmètre par le maître d’ouvrage du captage en vue de mieux contrôler l’activité qui s’y déroule, ou encore d’y mener une activité rentable non polluante pour la ressource en eau. Le rachat de terrains en amont des captages et leur reboisement vont par exemple dans ce sens, et même au-delà, car cette démarche permet aussi d’agir de manière positive sur l’environnement et sur la qualité des eaux captées, notamment en créant un puits de carbone complémentaire et une zone de dénitrification naturelle qui pourra contribuer à réduire le taux de nitrate dans la ressource. Le boisement des périmètres de protection rapprochée peut être une solution efficace si l’opération est menée selon les règles de l’art (Agence de l’Eau Adour-Garonne, 2003). Cette pratique est assez répandue en Bretagne et pourrait être étendue à d’autres régions. Outre les avantages environnementaux et de protection accrue des captages qu’elles procurent (extension des zones de protection active), certaines de ces démarches innovantes peuvent aussi être rentables financièrement pour le maître d’ouvrage des captages ; une analyse coûts-bénéfices de leur mise en œuvre permettrait facilement de mettre en évidence un retour sur investissement à court ou moyen termes dans de nombreux cas. Cette perspective pourrait contribuer à donner une nouvelle dimension aux périmètres de protection, et aussi inciter à accélérer leur mise en place, sous réserve de bien séparer ce qui relève de la stricte procédure d’implantation des périmètres de protection, de ce qui est complémentaire et qui peut se mettre en place de manière parallèle. ■



### Protecting groundwater catchments intended for human consumption

*In France, over half the population derives its potable water supply from free groundwater. To contend with the risk of accidental contamination of potable water catchments, protection zones constitute the basic regulatory tool, to be used jointly with other tools designed to eliminate diffuse contaminants – particularly nitrates and pesticides – when these are present in the basins supplying the catchments. The delineation of protection zones and associated constraints are defined on the strength of hydro-geological and technical studies. The establishment of protection zones prior to the declaration of public utility (DUP – Déclaration d’Utilité Publique) is governed by a procedure calling on many players, including a certified hydro-geologist. To date, only half the existing potable water catchments have had their protection procedure completed and have benefited from a DUP. Several reasons have been brought forward to account for the delay with respect to the timetable defined in the 3 January 1992 groundwater law. These are of both of a technical and an administrative procedural nature. The 2004 public health policy law has done away with certain of these causes, and the implementation of protection procedures today is accelerating. However, if the objectives of the National Health Environment Plan are to be achieved, i.e., protection of 80% of catchments by 2008 and 100% by 2010, considerable efforts*

*will need to be made. Several avenues are suggested to further accelerate the catchment protection procedure, which notably seek to cut down on the time required to prepare technical files by providing those in charge of water supply and distribution and consultant firms with:*

- 1 - files containing syntheses, maps and conclusions drawn from the exploitation of the large amount of data available to day,*
- 2 - access where possible to existing basin models for determining the zones of supply for the catchments and the speed and direction of flow and*
- 3 - more complete methodological guidelines that better suit the various hydro-socioeconomic contexts found in France.*

*Moreover, making the most of a certain number of vigorous, innovative and original initiatives that contribute to enhancing the effectiveness of protection zones would lend a new dimension to the catchment protection approach by prompting project managers to work more harmoniously with their socioeconomic environment so as to obtain, for themselves, both the benefit of an able management of their groundwater heritage and an economic edge. This will also lead to speeding up the implementation process for protection zones, provided a clear separation is made between what appertains to the strict procedure associated with their implantation and what is complementary.*



Le stockage représente actuellement un des principaux modes de gestion des déchets en France. L'InVS et l'AFSSET, en collaboration avec plusieurs organismes, ont réalisé une évaluation quantitative des risques sanitaires (EQRS) liés aux installations de stockage des déchets, en prenant en compte l'évolution des modalités d'exploitation de ces installations. Bien que les résultats montrent que les sites correctement gérés ne posent pas de problèmes de risques sanitaires, l'étude souligne néanmoins un déficit d'informations quantitatives relatives au suivi des émissions et de la qualité des milieux.

**La couverture d'une décharge est une composante essentielle pour favoriser son intégration paysagère mais aussi pour réduire les nuisances résiduelles.**  
*The landfill cover is an essential component of landscape integration but also helps to reduce residual emissions.*

© BRGM im@gé

# L'évaluation des risques sanitaires : application au stockage des déchets ménagers



**Frédéric Dor**

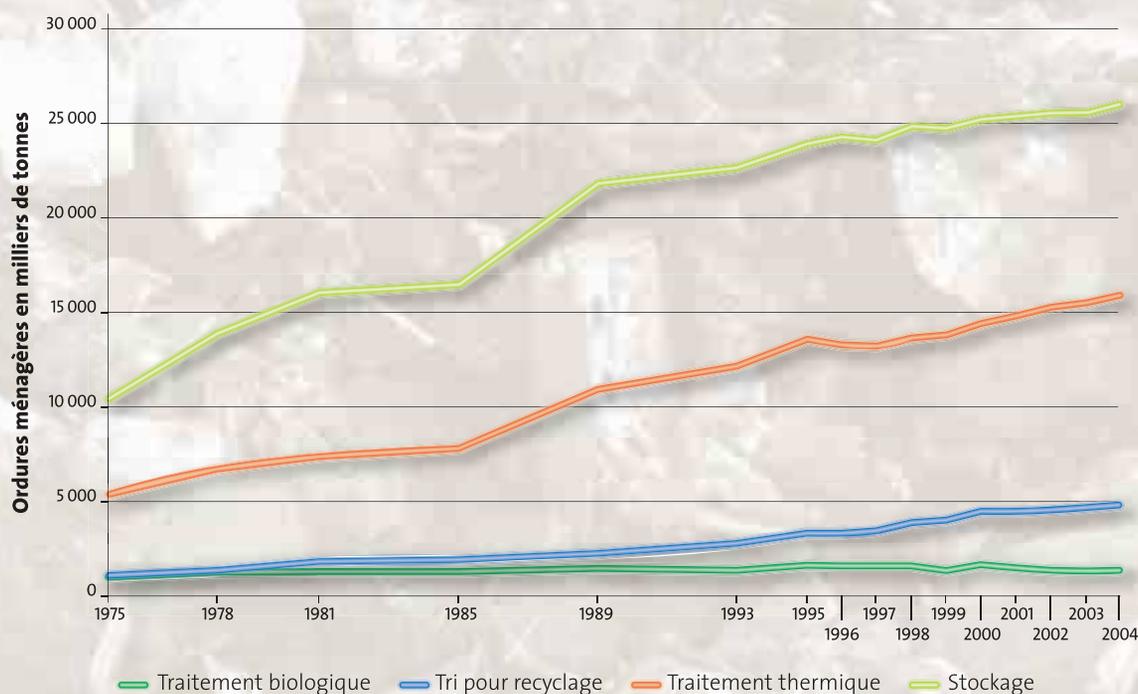
COORDONNATEUR DE PROGRAMMES /  
ÉVALUATEUR DE RISQUE SANITAIRE  
DÉPARTEMENT SANTÉ ENVIRONNEMENT /  
UNITÉ MÉTHODES ET INVESTIGATIONS  
INSTITUT DE VEILLE SANITAIRE (INVS)  
f.dor@invs.sante.fr

**Dominique Guyonnet**

RESPONSABLE DE L'UNITÉ GESTION DES DÉCHETS  
SERVICE ENVIRONNEMENT ET PROCÉDÉS  
BRGM  
d.guyonnet@brgm.fr

Dans la plupart des pays de l'Union européenne et notamment en France, le stockage demeure l'un des principaux modes de gestion des déchets. D'après les statistiques de l'ADEME (2006) (figure 1), en 2004 environ 40 % (en poids) des déchets ménagers et assimilés étaient stockés dans des installations de stockage de déchets non dangereux (ou sites de Classe II). La relative diminution de la proportion de déchets ménagers mis en stockage (en 1993 la proportion était d'environ 50 %) s'est faite principalement à la faveur d'une augmentation de la part de déchets traités en incinération. Or les résidus d'épuration des fumées générées par les incinérateurs sont eux aussi orientés vers des sites de stockage (installations de stockage de déchets dangereux, ou sites de Classe I).

En matière de santé, les effets sur la population le plus souvent rapportés sont les cancers ; viennent ensuite les effets sur la reproduction et des effets non cancérogènes tels que les atteintes respiratoires et certains troubles neurologiques. Concernant les cancers, les études proviennent essentiellement d'Amérique du Nord [Tarkowski (2001)]. Mais ces excès de cancers ont été principalement décrits au voisinage de sites de stockage de déchets dangereux (déchets industriels spéciaux) ; ils concernent la vessie, le cerveau, le foie, le poumon, l'estomac et le sang (leucémie).



◀ **Fig. 1 : Évolution du nombre de tonnes d'ordures ménagères par mode de gestion.**  
 Fig. 1: Evolution of the number of tons of household waste for each management approach.

Source : ADEME (2006)

Concernant les effets reprotoxiques, les résultats des études épidémiologiques sont concordants. L'augmentation observée du risque de malformations est modérée. Il s'agit de cardiopathies, de fentes faciales, de défauts de fermeture du tube neural, du risque de petit poids de naissance (constat le plus fréquent) et d'une diminution de la fertilité [Johnson (1999) ; Vrijheid (2000)].

La grande faiblesse de toutes ces études concerne l'évaluation de l'exposition des populations concernées. Cette faiblesse est exacerbée dès lors qu'il faut retracer l'exposition des années précédentes, l'absence de données étant une très forte limite de l'exercice. De plus, la caractérisation trop approximative des polluants présents dans ces environnements empêche également d'appréhender l'exposition dans de bonnes conditions.

Dans ce contexte, en 2002, l'Institut national de Veille Sanitaire (InVS) et l'Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail (AFSSET), en collaboration avec des experts appartenant à plusieurs organismes (ADEME, ASTEE, BRGM, EHESS, INERIS, MEDD, ONYX, RSD, POLDEN, SITA, SSP...), ont réalisé une étude visant à établir un état des connaissances scientifiques sur la réalité, les circonstances, la nature et l'ampleur d'un éventuel impact sanitaire du stockage des déchets ménagers et assimilés et des déchets industriels. En s'appuyant sur la démarche d'évaluation des risques, l'objectif de l'étude a non

seulement été d'analyser la qualité des données disponibles et d'identifier les lacunes préjudiciables de connaissances, mais également de proposer un regard sur l'évolution des risques en fonction de celle des pratiques de gestion des centres de stockage des déchets. Cet article porte uniquement sur le stockage des déchets ménagers et assimilés. Sont considérés les sites récents, gérés de manière conforme à la réglementation en vigueur, mais aussi les sites plus anciens.

## Méthode

La démarche adoptée est basée sur la méthode de l'évaluation quantitative du risque sanitaire (EQRS) telle qu'elle est formalisée aujourd'hui par toutes les instances :

- identification des dangers (composés chimiques et effets),
- caractérisation des dangers (valeurs toxicologiques de référence des composés chimiques),
- évaluation des expositions qualitatives ou quantitatives,
- caractérisation des risques.

“ Dans la plupart des pays de l'Union européenne et notamment en France, le stockage demeure l'un des principaux modes de gestion des déchets. ”



◀ **Torchère et unité de valorisation énergétique du biogaz.**  
**La collecte des gaz de décharge permet d'améliorer la sécurité des sites et de réduire les nuisances olfactives et les émissions de gaz à effet de serre.**

*A flare tower and unit for converting biogas into energy. Collecting gas from landfills improves safety conditions and reduces odour pollution and greenhouse gas emissions.*

© BRGM im@gé

### Typologie des sites

Les modalités d'exploitation des installations de stockage des déchets ménagers ont évolué au cours du temps : du trou dans lequel chacun venait jeter tout et n'importe quoi jusqu'au Centre d'Enfouissement Technique (CET) qui contrôle et admet des déchets clairement caractérisés sur des sites déclarés et autorisés. Cette diversité de sites a conduit à établir une typologie de deux situations distinctes et contrastées :

- les sites sans captage du biogaz mais avec une couverture sommaire : sites dits « B » ;
- les sites avec soit captage du biogaz, soit traitement des lixiviats, soit les deux : respectivement sites dits « C1 », « C2 », « C3 ».

Les sites B présentent une surface bien inférieure à celle des sites C. Aussi, à des fins de comparaison, il a été également considéré un site B de surface équivalente à celle d'un site C : c'est le site B-10ha. Cette proposition est hypothétique même si, ici ou là, des cas réels peuvent être connus.

### Les émissions et rejets

Les informations relatives aux émissions à partir de ces sites (quantité et qualité des émissions de lixiviats et de biogaz) ont été communiquées, lorsque disponibles, par des exploitants d'installations de stockage participant au comité de pilotage du projet. Lorsque les données n'étaient pas disponibles, il a été fait appel aux données rapportées dans la littérature scientifique internationale. En particulier, les mesures de concentration en substances polluantes dans l'air ambiant au voisinage des sites de stockage font particulièrement défaut. Pour ce qui concerne les rejets vers les eaux souterraines, les données sont plus nombreuses mais généralement limitées à une seule famille de polluants, les métaux.

### Substances et toxicologie

Au final, plus d'une quarantaine de substances ont été retenues. Pour chacun de ces polluants, les informations

“ Une amélioration des conditions de la surveillance environnementale et sanitaire est nécessaire. ”

toxicologiques (effets et Valeurs Toxicologiques de Référence, VTR) ont été rassemblées et analysées à partir principalement des bases de données de l'U.S. EPA et de l'ATSDR (Agence nord-américaine de recensement des substances et effets toxiques).

### Estimation de l'exposition chronique des populations

Deux voies d'exposition des populations riveraines des installations ont été considérées : l'inhalation et l'ingestion. L'évaluation de l'exposition des populations a été effectuée par le biais de la modélisation afin, dans un premier temps, d'estimer des valeurs de concentrations dans les différents milieux d'exposition. Pour l'exposition par inhalation de polluants atmosphériques émis par les torchères de biogaz, des concentrations dans les milieux d'exposition ont été calculées à l'aide d'un modèle de dispersion atmosphérique [U.S. EPA (1995)].

**Bassin de collecte de lixiviats de décharge. Les lixiviats de décharge peuvent générer des risques sur les sites qui ne sont pas aménagés conformément à la réglementation en vigueur.**

*Collector basin for landfill leachates. Landfill leachates may cause risks at sites that are not designed according to existing regulations.*

© BRGM im@gé



Pour l'exposition par ingestion d'eau souterraine polluée par des lixiviats de décharge, le modèle de calcul MISP [Guyonnet (2001)] a été utilisé (il est téléchargeable sur le site web du BRGM : [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)). La figure 2 illustre le modèle conceptuel de cet outil qui évite l'hypothèse simpliste et non sécuritaire, de certains outils existants, d'un mélange parfait du flux polluant émis par la source avec l'eau souterraine à l'aplomb de la source. Il n'évite pas, par contre, l'hypothèse simplifiée d'un transfert des métaux contrôlé par un coefficient de partage solide-liquide (Kd). Ainsi, les phénomènes de spéciation chimique, et notamment de contrôle de la solubilité par des phases minérales, ne sont pas pris en compte. La prise en compte de ces phénomènes aurait nécessité l'utilisation d'un modèle de calcul simulant le transport réactif, par exemple PHREEQC [Parkhurst et Appelo (1999)], mais sortait du cadre méthodologique de l'étude. Ce point constitue néanmoins une importante voie de développement.

Une fois calculées les concentrations prévisibles dans les compartiments de l'environnement, d'autres équations mathématiques faisant intervenir des paramètres de transfert, des variables humaines d'exposition (comme la quantité d'eau ingérée) ont permis le calcul des doses d'exposition. Afin d'encadrer les risques encourus, des scénarios d'exposition contrastés ont été construits en s'appuyant respectivement sur des hypothèses moyennes et hautes pour chacun des paramètres. Les valeurs numériques retenues l'ont été sur la base de la connaissance des distributions des paramètres concernés.

Puis intervient le calcul du risque : pour les effets cancérogènes, l'utilisation des valeurs toxicologiques de référence (VTR) permet ce calcul sous forme notamment d'une probabilité qu'une personne souffre de troubles induits par cette exposition au cours de sa vie, fixée par convention à soixante-dix ans. On parle alors d'excès de risque individuel (ERI) et la valeur est comparée à un objectif d'ERI qui est fixé par l'autorité sanitaire compétente (le repère classiquement admis est  $10^{-5}$ ). Pour les polluants qui engendrent des effets autres que cancérogènes et survenant uniquement au-delà d'un certain seuil d'exposition, on exprime le risque par un ratio ou quotient de danger (QD), en référence à une dose journalière admissible (DJA). Si le QD est supérieur à 1, alors la dose journalière estimée dépasse la dose jugée admissible.

## Résultats de l'EQRS

À partir des données françaises rassemblées, on obtient, pour le scénario haut (précautionneux) et pour l'ingestion, des excès de risque supérieurs au repère classiquement admis (repère =  $10^{-5}$ ) pour l'arsenic (As), le Benzo(a)pyrène (BaP) et le 1,2 dichloréthane (1,2 DE), et des quotients de danger (QD) supérieurs au repère

PUBLICITÉ

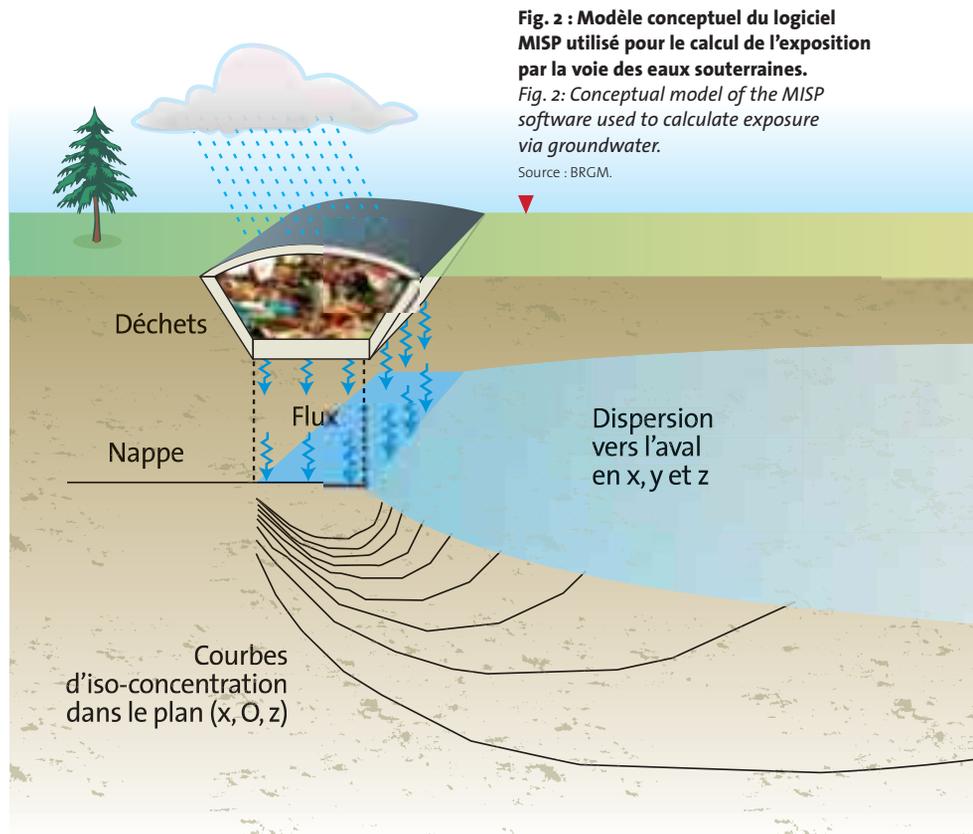
**DALBY**  
SYSTEMES MULTICAISONS

Tel : 05 53 41 55 80 - Fax : 05 53 40 16 88  
e-mail : [b.dalby@dalby.fr](mailto:b.dalby@dalby.fr) - site internet <http://www.dalby.fr>

*Dalby l'expérience d'un constructeur reconnu auprès des marchés publics et des collectivités*

*Une gamme complète de bras et de caissons sur mesure pour porteurs de 3.5 à 32 tonnes*

*Caissons premier choix et lots de caissons pour déchetterie et autres*



	VOIE D'EXPOSITION : INGESTION						
	Quotient de Danger			Excès de Risque Individuel			Scénario
	B	C3	B-10ha	B	C3	B-10ha	
As			1	$1.8 \times 10^{-4}$	$9.3 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{-4}$	Haut
Cd	1.9		5				Haut
Cr VI			1.5				Haut
1,2 DE						$1.8 \times 10^{-4}$	Haut
BaP				$2.9 \times 10^{-4}$		$7.8 \times 10^{-4}$	Haut
Dioxines					$5.4 \times 10^{-5}$		Haut
	VOIE D'EXPOSITION : INHALATION						
	Quotient de Danger			Excès de Risque Individuel			Scénario
	B	C3	B-10ha	B	C3	B-10ha	
Cr VI						$1 \times 10^{-5}$	Haut
H <sub>2</sub> S	27	25	65				Haut
H <sub>2</sub> S			2.6				Moyen

Tableau 1 : Valeurs de quotient de danger (QD) et d'excès de risque individuel (ERI) dépassant les repères, pour les centres de stockage de déchets de type B, B-10ha et C3.  
 Table 1: Values for the danger quotient (QD) and for individual risk excess (ERI) beyond the reference values, for type B, B-10ha and C3 waste storage facilities.

classiquement retenu (repère = 1) pour le cadmium (Cd), le chrome VI (CrVI) et l'arsenic. Pour le scénario moyen, quels que soient le type de site et la substance, les niveaux d'exposition aux polluants émis n'occasionnent pas, par ingestion, de risques significatifs pour les riverains (tableau 1). Pour les risques par inhalation, seuls ressortent le chrome VI et l'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S), ce dernier apparaissant comme le polluant le plus préoccupant.

Ces scénarios n'ont pu prendre en compte la présence de polluants organiques dans les eaux en raison de l'absence de mesures de concentrations représentatives de sites français. Il a donc été fait appel à des données de la littérature internationale. Selon les calculs, certaines substances conduisent, par ingestion, à des excès de risque supérieurs au repère de  $10^{-5}$  pour le scénario haut (benzène) ou pour le scénario moyen (chlorure de vinyle et 1,1,2 trichloréthane).

Parce que les odeurs et les effets reprotoxiques sont largement mis en avant dans les publications et par les populations, des analyses de risques spécifiques ont complété les travaux précédents. Pour les populations résidant à proximité (200 m) des sites B-10ha, les niveaux d'exposition de H<sub>2</sub>S et des mercaptans dépassent les seuils olfactifs recensés. Pour les effets reprotoxiques, tous les quotients de danger sont inférieurs au repère de 1 signifiant que l'exposition est inférieure à la Valeur Toxicologique de Référence (VTR). Aucune survenue d'effets reprotoxiques n'est donc attendue dans la population concernée.

### Discussion

Les résultats du tableau 1 montrent que les repères de niveau de risque classiquement utilisés ne sont dépassés que pour un nombre limité d'éléments et presque exclusivement pour le scénario « haut ». Or il faut souligner que le caractère éparse des données disponibles

concernant les émissions gazeuses et les rejets liquides ont conduit à formuler des hypothèses parfois fortes pour aller au bout du calcul du risque. Compte tenu du caractère majorant de l'approche adoptée, on peut déduire des résultats du tableau 1 que la situation générale liée au stockage des déchets n'apparaît pas particulièrement préoccupante. Dans l'idéal, les dépassements de seuils constatés pour l'arsenic et les dioxines (scénario haut ; site C3) pourraient donner lieu à des mesures effectives de concentrations dans les milieux d'exposition sur des sites réels, afin de vérifier la pertinence des hypothèses de calcul. En tout état de cause, l'organisation des connaissances disponibles qu'a suscitée cette mise en œuvre de la démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires pour les centres de stockage, met en évidence la nécessité d'entreprendre des efforts pour pallier les manques manifestes d'informations.

**Les prescriptions réglementaires imposant l'utilisation de barrières d'étanchéité ont permis de réduire considérablement les risques de pollution des eaux souterraines.**  
 Regulatory provisions stipulating the use of watertight barriers have substantially reduced the risks of groundwater contamination.

© BRGM im@gé





## Assessing health risks: an application to domestic waste storage

In most European Union countries, and notably France, waste storage remains one of the main methods of waste management. In 2002, InVs and AFSSET, working with experts from a number of other institutions, including ADEME, ASTEE, BRGM, EHESS, INERIS, MEDD, ONYX, RSD, POLDEN, SITA, and SSP, prepared a study aimed at assessing the risk of a possible impact of municipal solid waste disposal sites on health. In addition to the risk assessment approach, the study's objectives were to analyze the quality of available data, identify detrimental knowledge gaps and also to propose a perspective on the evolution of risks as a function of management practices in waste storage facilities. The selected approach relies on the quantitative health risk assessment method (noted EQRS in French). The results obtained give only a general indication of the magnitude of the risks incurred by the public because of the many hypotheses that needed to be made all along the EQRS procedure. These results suggest that the general situation regarding waste storage does not seem particularly alarming. However, due to the existence of obvious information gaps, conditions of environmental and health monitoring need to be improved. In view of the information gaps clearly identified in the study, it is recommended that adapted measurement campaigns be conducted, notably targeting the organic contaminants present in leachates. The institution of a health and environmental control will also provide valuable information to the debate with local players and the public, whose demands are ever more precise and urgent.

	Facteurs de variabilité			Facteurs d'incertitude			Nombre total de facteurs identifiés
	Influence +	Influence -	Non quantifiable ?	Influence +	Influence -	Non quantifiable ?	
Émission	2	2	0	5	2	0	11
Dispersion	4	0	0	3	3	1	11
Chaîne alimentaire	1	2	3				6
Exposition	6	1	0	2	0	2	11

▲ **Tableau 2 : Nombre de facteurs de variabilité et d'incertitude repérés au long de la démarche d'évaluation quantitative du risque sanitaire.**  
*Table 2: The number of variability and uncertainty factors identified in the course of the quantitative assessment process for health risk.*

Les hypothèses de calcul pèsent sur les résultats des calculs des risques et il n'est pas toujours aisé d'en déterminer l'influence qui reste souvent qualitative. Le *tableau 2* permet de visualiser de manière globale le nombre de paramètres concourant à la propagation de l'incertitude et de la variabilité au cours de la démarche, de la connaissance des émissions jusqu'au calcul de l'exposition. Parmi tous les facteurs identifiés, seuls neuf d'entre eux peuvent faire l'objet d'une appréciation quantitative de leur influence. Les deux plus influents sont « la distance site-captage » et « l'absence de couverture sur les sites B » avec un facteur multiplicatif pouvant aller, respectivement, jusqu'à 50 et 5. Tous les autres ne peuvent faire l'objet que d'une appréciation qualitative.

Les résultats obtenus ne sont donc que des ordres de grandeur des risques encourus par les populations en raison des nombreuses hypothèses qu'il a fallu formuler au cours du déroulement de la démarche d'EQRS. Avec certaines hypothèses fortes (pessimistes), les calculs suggèrent des possibilités de signes irritatifs, de survenue de cancer et de nuisances odorantes, mais pas de pathologies reprotoxiques, objet de fortes controverses. Plus important, le présent travail montre que, bien que les réglementations successives ne proposent pas d'objectif de santé publique explicite, l'évolution des modalités d'exploitation exigées conduit à une réduction notable des impacts sanitaires. Ainsi, pour des centres de stockage accueillant des déchets ménagers et assimilés, un facteur de 100 est observé entre une gestion qui ne canalise pas ses rejets et une gestion qui les canalise et qui les traite.

Comme il a été dit plus haut, la situation générale liée au stockage des déchets n'apparaît pas particulièrement préoccupante. Or ce résultat est cohérent avec les travaux scientifiques sur l'état des milieux, qui montrent en particulier que de nombreux mécanismes concourent à atténuer les polluants émis vers les eaux souterraines à l'aval hydraulique des sites de stockage de déchets ménagers et assimilés [Christensen *et al.* (2001)]. Il s'agit notamment de réactions de coprécipitation de métaux, d'adsorption de métaux par des phases argileuses, ou de biodégradation de la charge organique.

Il n'empêche qu'en raison des lacunes de connaissances manifestes, une amélioration des conditions de la surveillance environnementale et sanitaire est nécessaire. Ces lacunes de connaissances largement identifiées dans ce travail conduisent à recommander la mise en œuvre de campagnes de mesures appropriées, notamment pour les polluants organiques présents dans les lixiviats. À noter l'important travail en cours mené par le BRGM sur la bancarisation des données de qualité des eaux souterraines à l'aplomb d'installations classées pour la protection de l'environnement. Cette bancarisation, qui concerne également les installations de stockage de déchets, est effectuée à l'aide de l'outil ADES [Chéry et Cattani (2003)] qui utilise un format de saisie national (et bientôt européen). La mise en place de surveillance sanitaire et environnementale est une mission de première importance qui contribuera également à enrichir le débat avec les acteurs locaux et les populations dont les demandes deviennent de plus en plus précises et pressantes. ■

**Références :** ADEME (2006) – Les déchets en chiffres < www.ademe.fr/déchets >. T. Christensen, P. Kjeldsen, P. Bjerg, D. Jensen, J. Christensen, A. Baun, H.-J. Albrechten, G. Heron (2001) – Biogeochemistry of landfill leachate plumes. Applied Geochemistry, 16: 659-718. D. Guyonnet (2001) – MISP\_v1. Un modèle analytique pour estimer l'impact de sources de pollution sur les eaux souterraines. Rapport BRGM RP-51039-FR. InVS-AFSSE (2005) – Stockage des déchets et santé publique. Synthèse et recommandations. InVS, Saint-Maurice, France. ISBN 2-11-095110-9. B.L. Johnson – A review of the effects of hazardous waste on reproductive health. Am.J. Obstetrics Gynecol. 1999. 181(1):S12-S16. L. Chery, A. Cattani (2003) – ADES : la banque de données nationales sur les eaux souterraines. La Houille blanche, N°2, p. 115-119. D.L. Parkhurst, C.A.J. Appelo (1999) – User's guide to PHREEQC (version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculation. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations. Report 99-4259, 312 pp. S. Tarkowski, R. Rolecki (2001) – Hazardous wastes and public health. Potential health effects of exposure at levels encountered around the landfills. Eur. Epimarcker 2001. 5(2):1-7. US EPA (1995) – SCREEN3. Model user's guide. Rapport EPA-454/B-95-004. M. Vrijheid (2000) – Health effects of residence near hazardous waste landfill sites: a review of epidemiologic literature. Environ. Health Perspect. 2000. 108(suppl):101-112. A. Williams, B. Jalaludin (1998) – Cancer incidence and mortality around a hazardous waste depot. Aust. N. Z. J. Public Health 1998. 22(3):324-346.

H. CATHERINE W. SKINNER

# Health and hazards: Interdisciplinary activities between earth sciences and public health

Life forms from microbes to humans inhabit a very small portion of our planet with the sites selected by humans further restricted to locales with access to fresh water, food and space that aid general well-being. With increasing populations occupying more of the land surface some environments turned out to be less than salubrious and not only because of anthropogenic occupation and activities. Beyond the physical traumas, earthquakes and tsunamis, there are hazards that are hidden in natural environments. They often go unnoticed, remaining “silent” until a crisis forces a connection. The offenders may be natural earth materials, or anthropomorphically generated compounds, that are not easily nor casually detected, i.e. through color, taste or smell. Often widely distributed, and of exceedingly small size, detection and identification of these hazards in the geographic and geologic environments is non-trivial with many possible solutions, all expensive.

H. Catherine W. Skinner

MINERALOGIST  
RESEARCH AFFILIATE AND LECTURER,  
DEPARTMENT OF GEOLOGY  
AND GEOPHYSICS,  
DEPARTMENT OF ORTHOPAEDICS  
AND REHABILITATION,  
YALE UNIVERSITY  
Catherine.Skinner@Yale.edu



With the remarkable advances in analytic techniques and sensitivities in the laboratory, and at field and global levels, it is now possible to seek not only reduction or remediation but disease prevention from some hazards. The well-being of the present and future populations are important goals that require integrated interdisciplinary scientific research now aided by easy and rapid communications. Through collaborative efforts it should be possible to arrive at informed decisions with long-term benefits for all the Earth’s inhabitants.

My approach to potential hazards starts with the over 90 naturally occurring elements heterogeneously distributed by solid earth processes, diverse climatic regimes and biogeochemical weathering that have produced distinct environments. These environments are not static. They changed over geologic times and continue to do so through cycles that link the lithosphere with the atmosphere, hydrosphere and biosphere. Each sphere in the dynamic interchange is essential to human existence and presents a host of physical processes which we are only beginning to document and understand. Each sphere harbors materials, some beneficial, others potentially disease-causing agents. The inorganic materials, the minerals in rocks, are the source of elements and compounds and provide sediments, soils but also sand. The organic and biological constituents in each sphere are generated by living forms, species whose growth depends on the availability of nutrients.



Itoigawa stream (Japan) – Itoigawa (Japon) : le torrent.

© H. Catherine W. Skinner.

The global environment may appear benign, but the continual transfers from one environment to another influence not only the food chain, plants to animals to humans, but any/all of the incorporated materials may exacerbate, if not initiate, acute or chronic, infectious or nutritional diseases.

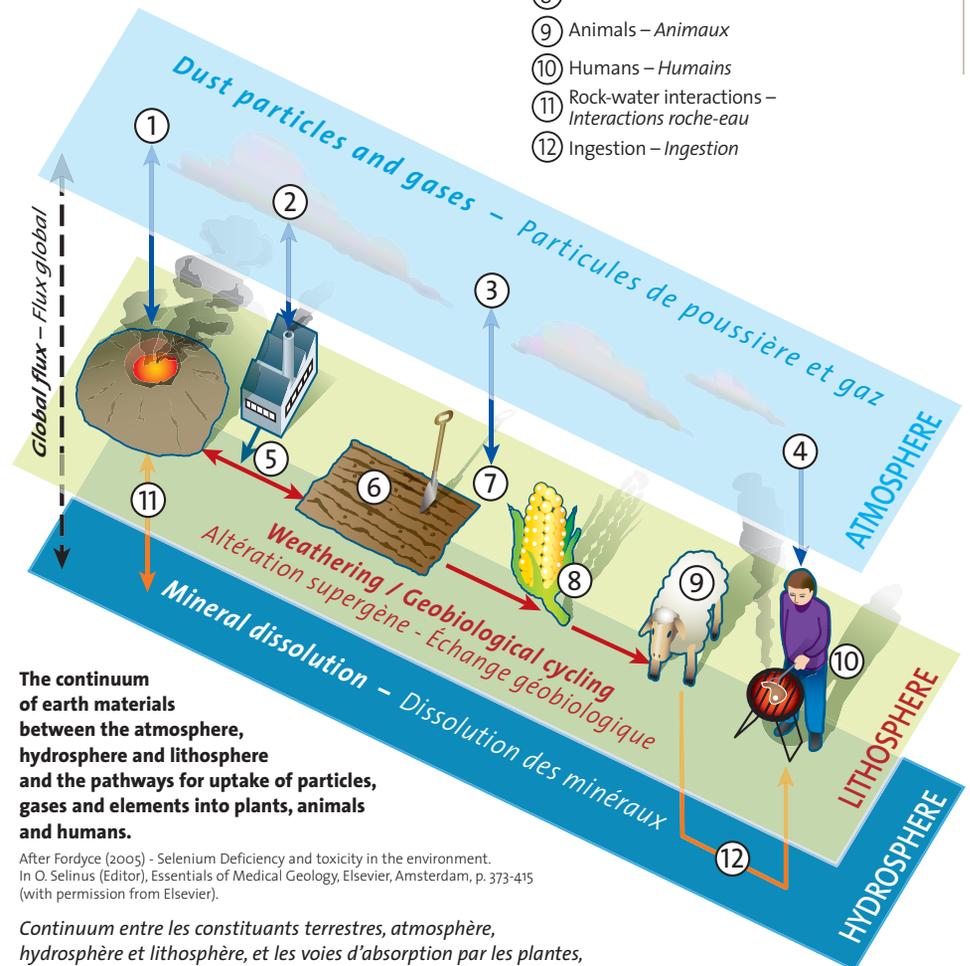
To assess possible links between the environments and health, cause and effect, the chemical and physical properties, concentrations and bioavailability of a suspected environmental hazard, whether natural or synthetic, must be matched with diagnosis of a particular disorder within a population. What ideally follows is estimation of the amount and rate of uptake in individuals who may present with highly variable health effects and disease gestation times on the various body systems. Unequivocal identification and relationship of a hazard with known disease responses can take many years of study.

Most hazards have been identified from occupational or crisis situations where the exposure levels were/are large, continual, easily detected and measured. Health responses to low dose, no less important, especially for some situations and individuals, are much more difficult to detect and to monitor. Laboratory testing on cells, tissues or animal models employed to demonstrate connections are not entirely appropriate for estimating levels of risk to humans. These are future research areas along with studies examining possible synergies between multiple hazards and the possibility that there are multiple pathways that transfer hazards both on Earth and to populations. A composite of earth and health science information often with different temporal and spatial scales can be compared using GIS, geographic information systems programs. For example, distributions of hazards in soils and waters can be compared with data on the botanical/agricultural species in any sites, rural or urban. As well, roads and traffic patterns, streams or artesian sources, industrial, factory, or waste disposal locations, as well as outbreaks of Lyme disease, patients suffering from asthma, cardiovascular disease and etc. can be plotted and related. To test hypotheses of the linkage, sites/sources of hazards with disease occurrence, models of areal associations combining environmental and epidemiological data are utilized.

World-wide interchanges across the scientific spectra from multiple geographic areas show progress, and some are discussed in this volume. Crossovers between earth and health scientists, somewhat haphazard, are on the increase in spite of discipline boundaries and financial constraints. Research by the US Geological Survey, Environmental Protection Agency, National Aeronautics and Space Administration, and the US National Academy of Sciences, published and on web sites, illustrate cooperative efforts, offering novel insights and solutions. International meetings encompassing heretofore unimagined combinations of expertise are on the increase: physical, chemical and biogeoscientists, convene with engineers, social scientists, community and public health professionals. The Year of Planet Earth, 2008, and the upcoming meetings of the International Geologic Congress in Norway (August 5-14, 2008) offer unique opportunities.

Research identifying a hazard, its distribution, level and rate of potential uptake by humans whether natural, or from industrial, including pharmaceutical, or agricultural sources could alleviate if not prevent some instances of suffering, debility and death. Interdisciplinary scientific efforts and communication with those responsible and concerned with public health, is essential. Health hazards will incite a great deal of biogeoscientific research in the years to come.

- ① Volcanic dust and gas – *Poussières et gaz volcaniques*
- ② Industry/Emissions – *Industries/Émissions*
- ③ Volatilization – *Volatilisation*
- ④ Inhalation – *Inhalation*
- ⑤ Industrial waste – *Déchets industriels*
- ⑥ Soils – *Sols*
- ⑦ Deposition – *Dépôts*
- ⑧ Plants – *Plantes*
- ⑨ Animals – *Animaux*
- ⑩ Humans – *Humains*
- ⑪ Rock-water interactions – *Interactions roche-eau*
- ⑫ Ingestion – *Ingestion*



**The continuum of earth materials between the atmosphere, hydrosphere and lithosphere and the pathways for uptake of particles, gases and elements into plants, animals and humans.**

After Fordyce (2005) - Selenium Deficiency and toxicity in the environment. In O. Selinus (Editor), *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, p. 373-415 (with permission from Elsevier).

*Continuum entre les constituants terrestres, atmosphère, hydrosphère et lithosphère, et les voies d'absorption par les plantes, les animaux et les humains, des particules, des gaz et des éléments.*

D'après Fordyce (2005) - Selenium Deficiency and toxicity in the environment. In O. Selinus (Editor), *Essentials of Medical Geology*, Elsevier, Amsterdam, p. 373-415 (autorisation de reproduction Elsevier).

**OLLE SELINUS**  
**ROBERT B. FINKELMAN**  
**JOSE A. CENTENO**

## The medical geology revolution

**A**lthough geologic factors play key roles in a range of environmental health issues that impact the health and well-being of billions of people worldwide, few actually realize how crucial a role these factors play in animal and human health. In 1996, this situation motivated the International Union of Geological Sciences (IUGS) to form an International Working Group on Medical Geology (MGWG), headed by Olle Selinus of the Geological Survey of Sweden (SGU). This working group's primary aim was to promote awareness concerning this issue among geoscientists, medical specialists, and the public at large.

Since the Working Group was established, steady progress has been made in this field. In October 1997, the group met in Vale, Colorado, USA. At this meeting, the term "Medical Geology" was adopted by the participants. The next meeting of the Working Group took the form of a workshop held in Uppsala, Sweden in 1998. Discussions focused on the feasibility of preparing a new handbook on medical geology. In September 2000, some 50 people participated in a second meeting and workshop in Uppsala, where a two-day seminar was held on medical geology, entitled "The Geochemical Environment and Human Health". A volume of proceedings was subsequently published<sup>1</sup>. The workshop participants discussed future work to be undertaken by the group, including editing newsletters, creating an internet homepage, generating other informational materials, and publishing an interdisciplinary book on medical geology designed for a wide audience.

The International Geologic Correlations Programme (IGCP) launched a new project in

2000, "IGCP 454 Medical Geology," chaired by Olle Selinus. The primary aim of the project was to foster contacts between scientists in developing countries working on medical geology issues and their colleagues in other parts of the world. For the first time, this afforded an opportunity for scientists from developed and developing countries to come together in a truly international and interdisciplinary forum and to identify and tackle significant environmental health problems.

In 2000, the group was joined by Bob Finkelman, U.S. Geological Survey (USGS), and Jose Centeno, U.S. Armed Forces Institute of Pathology (AFIP). Both had since 1996 been working independently in medical geology on issues that paralleled and complemented the objectives of IUGS-supported activities and had developed a popular short course on the health impacts of trace elements and metal ions that could easily be brought in line with MGWG objectives. They presented a short course in 2001 at a meeting in Lusaka, Zambia. The enthusiastic reception it received was a convincing demonstration that the

**Olle Selinus**

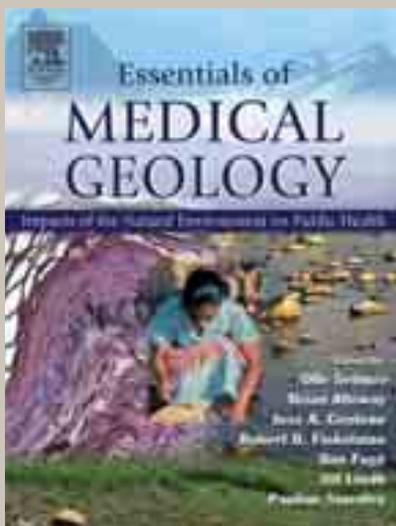
PH.D. GEOLOGIST,  
 GEOLOGICAL SURVEY  
 OF SWEDEN  
 CHAIRMAN OF THE  
 INTERNATIONAL MEDICAL  
 GEOLOGY ASSOCIATION  
 olle.selinus@sgu.se

**Robert B. Finkelman**

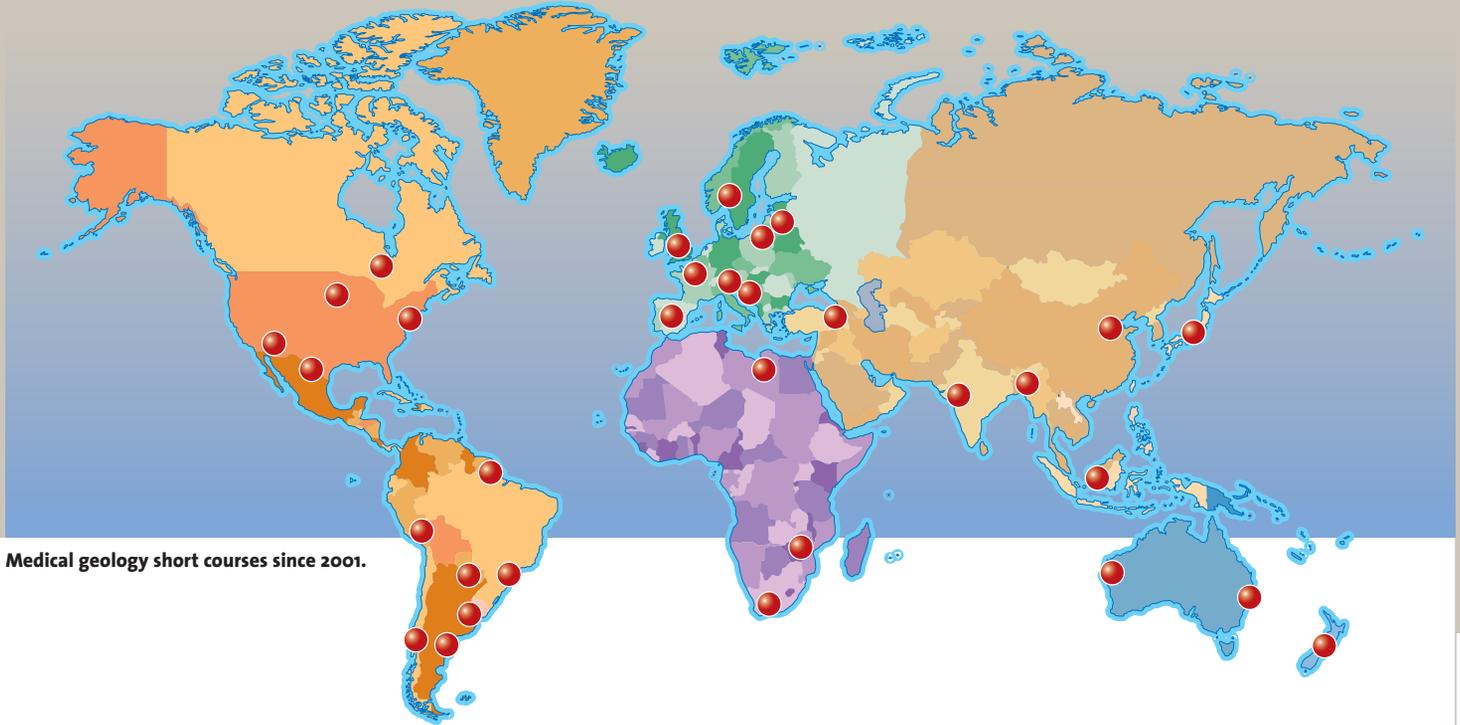
PROFESSOR, DEPT OF  
 GEOSCIENCES, UNIVERSITY  
 OF TEXAS (DALLAS)  
 CO-CHAIRMAN FOR  
 GEOSCIENCE, THE  
 INTERNATIONAL MEDICAL  
 GEOLOGY ASSOCIATION  
 Rbf@usgs.gov

**Jose A. Centeno**

SENIOR RESEARCH SCIENTIST,  
 U.S. ARMED FORCES  
 INSTITUTE OF PATHOLOGY  
 (WASHINGTON, DC)  
 CO-CHAIRMAN FOR  
 MEDICAL SCIENCES,  
 THE INTERNATIONAL MEDICAL  
 GEOLOGY ASSOCIATION  
 Jose.Centeno@afip.osd.mil



(1) H.C.W. Skinner and A.R. Berger, editors (2003) - *Geology and Health: Closing the Gap*. Oxford Press, Oxford, 179 p.



Medical geology short courses since 2001.

medical geology short course would be a powerful tool with which to advance the Working Group's objectives. A request for funding was submitted to the International Council of Science (ICSU), which responded with a \$50,000 grant, sufficient to cover a number of medical geology short courses. This was the first ICSU grant obtained for any IUGS activity.

### Medical Geology Short Courses

The ICSU money actually allowed many more short courses to be funded than initially proposed. Since then, these courses, conducted by Centeno, Finkelman and Selinus, have been presented in over 30 countries; they have been attended by thousands of students and professionals with backgrounds in geoscience, biomedical/public health science, environmental science, geography, engineering, chemistry, etc. In addition, local scientists are invited to describe medical geology work in progress in their own regions. We have produced a 300-page syllabus and a CD containing the lecture materials used in the short course, as well as supplementary materials. It is our hope and expectation that this material will be used by participants to conduct courses of their own in medical geology.

### Symposia and Congresses

The working group and the IGCP project have also been active in promoting medical geology at meetings around the world by organizing and/or sponsoring special sessions or symposia on medical geology; they have also provided financial support to allow students and professionals from developing countries participate.

The Swedish Royal Academy of Sciences was the venue for the most recent International Symposium on Medical Geology, which was organized in May 2006 under the auspices of the Academy. The activity succeeded in bringing together more than 100 scientists from all over the world to discuss the current state of medical geology and future directions.

### Book

In 2005, Elsevier published a book entitled *Essentials of Medical Geology*, edited by Olle Selinus and six associate editors<sup>2</sup>. The work contains contributions from over 60 distinguished authors from around the world, about 50% of whom are geoscientists and the remainder physicians, veterinarians and scientists from other branches. More than 800 pages long, the book has illustrations in

full colour. It was awarded recognition by the British Medical Association as a major contribution to Public Health, and by the Association of Scholarly Publishers in the geology/geography category.

### The International Medical Geology Association (IMGA)

As a recent step in the development of medical geology, the International Medical Geology Association (IMGA) was established in January 2006. The Directors of the Association are the authors of this paper. We have also appointed an executive committee and six Councillors to represent the broad geographic distribution of Medical Geology and the wide range of disciplines that are embraced by this topic. Information can be found on the website <http://www.medicalgeology.org>.



(2) O. Selinus, B. Alloway, J.A. Centeno, R.B. Finkelman, R. Fuge, U. Lindh and P. Smedley, editors (2005) - *Essentials of Medical Geology*. Elsevier, Amsterdam., 820 p.



JACQUES VARET

## Volcanisme et santé

Les volcans constituent des lieux souvent emblématiques. En phase de repos, ce sont des sites propices à la promenade, à la découverte, voire à la méditation (autour du Pacifique, la plupart des volcans sont aussi des sites religieux). Beaucoup d'entre eux sont inclus dans le périmètre de parcs nationaux. C'est notamment le cas de la Soufrière (Guadeloupe) et bientôt de la Fournaise (Réunion).

Émanations de soufre natif dans le cratère du Kawah Idjen (Java, Indonésie, 1996).  
*Emanations of native sulphur in the Kawah Idjen crater (Java, Indonesia, 1996).*  
© Rémy Bosc, BRGM im@gé



Jacques Varet

PRÉSIDENT DU CSERV  
(COMITÉ SUPÉRIEUR D'ÉVALUATION  
DES RISQUES VOLCANIQUES)  
j.varet@brgm.fr



En phase éruptive, les manifestations volcaniques peuvent certes avoir des effets destructeurs pour les biens et les personnes, se traduisant par des dégâts matériels et des décès, mais aussi des effets sanitaires qui ont fait l'objet d'études et de recherches, notamment dans une optique de prévention et de précaution. Les effets des volcans sur la santé peuvent être principalement regroupés en deux ensembles :

- les effets liés aux émissions de cendres lors d'éruptions pliniennes,
- les effets liés aux émissions de gaz, pour tous les types de volcans y compris les systèmes hydrothermaux.

On pourrait y ajouter une troisième catégorie, l'effet de l'onde de choc, notamment lors d'éruptions violentes de type nuée ardente dirigée (cas documenté à Saint-Pierre lors de l'éruption de la montagne Pelée en 1902). Mais il s'agit d'un effet létal plus que sanitaire, et nous n'en dirons pas plus.

Les effets sanitaires liés aux éruptions de cendres seront létaux en cas d'éruptions pyroclastiques massives, mais les phases éruptives se caractérisent souvent par des émissions de cendres fines dont l'effet sanitaire (bronchites chroniques, asthme...) se manifeste en cas d'exposition prolongée. Les patients se plaignent d'abord de maux des yeux, d'irritations nasales, d'irritations de la peau et de maux de gorge. La silice sous ses diverses formes (quartz, cristobalite ou tridymite) est à compter parmi les particules les plus nocives. Les limites d'exposition respirable sont définies à 50 microgrammes/m<sup>3</sup>.

Volcan (pays, année d'éruption)	Morts	Blessés	Yeux	Respiratoire	Nasal
Mount St. Helens (États-Unis, 1980)			X	X	X
El Chichon (Mexique, 1982)	Effondrement de toiture		X	X	
Mount Pinatubo (Philippines, 1991)	Effondrement de toiture				
Rabaul (Papouasie-Nouvelle-Guinée, 1994)	Asphyxie				
Usu (Japon, 1994)	Asphyxie				
Fogo (Cap Vert, 1995)			X		
Cerro Negro (Nicaragua, 1992)				X	
Etna (Italie, 1999)			X		
Mt. Cameroun (Cameroun, 1999)			X	X	
Pacaya (Guatemala, 1998)		X	X	X	
Telica (Nicaragua, 1999)			X	X	X

► **Principaux effets sanitaires des cendres volcaniques pour quelques éruptions récentes.**

Main health effects of volcanic ash for some recent eruptions.

▼ **Effets des gaz volcaniques sur la santé.**

Health effects of volcanic gases.

Parmi les gaz volcaniques, le dioxyde de soufre, le dioxyde de carbone, et l'hydrogène fluoré sont susceptibles d'avoir un effet sur la santé. L'éruption du Mont Pinatubo, le 15 juin 1991, donne une idée de l'importance de ces émissions. En 9 h d'éruption ont été émis 5 km<sup>3</sup> de lave, 17 millions de tonnes de SO<sub>2</sub> et 42 Mt de CO<sub>2</sub>. Le dioxyde de carbone peut provoquer des asphyxies à forte dose (cas du lac Nyos au Cameroun, ou du plateau de Dieng en Indonésie). HF est caustique et irritant même en cas de faible exposition. C'est une cause de mortalité pour le bétail lors d'éruptions de cendres chargées en HF, comme on l'a observé en Islande (empoisonnements par à peine un millimètre de cendres).

Les mesures de précaution consistent à renseigner la population des zones potentiellement exposées sur les effets sanitaires des gaz et cendres volcaniques, au titre de l'information générale sur les risques volcaniques. En période éruptive, selon les phénomènes observés et les résultats des mesures géochimiques, des informations préventives spécifiques devront être diffusées à la population exposée.

Gaz	Teneur	Exposition	Effet
SO <sub>2</sub>	0,5 ppm 6 - 12 ppm 20 ppm	24 h immédiat id.	seuil alerte irritation du nez irritation des yeux
CO <sub>2</sub>	5 % 10 % 15 % 20 - 30 % plus de 30 %	minute id. id. id. id.	augmentation respiration souffle court, malaise contractions musculaires convulsions mortel (asphyxie)
HCl	35 ppm 100 ppm	minute id.	irritation de la gorge oedème pulmonaire, spasme
HF	quelques ppm 250 ppm	minute sur herbe sèche	conjonctivite, irritation de la peau mortalité bétail

Volcan Type tectonique Température	Kilauea Summit Point chaud 1 170 °C	Erta Ale Plaque divergente 1 130 °C	Momotombo Plaque convergente 820 °C
H <sub>2</sub> O	37,1	77,2	97,1
CO <sub>2</sub>	48,9	11,3	1,44
SO <sub>2</sub>	11,8	8,34	0,50
H <sub>2</sub>	0,49	1,39	0,70
CO	1,51	0,44	0,01
H <sub>2</sub> S	0,04	0,68	0,23
HCl	0,08	0,42	2,89
HF	-	-	0,26

**Exemples de composition de gaz volcaniques (concentrations en pourcentage volumique).**

Examples of volcanic gas composition (concentrations and percent by volume).

D'après Symonds et. al., 1994

**Le volcan Yassour sur l'île de Tanna, aux îles Vanuatu, dans le Pacifique.**

The Yassour volcano on the island of Tanna, in the Pacific Ocean.

© BRGM im@gé

**Pour en savoir plus :** Health Hazards of Volcanic Ash, A Guide for the Public: International Volcanic Health Hazard Network (IVHN) < www.ivhnn.org >. P.J. Baxter (1999) – Impacts of eruptions on human health: In H. Siggurdson (ed.), Encyclopaedia of Volcanoes, Academic Press, New York, pp. 1035-1043. < http://volcanoes.usgs.gov/ash/health/index.html >. < http://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html >. < http://www.epa.gov/airnow/volcano-events.html >



ALAIN GRIMFELD

## Les métaux sont-ils utiles ou néfastes pour la santé ?

Depuis des siècles, différents métaux sont réputés pour leurs vertus médicinales. Parallèlement ces mêmes métaux, à doses élevées, ou d'autres, étaient reconnus pour leurs effets nocifs. Cela a donné lieu au cours du temps à la production de médicaments, selon des réglementations rigoureuses, dans lesquelles sont fixées et contrôlées tant les propriétés thérapeutiques que la sécurité d'emploi. Dans le même temps, mais surtout depuis l'avènement de l'ère industrielle, l'homme a répandu certains métaux dans la nature et a contaminé les milieux, eaux, sols, air, constituant autant de sources anthropiques de pollution pour le « vivant », et en particulier pour lui même.

**Alain Grimfeld**

PROFESSEUR DE PÉDIATRIE,  
PNEUMOLOGIE ET ALLERGOLOGIE  
UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE,  
PARIS VI  
PRÉSIDENT DU COMITÉ DE LA  
PRÉVENTION ET DE LA PRÉCAUTION  
(MEDD)  
alain.grimfeld@trs.aphp.fr



**Au plan thérapeutique**, des métaux sont utilisés notamment sous forme d'oligo-éléments dans diverses indications : **or, argent, bismuth**, au cours d'états infectieux ou post-infectieux, ou d'asthénie ; **manganèse, cobalt**, au cours de dystonies neuro-végétatives ou d'états migraineux ; **nickel**, au cours d'états dyspeptiques ; **aluminium** au cours de troubles légers du sommeil ; **magnésium**, contre la spasmodophilie. Ce type d'utilisation pose question car les preuves de l'efficacité de telles préparations ne sont pas acquises, selon les procédures actuellement validées. Intéressante à ce propos serait l'étude de l'utilisation d'« antioxydants » tels que **cuivre, zinc ou sélénium**, à doses suffisantes, pour pallier le risque de stress oxydant auquel sont soumis un nombre croissant de nos contemporains, pour des raisons environnementales diverses. L'**aluminium** est également utilisé sous forme de phosphate dans le traitement symptomatique de manifestations douloureuses au cours d'affections oesogastro-duodénales, ou encore sous forme d'hydroxyde dans de nombreux vaccins. Le **lithium**, entrant dans la composition de produits sous forme

d'oligo-élément (gluconate) pour troubles légers de l'humeur, est utilisé à doses fortes sous forme de carbonate dans des psychoses graves, avec des risques d'effets secondaires. Les **sels d'or** sont indiqués dans certains rhumatismes inflammatoires, également avec des risques d'effets secondaires. Les **sels de fer** sont utilisés dans les anémies dites « ferriprives ». Le **bismuth** est utilisé comme oligo-élément « modificateur de terrain » au cours d'états infectieux, notamment de la sphère oto-rhino-laryngologique, mais il a été interdit comme composant de préparations utilisées dans certaines affections gastro-intestinales, du fait du risque d'encéphalopathie.

**Dans l'environnement**, les éruptions volcaniques, les feux de forêt et la combustion de matières organiques ont de tout temps dispersé des **contaminants tels que les métaux lourds**. L'extraction et le raffinage des métaux et du pétrole, ainsi que l'activité industrielle intensive au cours du dernier siècle, ont largement contribué à l'**augmentation de cette contamination**. Les métaux lourds sont peu ou pas métabolisés par les êtres vivants et s'accumulent ainsi dans les chaînes alimentaires. Ce sont notamment le mercure, le plomb et le cadmium.

Pour le **mercure**, ce sont les poissons qui constituent la principale source de contamination des populations. Ce métal, disséminé dans l'environnement par des phénomènes naturels ou des activités industrielles, est transformé par les micro-organismes de sédiments marins et aquatiques en méthylmercure plus facilement assimilable, et il subit une bioamplification importante dans la chaîne alimentaire. Les populations grandes consommatrices de poissons et de mammifères ichtyophages sont les plus exposées, avec des risques d'intoxication chronique se manifestant, notamment chez le fœtus et l'enfant, par des troubles du développement, en particulier neuro-comportemental. Certaines études ont cependant mis en évidence des effets insidieux sur le système nerveux à des niveaux d'exposition considérés comme inoffensifs. Dans le but de protéger la population, certains pays ont établi des règles administratives concernant la concentration admissible de mercure dans le poisson commercialisé. En effet, il faut mettre en balance, d'une part le risque d'intoxication, d'autre part

le risque de se priver de protéines de haute qualité, d'acides gras oméga-3, de vitamines et de minéraux, dont la vitamine D et le sélénium, en cas de suppression du poisson de l'alimentation.

La contamination par le **plomb**, par ingestion, est beaucoup plus diffuse que par le mercure. L'intoxication chronique chez le fœtus et l'enfant se manifeste par des troubles du développement neuro-comportemental, et chez les personnes âgées, par des maladies cardio-vasculaires. Au cours des quinze dernières années, le plomb dans la ration alimentaire a notablement diminué dans nombre de pays de la communauté européenne, grâce notamment à la diminution de l'utilisation de l'essence au plomb, à l'élimination quasi totale des soudures au plomb pour la fabrication des boîtes de conserve et à la remise aux normes, en cours, des conduites de distribution d'eau potable. Cependant des risques d'intoxication persistent, et il est recommandé, notamment dans les populations socio-économiquement défavorisées, de surveiller la plombémie des enfants.

La contamination environnementale par le **cadmium** a augmenté considérablement au cours des années 1980-90, du fait de son utilisation industrielle grandissante. L'usage répété d'engrais phosphatés et l'épandage de boues non traitées a aussi participé à cette augmentation. Or le transfert de ce métal du sol vers les parties comestibles des végétaux est beaucoup plus important que celui d'autres métaux. Les mollusques, les crustacés et les algues peuvent aussi présenter des concentrations importantes. L'utilisation d'ustensiles de cuisine en matériel galvanisé, de même que celle de pigments de cadmium dans les poteries, les plastiques ou les emballages, peut encore accroître l'exposition. L'élément se concentre dans le foie et les reins. Les conséquences peuvent être le développement de maladies cardio-vasculaires, notamment chez les personnes âgées.

L'**aluminium** peut contaminer les aliments acides, par l'intermédiaire de procédés d'emballage contenant ce métal. L'intoxication chronique, atteignant surtout le fœtus et l'enfant, se traduit par des troubles neurologiques.

Les sites et sols pollués, à l'endroit d'anciennes usines notamment, peuvent être responsables de contamination notable chez les populations vivant sur ou à proximité de ces lieux « réhabilités ». Il en est ainsi de l'intoxication chronique par l'**arsenic** pouvant être responsable, après une période d'exposition de quinze à vingt ans, d'affections cutanées, de cancers (vessie, reins, poumons...) et de maladies vasculaires. Les contacts répétés avec le **nickel** peuvent provoquer des affections cutanées, de type allergique.

**La liste des métaux cités n'est pas exhaustive** et ne comporte pas les éléments radioactifs...

Alors, utiles ou néfastes pour la santé ? La réponse n'est pas univoque. Certains métaux peuvent être bénéfiques pour la santé et entrer dans la composition de médicaments, sous des conditions strictes de contrôle dans la fabrication et l'utilisation. Les mêmes métaux à des doses plus élevées, ou d'autres métaux disséminés dans l'environnement, de manière naturelle ou anthropique, peuvent au contraire être toxiques pour l'homme. En France, un travail de veille rigoureux est accompli par les **Agences de Sécurité Sanitaire**, des Produits de Santé (Afssaps) dans le premier cas, des Aliments (Afssa) et de l'Environnement et du Travail (Afset) dans le second cas. Ces agences appliquent essentiellement le principe de **prévention**, lorsque le niveau de connaissance scientifique autorise la mise en œuvre de mesures adaptées pour contrôler le risque, c'est-à-dire la probabilité de survenue d'un danger lié à l'exposition aux métaux. L'arrivée constante de nouveaux produits contenant ces métaux et des connaissances incomplètes sur certains dangers liés à l'exposition peuvent conduire, en situation d'incertitude scientifique, à l'**application du principe de précaution**. C'est le cas notamment lorsque le risque de survenue d'un danger peut être évalué comme suffisamment élevé à l'échelle d'une population, et que le danger est potentiellement grave, irréversible et coûteux pour la société. Dans les cas où il sera décidé d'appliquer ce principe, cette décision sera toujours accompagnée d'un programme de recherches pour faire avancer la connaissance et éventuellement modifier la décision.



Gorges de Brunna, région de Kirkjubæjarklaustur, Islande.  
Pour sa santé, comme pour l'équilibre de l'ensemble de son être, l'homme dépend de son environnement naturel, non seulement végétal et animal, mais aussi minéral. Les plus beaux paysages, les grands sites, les parcs naturels sont tous des espaces géologiques remarquables.  
*The Brunna Canyon in Iceland's Kirkjubæjarklauster region.  
For his health, and indeed for his whole being's equilibrium, man is dependent on his natural environment, plant and animal, but also mineral. The most beautiful landscapes, sites of exceptional grandeur, and nature reserves are all remarkable geological expanses.*

© Gérard Defay



L'homme de pierre. *The stone man.*  
© David Brimm

# chiffres clés

## Thermalisme

- **550 000 curistes** en France par an, dans plus de **100 stations thermales**.
- **10 000 000 journées de soins** par an.
- **1 200 sources d'eaux bienfaisantes** reconnues par l'Académie de médecine.

(source : CNETH)

## Consommation d'eau en bouteille, en moyenne, par an et par personne :

- **15 l** dans le monde
- **107 l** en Europe

En augmentation de **12 %** par an.

(<http://www.wateryear2003.org/fr>)

## En France, l'eau potable

provient à **60 %** des **eaux souterraines** et à **40 %** des **eaux de surface** (rivières, lacs, fleuves).

(source : C.I.EAU)

## Fluor dans les eaux de boisson

- **1 mg/l** pour prévenir les caries.
- **> 1,5 mg/l** = effets négatifs sur l'organisme.

(source : C.I.EAU)

## Plomb et saturnisme

En France, **2 % des enfants de 0 à 6 ans** auraient une plombémie anormale (**> 100 µg/l** de sang), dont 10 000 nécessitant une intervention urgente (plombémie **> 250 µg/l** de sang).

(source : INSERM)

## Dose moyenne d'exposition par an et par personne à la radioactivité :

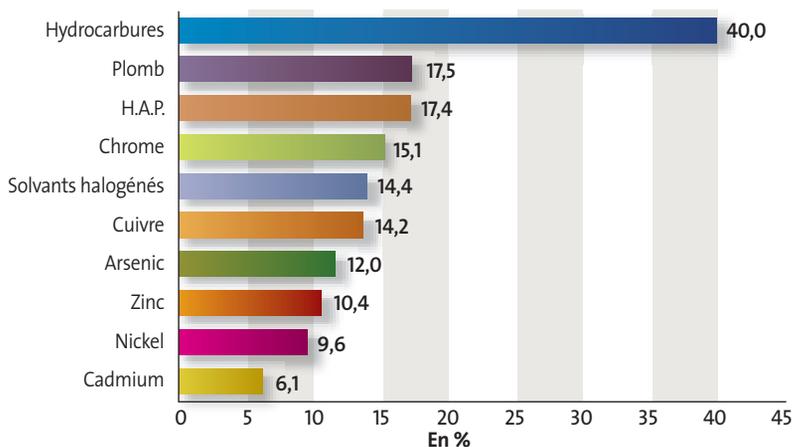
- **naturelle** (radon, rayonnements cosmiques et telluriques...) : **2,4 millisieverts<sup>(1)</sup>**.
- **artificielle** (radiographies médicales et dentaires) : **1 millisievert**.

(source : CEA)

(1) Sievert (Sv) : unité de mesure d'équivalent de dose de rayonnement ionisant.

## Fréquence d'identification des différents polluants

rencontrés en France sur les **sites pollués** (recensés dans la base de données Basol, juin 2006).



## Amiante

En France, **60 000 à 100 000** décès liés à l'exposition à l'**amiante** dans les vingt-cinq prochaines années.

(source : OIT)

# brèves

## La Réunion

### Étude des intrusions salines en zone côtière

Le BRGM réalise un état des lieux, à la demande du département de La Réunion et de la DIREN. Un premier bilan montre que toutes les communes de la côte ouest sont affectées par ce phénomène et que plus d'une dizaine de forages d'eau sont concernés. Pour éviter l'aggravation du processus, le BRGM va édicter des règles d'exploitation des aquifères et des indicateurs de suivi de la qualité vont être mis en place.

## Pollution au mercure

### Études d'impact sanitaire et environnemental

Le BRGM a été mandaté par l'ONUDI (Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel) pour réaliser des études environnementales et épidémiologiques au Soudan, au Zimbabwe et au Laos afin d'évaluer les conséquences de l'utilisation du mercure lors des opérations de récupération de l'or sur les sites d'orpaillage. Ces études ont mis en évidence l'étendue des pollutions et les niveaux de contamination des populations locales. Elles ont débouché sur un ensemble de recommandations visant à limiter (voire à supprimer) l'utilisation du mercure.



## FOOTPRINT

### Élaborer des outils d'évaluation et de gestion du risque de pollution des eaux par les pesticides

Le BRGM coordonne ce programme européen de recherche aux côtés de quatorze partenaires représentant neuf pays. Les objectifs : identifier les sources de pollution, estimer les

concentrations de polluants vers les ressources en eau et proposer des solutions correctrices.



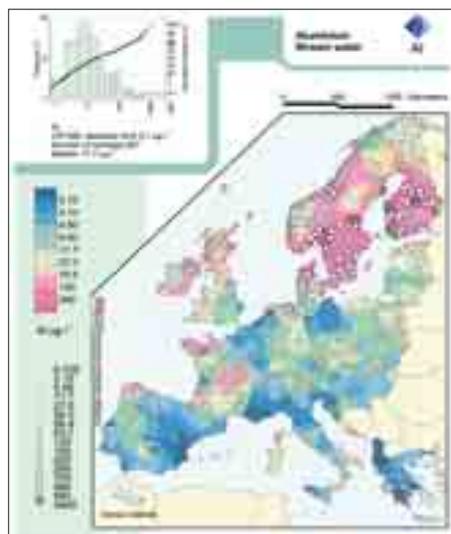
<http://www.eu-footprint.org/home.html>

## Cartographie

### Atlas géochimique européen

Il s'agit du premier atlas européen présentant la cartographie de la distribution de soixante-cinq éléments chimiques dans les sols et les eaux de surface. Il a été essentiellement conçu et développé par les services géologiques européens membres d'EuroGeoSurveys dans le cadre d'une initiative volontaire visant à démontrer l'importance de la connaissance du sous-sol en appui aux politiques de développement durable, notamment dans les domaines de la santé publique et de l'agriculture. L'atlas, ses articles expliquant la méthodologie et commentant les résultats, ainsi que les données associées sont accessibles gratuitement par internet :

<http://www.gsf.fi/publ/foregsatlas/index.php>



## À nos lecteurs...

### Deux récompenses pour *Géosciences* !



Le prix UJEF du « Média externe » 2006 décerné à la revue « pour son vrai contenu éditorial. Destiné aux publics externes du BRGM, *Géosciences* est un véritable magazine scientifique grand public, quasiment digne d'être en kiosque.

Le jury a voulu saluer le fond tout autant que la forme. Les explications sont scientifiques mais accessibles, avec une exploitation efficace de l'infographie. »

### Le TOP COM d'argent Corporate Business 2007 dans la catégorie « Journal externe ».



### Appel à contributions

Les prochains numéros de *Géosciences* seront consacrés à :

- « Terre virtuelle : les systèmes d'information géoscientifiques » (septembre 2007),
- « Redécouvrir la Terre » (février 2008, numéro publié dans le cadre de l'année internationale de la planète Terre).

Si vous souhaitez proposer un sujet d'article ou un thème à aborder, n'hésitez pas à nous écrire !

### Faites connaître la revue à vos contacts et amis

Chaque numéro est en vente au prix unitaire de 8 € (hors frais de port). À commander sur notre site [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr), ou en écrivant à : BRGM Éditions, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2 (France). La version électronique est téléchargeable gratuitement : <http://www.brgm.fr/publication.jsp>

A partir de

**3,10%**

TEG annuel fixe  
jusqu'à 20 000 €

# Prêt **ECONOMIES** **ENERGIES**

pour investir dans les énergies renouvelables

- Avec le prêt Economie d'Energies du Crédit Mutuel Enseignant, faites un geste pour l'environnement et financez un équipement dédié aux énergies renouvelables.
- Vous allégez votre facture énergétique tout en contribuant à préserver votre environnement.
- De plus, vous pouvez profiter, pour certaines dépenses au titre de votre habitation principale, d'un crédit d'impôt et des subventions de certains organismes ou administrations.

Par exemple, pour l'achat d'un chauffe-eau solaire individuel d'une valeur de 6 000 euros, vous empruntez sur 4 ans au TEG annuel fixe de 3,10 % et remboursez en 48 mensualités de 132,97 euros<sup>(1)</sup>. De plus, si vous bénéficiez d'un crédit d'impôt de 2 500 euros (50 % du montant hors main-d'œuvre) sur l'achat de votre équipement, votre chauffe-eau solaire ne vous revient qu'à 3 882,30 euros<sup>(2)</sup>.

**Crédit  Mutuel**

**Enseignant**

[www.cme.creditmutuel.fr](http://www.cme.creditmutuel.fr)

**► N° Indigo 0 825 33 30 30**



prochain numéro ► septembre 2007

# Terre virtuelle : les systèmes d'information géoscientifiques



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

## Siège

Tour Mirabeau 39-43 quai André Citroën  
75739 Paris Cedex 15 - France  
Tél. : (33) 1 40 58 89 00 - Fax : (33) 1 40 58 89 33

## Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin - BP 36009  
45060 Orléans Cedex 2 - France  
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

