



L'eau et
les risques
de glissements
de terrain
PAGE 72



The European response
to the challenges of
water and sanitation in
developing countries
PAGE 86



INTERVIEW
Ghislain de Marsily
Résoudre les
problèmes de l'eau
au 21^{ème} siècle
PAGE 14

LA REVUE DU BRGM POUR UNE TERRE DURABLE
The review of BRGM for a sustainable Earth

géo**sciences**

N° 2 ► SEPTEMBRE 2005

L'eau souterraine



Environnement - Eau - Infrastructures

Siège social : 3, avenue Claude Gullemin - B.P. 6119 - 45061 ORLEANS CEDEX 2 - France
Tél. 02.38.64.30.60 - Fax: 02.38.64.32.34 - e-mail : info@antea-ingenierie.fr

www.antea-ingenierie.fr

- 03 ▼ **Edito** - Pascal Berteaud - *Directeur de l'Eau*
(Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable)
- 04 ▼ **Introduction** - Jean Margat - *Conseiller du BRGM*
- 06 ▼ **Les mesures concrètes pour la mise en oeuvre de la Directive Cadre européenne sur l'Eau : quels chantiers d'ici 2015 ?**
- 14 ▼ **Interview : Résoudre les problèmes de l'eau au 21^{ème} siècle**
Quelles recherches et actions conduire ?
- 26 ▼ **Ressources en eau du karst :**
un enjeu pour le bassin méditerranéen
- 32 ▼ **Aquifères de socle : nouveaux concepts**
Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau
- 38 ▼ **Gestion des sites et sols pollués**
Risques pour les eaux souterraines
- 44 ▼ **Sustainable water resource management and international cooperation:**
the example of Russia, Estonia and other countries
- 54 ▼ **L'eau, facteur de libération de l'arsenic naturel**
- 60 ▼ **Contamination des eaux souterraines**
par les produits phytosanitaires
Mécanismes impliqués et concentrations observées
- 66 ▼ **La gestion de l'eau des mines** en phase post-extractive
- 72 ▼ **L'eau et les risques de glissements de terrain**
- 80 ▼ **La contribution des eaux souterraines aux inondations.** Modélisation des hautes eaux de la Somme
- 86 ▼ **Tribune** - Antonio Garcia Fragio - *European Commission*
- 90 ▼ **Tribune** - Jean-Luc Redaud - *Administrateur Association 4D*
- 93 ▼ **Chiffres clés**
- 94 ▼ **Les brèves du BRGM**

géosciences Septembre 2005 • numéro 2

Direction de la Communication et des Editions du BRGM - 3 av. Cl. Guillemain - 45060 Orléans Cedex 2 - Tél. : 02 38 64 37 84 - communication@brgm.fr
Directeur de la rédaction : Jacques Varet • Responsable du numéro "eau souterraine" : Thierry Pointet • Directeur de la publication : Geoffroy Lehideux-Vernimmen • Comité de rédaction : BRGM, Loïc Beroud (Service Public), Christian Fouillac (Recherche), Jean-Claude Guillaneau (International), Dominique Guyonnet (pollution, déchets), Hormoz Modaresi (risques naturels), Pierre Nehlig (géologie, cartographie), Jack Testard (ressources minérales), Michel Villey (actions régionales) - Jean-Marc Lardeaux (professeur université de Nice), Michel Vauclin (CNRS) • Secrétariat de rédaction : Elisabeth Collet, Dominique Verhelst • Révision : Olivier Legendre • Responsable de fabrication : Pierre Vassal • Maquette et réalisation : EFIL Communication 02 47 47 03 20 • Impression : Imprimerie Nouvelle - St Jean de Braye • Régie pub : Com d'habitude publicité 05 65 11 00 69 - www.comdhabitude.fr - contact@comdhabitude.fr • ISSN : 1772-094x • ISBN : 2-7159-0957-5 • Dépôt légal à parution.

Toute reproduction de ce document, 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 communication@brgm.fr.

En couverture : La source du Lison dans le Doubs.
The Lison spring, Doubs.

©BRGM im@gé - F. Michel

Eaux vives. Les gorges du Cians dans l'arrière-pays niçois (Alpes-Maritimes).
White water. The canyons of the Cians River above Nice (Alpes-Maritimes).

©BRGM im@gé - J.Y. Koch-Mathian





Les eaux souterraines, un patrimoine essentiel

Les eaux souterraines ont une place essentielle dans le cycle de l'eau. Elles jouent un rôle majeur pour l'homme et les milieux. Elles contribuent à l'alimentation des sources et des cours d'eau, et plus particulièrement pendant l'été.

L'homme est de plus en plus demandeur d'une eau propre, d'une eau de boisson saine, mais aussi d'eau de surface et souterraines de bonnes qualités. Ces eaux font partie de son patrimoine et doivent être préservées. L'importance économique et environnementale des eaux souterraines fait de leur préservation un facteur de développement durable.

Les eaux souterraines forment un milieu encore mal connu, mais unique. A la frontière entre sous-sol et surface, les sources ont de tout temps exercé un vif attrait sur l'esprit humain. Les eaux souterraines peuvent séjourner très longtemps dans le sous-sol, de sorte que l'impact d'une pollution chimique ou d'une surexploitation peut d'une part mettre beaucoup de temps à se manifester, mais peut également être légué aux générations futures.

La surexploitation et la pollution des eaux souterraines engendrent souvent des déséquilibres écologiques pratiquement irréversibles.

En France, les deux tiers des prélèvements en eau potable ont pour origine les eaux souterraines. Pour assurer l'alimentation en eau potable, il est aujourd'hui de plus en plus nécessaire de prendre des mesures compensatoires de traitement et de protection qui exigent, tant sur le plan technique que financier, des moyens considérables et croissants.

Pour gérer les eaux souterraines de manière prévoyante et durable, il faut en améliorer leur suivi et leur connaissance afin de connaître les processus déterminant leur qualité et leur régime. Il faut aussi disposer des instruments adéquats, tant au niveau juridique, technique et économique qu'au niveau de l'aménagement du territoire.

La mise en œuvre des objectifs de bon état fixés par la directive cadre sur l'eau publiée en décembre 2000, doit permettre de répondre à cette préoccupation par l'établissement de plans de gestion de la ressource en eau visant à l'horizon 2015 :

- > à une protection cohérente de toutes les eaux en France mais aussi en Europe, aussi bien pour les eaux de surface que pour les eaux souterraines ;
- > au bon état tant qualitatif que quantitatif pour les eaux souterraines.

Elle demande non seulement d'atteindre le bon état des eaux souterraines en 2015 mais aussi de détecter et d'inverser toute tendance à la hausse, significative et durable de la concentration des polluants.

Sa mise en œuvre doit nous permettre de nous donner les moyens collectivement d'une politique volontariste pour améliorer la connaissance, regrouper l'information disponible aujourd'hui trop dispersée, lutter efficacement contre les pollutions ponctuelles et diffuses, développer la planification de la gestion de l'eau sur les nappes les plus fragiles ou encore réorienter des prélèvements non prioritaires vers d'autres ressources pour les nappes surexploitées.



Pascal Berteaud

DIRECTEUR DE L'ÉAU
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE ET
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



Jean Margat

ANCIEN CHEF DU DÉPARTEMENT HYDROGÉOLOGIE, JEAN MARGAT EST AUJOURD'HUI CONSEILLER DU BRGM. IL EST ÉGALEMENT VICE-PRÉSIDENT DU PLAN BLEU POUR LE DÉVELOPPEMENT ET L'ENVIRONNEMENT EN MÉDITERRANÉE, VICE-PRÉSIDENT DE L'INSTITUT MÉDITERRANÉEN DE L'EAU, ET PRÉSIDENT D'HONNEUR DU COMITÉ FRANÇAIS DE L'AIH (ASSOCIATION INTERNATIONALE DES HYDROGÉOLOGUES). CONSULTANT AUPRÈS DE DIVERSES ORGANISATIONS INTERNATIONALES COMME LES NATIONS UNIES, LE FAO ET L'UNESCO
j.margat@brgm.fr

L'eau souterraine

“La recherche minérale la plus importante de la France métropolitaine : l'eau”. Cette vision plus prophétique que provocatrice de Pierre Laffitte et Jean Ricour ⁽¹⁾, en 1955, pourrait aujourd'hui s'appliquer à une grande partie du monde.

L'eau souterraine est une composante invisible du cycle de l'eau. De ce fait, ses fonctions géodynamiques, géotechniques et géochimiques et sa place dans les ressources naturelles ont été longtemps méconnues. Elle est pourtant largement utilisée : c'est en France, comme dans beaucoup de pays, la première source d'approvisionnement en eau potable (50 % pour le monde entier), une source majeure pour l'irrigation (primordiale en zone aride) et pour usages industriels. L'eau souterraine est par excellence une ressource de proximité et de meilleure qualité naturelle. Lorsqu'elle est minérale ou thermale, elle est aussi la matière première d'une activité de service à la croisée de la thérapeutique et du tourisme, dont l'importance socio-économique est indéniable. Elle a aussi permis l'essor de la géothermie.

L'eau forme ainsi sans conteste et de beaucoup le plus gros tonnage de matière minérale extraite du sous-sol dans le monde (ordre global de 700 milliards de tonnes annuellement à présent) et dans la plupart des pays : en France, 6 milliards de tonnes. Longtemps vouée surtout à l'art d'implanter les forages et les captages et à la prospection des productivités locales, la science des eaux souterraines a beaucoup progressé. L'hydrogéologie moderne, par l'analyse et la com-

préhension des comportements et des sensibilités extrêmement variés des systèmes aquifères et des rôles mécaniques et géochimiques des eaux souterraines, a permis de préciser et de guider non plus seulement leur exploitation mais aussi leur gestion et leur protection.

L'hydrogéologie dont le champ s'est ainsi considérablement élargi est de ce fait l'une des composantes majeures des "géosciences", maîtrisant toutes leurs méthodes et tous leurs modes d'expression.

Les deux fonctions essentielles des aquifères, qui régularisent les ressources en eau renouvelables - y compris superficielles - et dont l'exploitation minière possible et avantageuse dans certains cas offre des ressources non renouvelables à gérer comme des réserves minérales, sont aujourd'hui mieux comprises et utilisées à bon escient.

Les eaux souterraines ne constituent pas seulement des ressources : elles entravent aussi les occupations du sous-sol et les exploitations minières, en créant des nécessités d'exhaures auxquelles les mineurs ont dû faire face de tout temps. Elles peuvent aussi contribuer, lorsqu'elles débordent, à des inondations locales, comme c'est arrivé en France dans le bassin de la Somme, en 2001.

⁽¹⁾ Communication au congrès du centenaire de la Société de l'Industrie Minérale, Paris, 1955.

On ignore trop souvent que les eaux souterraines des aquifères libres sont étroitement liées aux cours d'eau dont elles assurent pour l'essentiel la permanence des écoulements et des débits de "basses eaux", donc la pérennité des écosystèmes aquatiques associés.

Gérer les eaux souterraines vise tous ces objectifs :

- ▶ de production, pour satisfaire les demandes en eau et assurer la sécurité des approvisionnements,

- ▶ de faisabilité d'occupation du sol et du sous-sol,
- ▶ de préservation de leurs qualités et de conservation des écosystèmes subordonnés.

Cela implique une parfaite liaison entre connaissance et action, une communication efficace entre chercheurs, ingénieurs et tous les acteurs impliqués : exploitants, usagers de l'eau, occupants du sol, pouvoirs publics et vigiles de l'environnement.

Ce numéro 2 de la revue Géosciences fournit quelques illustrations actuelles de ces considérations générales. ■



Plongeur spéléo au sortir de la vasque de la source de Fontestramar après avoir effectué des prélèvements pour analyses de traceurs fluorescents, dans le massif des Corbières, dans les Pyrénées-Orientales.
Cave diver coming out of the pool created by the Fontestramar spring after having collected samples for fluorescent tracer analyses, in the Corbières range (Pyrénées-Orientales).

©BRGM im@gé - N. Courtois

▶ LE RÔLE DU BRGM

Durant toute la seconde moitié du XX^{ème} siècle, riche des expériences conjuguées de nombreux hydrogéologues œuvrant en France, dans le cadre d'une forte implantation régionale, comme outre-mer en zones arides et tropicales, et en coopération avec les principaux centres universitaires, le BRGM a joué un rôle majeur dans le développement de l'hydrogéologie française et dans le positionnement des eaux souterraines dans la politique de l'eau.

Les expériences outre-mer, dans des contextes plus rudes qu'en climat tempéré, ont porté en avant l'importance des eaux souterraines et l'art d'en évaluer les ressources. De descriptive l'hydrogéologie est devenue

analytique et prédictive : comprendre les échanges, synthétiser et prévoir les modes d'écoulement à l'aide de modèles.

Des méthodes indirectes visant les propriétés électrique, électro-magnétique, nucléaire de cette eau -ou des roches qui la contiennent-, des fluides associés comme le radon, cherchant à comprendre la géochimie des éléments dissous, etc., sont venues compléter les méthodes directes de prospection.

Les performances des forages au marteau fond de trou ont fait décoller un volet ignoré voire paradoxal : il y a aussi de l'eau dans les granites -et dans les roches dures en général-. La géologie structurale et l'analyse

morphologique se sont ajoutées aux méthodes d'investigation. L'Afrique, puis l'Inde, les DOM, ont à leur tour cherché de l'eau dans les roches de socle et les roches volcaniques.

En France, les lois sur l'eau de 1964 et de 1992, puis la DCE, ont souligné que la qualité des eaux souterraines n'est ni gratuite ni immédiate : des actions réglementaires (parfois lentes) avec des objectifs de moyens, puis une impulsion européenne, plus vigoureuse puisqu'elle porte en elle des objectifs de résultats, tentent de faire acquiescer des comportements plus vertueux pour protéger cette eau qui ne se voit pas, mais dont on reconnaît de plus en plus l'importance.

La Directive Cadre européenne sur l'Eau qui impose un "bon état des eaux" à l'horizon 2015 nécessite une mobilisation de tous les acteurs. Après la première phase d'études préliminaires, notamment sur le découpage du territoire français en huit districts et 503 masses d'eau, le calendrier de la DCE conduit vers un plan de charge à mettre en œuvre. La force d'inertie des milieux souterrains oblige à engager rapidement des actions concrètes si l'on veut espérer des résultats tangibles d'ici 10 ans.

Bassins de décantation secondaires, dans une station d'épuration, à Valentigney, en Essonne.
Secondary settling ponds in a water treatment plant, Valentigney (Essonne).

©BRGM im@gé - F. Michel

Les mesures concrètes pour la mise en œuvre de la **Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE)** : quels chantiers d'ici 2015 ?



Thierry Pointet

HYDROGÉOLOGUE
 MISSION DE SERVICE PUBLIC
 SUR LES EAUX SOUTERRAINES
 BRGM - SERVICE EAU
 t.pointet@brgm.fr

La Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) impose un continuum d'actions initié depuis sa publication au JO des Communautés, le 22 décembre 2000. Les actions conduites jusqu'à fin 2004 sont des actions préparatoires alors que celles qui sont maintenant engagées sont concrètes et au cœur de la directive.

La DCE concerne toutes les eaux. Lors de sa préparation, le Parlement Européen a mis un accent sur le renforcement de la dimension "eaux souterraines". Depuis, ce volet a pris de l'importance au point qu'une seconde directive en préparation, dite "Directive fille", leur est consacrée. Si la Directive Cadre, fixe les impératifs généraux et le calendrier de mise en œuvre, la Directive fille sera plus concrète en termes de méthodologie et de définition des critères relatifs à la qualité des eaux et à son évolution.

L'une comme l'autre, ces directives font appel à la notion de "masse d'eau", concept nouveau fondé sur la structure des milieux naturels et sur des critères de gestion. Ce concept introduit une part de subjectivité qui est inhabituelle pour décrire des milieux naturels : à des notions descriptives physiques propres à la nature et au

Fig. 1 : Les huit districts hydrographiques de la DCE : le découpage de la France de 1964 en 6 bassins coïncidant avec les juridictions des Agences de l'eau, a évolué en 8 districts liés aux grands fleuves, en distinguant le Rhin de la Meuse et de l'Escaut initialement réunis dans le bassin "Rhin-Meuse".

Fig. 1: The eight WFD hydrographic districts. In 1964, France was divided into 6 river basins that coincided with the Water Authorities. These were later changed into 8 districts corresponding to the basins of rivers flowing into the sea. The Rhine, Meuse and Escaut rivers, initially combined within the "Rhine-Meuse Basin", were separated into three distinct basins.

© BRGM-lm@gé



Code	District
A	L'Escaut, la Somme et les cours d'eau côtiers de la Manche et de la Mer du Nord
C	Le Rhin
H	La Seine et les cours d'eau côtiers normands
G	La Loire, les cours d'eau côtiers vendéens et bretons
F	L'Adour, la Dordogne, la Garonne, la Charente et les cours d'eau côtiers charentais et aquitains
D	Le Rhône et les cours d'eau côtiers méditerranéens
E	Les cours d'eau côtiers de la Corse
B1	La Meuse (et la Sambre)
B2	La Sambre (et la Meuse)

comportement hydrologique des milieux souterrains, la DCE ajoute une notion d'objectifs de gestion qui se réfère aux usages de la ressource et aux pressions anthropiques. L'objectif attendu est que chaque masse d'eau soit une unité d'évaluation, de surveillance et qu'elle soit, le cas échéant, assortie d'objectifs d'action ou de gestion. Cette part interprétative a pris corps et transparait déjà dans les développements méthodologiques qui ont été conduits depuis 2000 en France et dans d'autres Etats membres. Certains exercices nationaux donnent un poids important à la notion d'unité de fonctionnement, alors que d'autres s'ouvrent complètement à la dimension relative à la gestion. Cet aspect n'est pas sans un certain pragmatisme, qui permet d'adapter les découpages nationaux des masses d'eau aux divers critères de gestion déjà en place dans les Etats membres.

En France, la réalisation d'un catalogue des systèmes aquifères (baptisé BD RHF : base de données "référentiel hydrogéologique de la France") a abordé et traité la dimension physiographique. Cette démarche a apporté un gain de temps mais a aussi imposé sa marque au découpage en masses d'eau, en privilégiant plus que dans certains autres Etats membres, la dimension physique. C'est précisément une des souplesses qu'accorde la DCE.

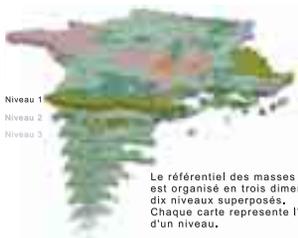
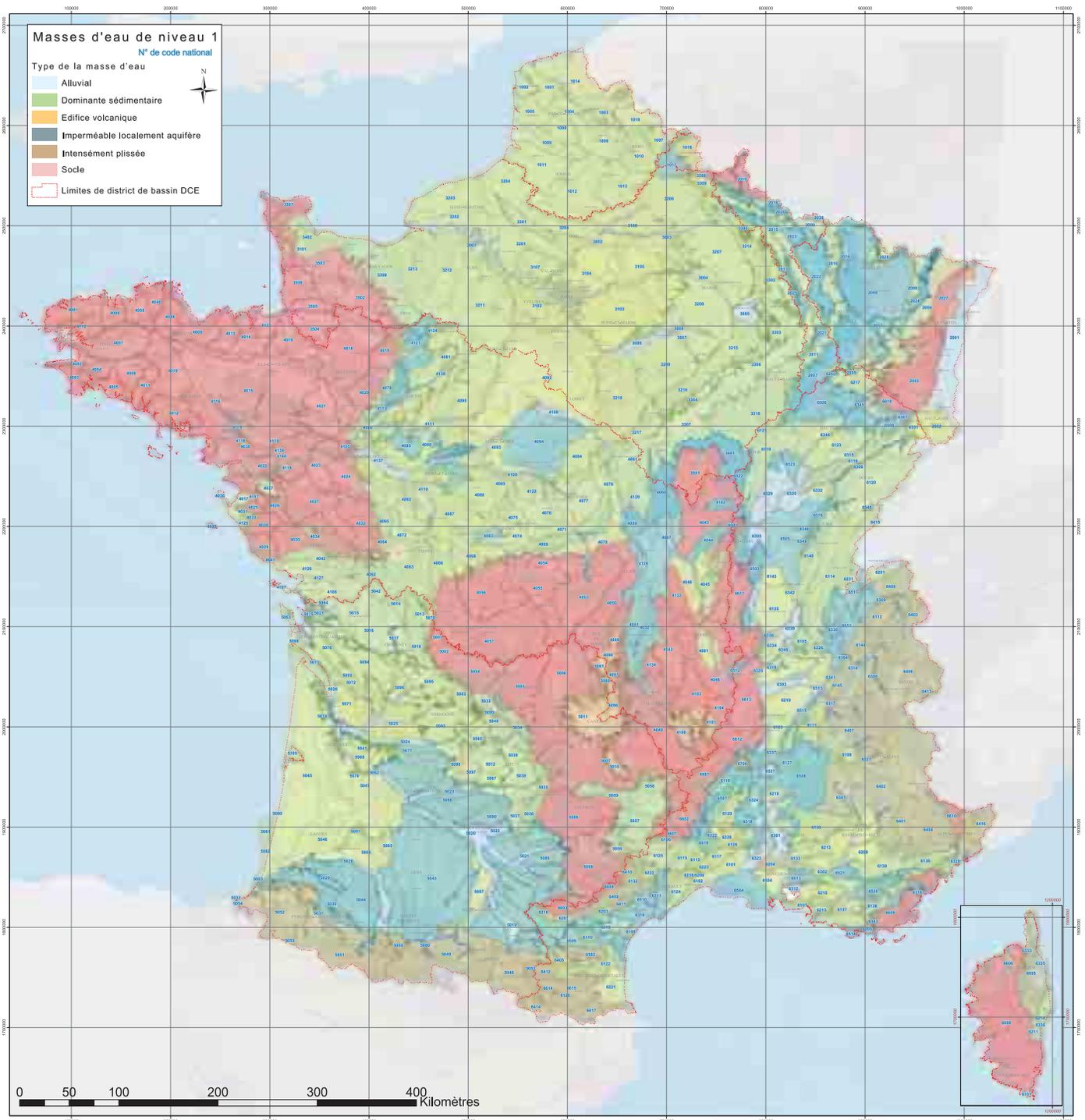
Les six bassins traditionnels ont été ventilés en 8 districts hydrographiques (fig. 1) qui suivent une logique de bassins physiographiques. Le bassin Rhin Meuse se trouve divisé en deux districts, désignés C, B1 et B2 selon la figure 1. Depuis décembre 2004, le découpage en masses d'eau souterraines est terminé (fig. 2). Les critères de délimitation ont été précisés par une méthode créée en même temps qu'était engagé l'exercice de découpage proprement dit. L'engagement rapide de l'exercice a permis une interaction régulière et constante ainsi qu'un enrichissement au fur

et à mesure que le découpage avançait. Deux documents ont été publiés :

- 1 > le guide méthodologique d'identification et de délimitation des masses d'eau définissant les règles de base pour le découpage de tout le territoire national,
- 2 > les consignes et règles de remplissage de fiches de caractérisation initiale, mais assez sommaires, de chaque masse d'eau, c'est-à-dire les fiches d'identité des masses d'eau. Elles sont accompagnées de consignes et de règles de représentation graphique. Le même document propose une clé d'identification simple destinée aux masses d'eau qui risquent de ne pas atteindre ou de ne pas se trouver dans le bon état volumétrique ou qualitatif à l'horizon 2015.

Résultat du découpage

Les 8 districts hydrographiques comprennent 503 masses d'eau. La délimitation des districts hydrographiques étant fondée sur les bassins superficiels, la superposition imparfaite avec les eaux souterraines fait ressortir 28 masses d'eau souterraine dites transdistricts. Pour la même raison, 23 masses d'eau, à l'image de la nappe d'Alsace, sont transfrontalières.



Le référentiel des masses d'eau souterraines est organisé en trois dimensions. Il y a jusqu'à dix niveaux superposés. Chaque carte représente l'extension horizontale d'un niveau.

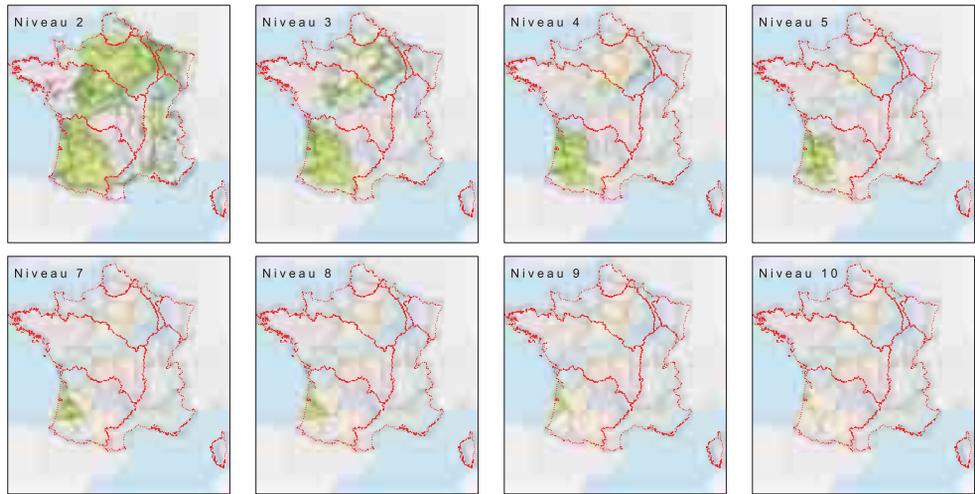


Fig. 2 : Les masses d'eau souterraine définies en France en application de la DCE.
Fig. 2: Groundwater bodies identified in France according to the WFD.
 © BRGM-lm@gé

Sur un total de 503 masses d'eau, la moitié appartient aux provinces sédimentaires et plus des deux tiers correspondent à des nappes libres. Cette distribution, en partie fondée sur des critères de gestion, souligne le fait que le gisement des eaux souterraines le plus volontiers sollicité est peu profond. Un seuil de coupure à la profondeur de 300 mètres a été proposé pour la quasi-totalité des masses d'eau, exception faite des grands aquifères profonds des grands bassins sédimentaires (comme l'Albien du bassin de Paris, dont la totalité du gisement est prise en compte). L'hydrogéologie des ressources économiquement exploitables est une discipline étroitement liée à la surface et aux échanges d'eau avec la surface. Cela a pour conséquence de souligner le critère de vulnérabilité d'une grande partie de la ressource, d'où les précautions nécessaires de veille active pour en conserver la qualité. On constate d'ailleurs depuis 2000, et peut-être avec une certaine logique, un développement des cartes de vulnérabilité aux pollutions, qui sont une des formes d'expression de la préoccupation du bon état qualitatif.

La caractérisation initiale des masses d'eau est destinée à définir l'identité et les caractéristiques élémentaires des aquifères et de l'eau qu'ils contiennent ainsi que les pressions polluantes. C'est à partir de cette étape qu'intervient depuis 2003 un exercice dont la méthode s'appuie sur une grille d'estimation. Il fallait évaluer le risque que certaines masses d'eau n'atteignent pas le bon état -volumétrique mais surtout qualitatif- à l'échéance 2015. Une 3^{ème} étape dite de "caractérisation détaillée des masses d'eau encourant un risque de ne pas atteindre le bon état [...] à l'horizon 2015" est donc mise en œuvre pour ce sous-ensemble. À ce stade, la DCE prévoit que des demandes de dérogation soient déposées et argumentées auprès de la Commission si les conditions physiographiques, les pressions polluantes et la situation économique des régions, s'avèrent incompatibles, arguments à l'appui, avec un bon état de certaines masses d'eau en 2015.

Des mesures concrètes

Des actions coordonnées existent déjà. Les contrats territoriaux qui établissent une programmation conjointe de certains conseils généraux et des Agences de l'eau en matière "d'alimentation en eau potable, assainissement et milieux aquatiques" en sont un exemple. Sur le plan quantitatif, un zonage des aquifères a été entrepris au titre de la police de

► APPLICATION DE LA DCE EN FRANCE - QUELQUES CHIFFRES :

- **133 masses d'eau** ont une superficie comprise entre **200 à 300 km²** soit plus du quart de l'effectif total.
- **18 % des masses d'eau** ont une superficie comprise entre **500 et 1000 km²**.
- **28 masses d'eau** souterraines sont transdistricts et **23** transfrontalières.
- La plus forte densité de répartition se trouve dans le bassin rhodanien et sur les zones côtières avec **36 % du nombre total des masses d'eau**.
- **87 % des masses d'eau** sont libres et **13 % captives**.

l'eau pour opérer une sélectivité des aides financières et réduire l'importance des prélèvements : il s'agit des "nappes intensément exploitées" (NIE) et des "nappes réservées en priorité pour l'alimentation en eau potable" (NAEP).

Sur le plan qualitatif, des mesures concernent les effets des dispositifs d'assainissement sur les milieux naturels et sur la maîtrise des pollutions industrielles. Mais les pollutions diffuses d'origine agricole suscitent les réflexions actuelles en raison du caractère presque insaisissable des charges polluantes. Des premières actions fondées sur le bénévolat comme les Programmes de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA) ont donné des résultats encourageants. Les contrats de bassins versants inscriptibles dans les SAGE représentent un stade supérieur dans l'intégration à l'échelle du bassin. Ils constituent des opérations coordonnées qui intègrent l'ensemble des perturbations et associent l'ensemble des acteurs sur une unité hydrographique cohérente, bassin versant ou nappe.

Concernant les milieux naturels, le VII^{ème} programme des Agences a instauré des contrats de restauration et d'entretien qui ont trait au bon état écologique des

“ Il fallait évaluer le risque que certaines masses d'eau n'atteignent pas le bon état - volumétrique mais surtout qualitatif - à l'échéance 2015. ”

milieux aquatiques, zones humides en particulier, le plus souvent liés aux nappes. Leur nombre est croissant. Ces initiatives ont une origine antérieure à la date de publication de la Directive Cadre. Leur mutation en actions qui devront converger vers des objectifs d'ensemble est en cours.

De la connaissance à l'action

La DCE est paradoxalement moins explicite sur ce qui peut être considéré comme le cœur de ce grand projet sans lequel les objectifs exprimés ont peu de chance d'être atteints : *les mesures*. Elles sont concrètement les actions vertueuses sous-tendues par les objectifs généraux. Ces *mesures* devront être incluses dans des *programmes de mesures*, eux-mêmes intégrés dans des *plans de gestion par districts hydrographiques* publiables avant décembre 2009. Les premiers effets des mesures devront être constatés avant décembre 2015.

Un effort devra être fourni pour préparer, expliciter, faire admettre et engager des mesures de terrain selon un calendrier qui doit être compté non pas à partir d'une date de départ mais d'une date butoir, l'année 2015. Certains milieux souterrains ont des temps de réaction considérables qui vont imposer d'engager très précocement des mesures de protection ou de réhabilitation pour que des résultats significatifs soient atteints en 2015.

La gestion par bassins, qui est une notion moderne de la DCE, était inscrite dans la loi sur l'eau française dès 1964. Les Agences de l'eau ont apporté une déclinaison très positive de cette gestion par bassins, ce qui donne à la France une avance qu'il est vital de conserver. Au côté des Agences de l'eau, les services du Ministère

Certains milieux souterrains ont des temps de réaction considérables qui vont imposer d'engager très précocement des mesures.

de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD), les Etablissements Publics Territoriaux de Bassin, les Commissions Locales de l'Eau et les Services Géologiques Régionaux du BRGM ont des objectifs explicites. La pratique s'installe -enfin- de raisonner en suivant les limites naturelles des bassins plutôt que des limites administratives que la nature ignore.

On peut anticiper sur les temps forts à venir jusqu'en 2010 :

- ▶ La mise en place entre 2003-2006 d'un réseau national de suivi performant qui sera ensuite exploité régulièrement. Il suscite depuis 2003 un investissement important.
- ▶ La *préparation des plans de gestion* et des *programmes de mesures* entre 2005 et 2009. Après la publication des caractéristiques des districts, un très important effort vient d'être consacré à l'analyse des situations de départ, les états des lieux, qui conduisent à des solutions alternatives. L'optimum passe par un ensemble de décisions « ni trop, ni trop peu » : trop de qualité coûte inutilement cher, trop peu ne permet pas d'atteindre les objectifs. Un effort devrait porter sur les modélisations couplées hydrodynamique,

Zone humide dans un vallon du Jura correspondant à une nappe sub-affleurante : les nappes peu profondes sont vulnérables aux pollutions venant de la surface.

Wet zone in a shallow valley of the Jura Mountains corresponding to a subsurface aquifer: shallow aquifers are subject to contamination from the surface.

©BRGM im@gé - F. Michel

Un effort devrait porter sur les modélisations couplées hydrodynamique, hydrochimie et alternatives économiques.



► LES AXES DE PROGRÈS IMMÉDIATS

Réduire le nombre de centres de décision et d'action à travers le Système d'Information sur l'Eau. Ainsi, les réseaux piézométriques patrimoniaux ont été recentrés sur le BRGM et les DIREN, alors que les Agences de l'eau gèrent les réseaux qualité autres que sanitaires. Cet axe est déjà engagé.

Recenser les modèles existants correspondant à des critères de gestion de grands ensembles aquifères, en vue de disposer d'outils de gestion (évaluation, expertise, prospective, suivi). Nombre de modèles réalisés par les organismes de recherche et

des bureaux d'études pour le compte de services administratifs, ainsi que par des universités, sont insuffisamment valorisés et représentent un investissement intellectuel dormant. La DCE imposera, au titre de la caractérisation détaillée, la comptabilisation des transits de l'eau depuis la surface jusqu'à la rivière, via les nappes, que seuls les modèles permettent de cerner. La réponse se trouve dans la création d'outils nouveaux ou dans la valorisation d'outils existants. Deux difficultés à surmonter : le droit d'accès et la compatibilité de ces modèles disparates qui

pourraient être repris dans un système unifié de valorisation.

Systématiser le recours aux standards du SANDRE (Secrétariat d'Administration Nationale des Données Relatives à l'Eau) tout en simplifiant certaines procédures de chargement des données pour rendre plus largement accessibles et interchangeable les données acquises sur financements publics (en cours au titre du SIE), faciliter l'interopérabilité entre bases de données (inscrit dans les objectifs du SIE).

hydrochimie et alternatives économiques. La préparation méthodologique doit être renforcée dès que possible.

► L'effort de *communication* 2005-2009 qui vient d'être engagé par le MEDD s'appuiera sur les états des lieux en recherchant l'acceptation par la société des mesures qui entreront en application à partir de 2009. Les services déconcentrés de l'Etat peuvent remplir cette mission en s'appuyant avec profit sur des tiers experts qui apporteront une caution scientifique aux mesures proposées.

► La mise en œuvre progressive des *programmes de mesure* à partir de 2005 et le soutien aux mesures actuellement en vigueur, avec à la clé un minimum de dispositions financières incitatives.

► Un effort de *monitoring* dès la publication des états des lieux avec prise en compte des données historiques, tout en intégrant bien l'inertie des systèmes physiques, notamment des nappes, à répondre à des sollicitations nouvelles. L'effort portera sur les données et leur mise en forme pour produire de l'information.

► Corollaire du monitoring : le *retour sur expérience*, que la France a d'ailleurs déjà engagé au titre de la police de l'eau, devra attester de la *bonne application* des mesures édictées. Il s'agit d'une action durable à compter de 2009, avec toutefois une marge de progrès à réaliser pour les régions encore trop passives sur l'exercice de la police de l'eau.

► Un effort de *recherche finalisée* pour adapter les résultats scientifiques récents aux programmes d'action et aux grilles d'évaluation. Les organismes de recherche devraient être sollicités à partir de 2006 et au-delà.

Marges de progrès à caractère politique

Les propositions suivantes ont été abordées au moins une fois lors de discussions récentes, notamment lors de la consultation des organismes entreprise par le MEDD en 2003.

► Reprogrammer les missions de certaines structures intéressées à la gestion des ressources en eau. Chaque mission nouvelle a donné lieu par le passé à la mise en place d'une structure -ou d'une famille de structures- spécifique, en plus des structures existantes. Les missions, qui ont évolué, se recoupent parfois en un faisceau d'interactions génératrices de pertes d'efficacité. Cette reprogrammation positive a été engagée pour les MISE en 2003. Gageons que la multitude actuelle de groupes de réflexion se bornera à s'appuyer sur les structures existantes.

“ La DCE a des objectifs de résultats, et non pas des objectifs de moyens. ”



- Réduire la diversité des lieux de décision en proposant que les choix relatifs à la connaissance soient rapportés à l'échelle du district hydrographique, du bassin ou du sous-bassin, et que d'une façon générale les problèmes soient traités à l'échelle des unités fonctionnelles plutôt qu'à celle des découpages administratifs.
- Stocker et échanger des données et désigner un organisme attributaire par domaine d'intérêt, garant de la continuité des systèmes de monitoring, d'information, donc de décision.
- Développer les études prospectives et les expertises en veillant à ce que les Etablissements Publics de Recherche soient missionnés pour réaliser les études, chacun dans son domaine de compétence.
- Accéder à la connaissance au niveau local et soutenir l'effort que demande l'alimentation suivie des bases

de données telles qu'ADES, poursuivre l'amélioration de l'ergonomie ainsi que la régularité de la validation des données versées dans ADES.

- En termes d'action, considérer le binôme «ressource disponible» et «demande en eau» pour établir des priorités d'action pour protéger les principales zones de captage présentes ou futures, expérimenter rapidement sur un éventail de zones-tests représentatives les mesures concrètes de bonne gestion en s'appuyant sur les SAGE déjà publiés.
- Proposer que la communication prenne un caractère éducatif et que les services de l'Etat en régions accroissent leur action de diffusion régulière d'indicateurs pertinents pour le grand public.

La résurgence de la Fosse Dionne, à Tonnerre, dans l'Yonne.
The Fosse Dionne (Fons Divone) or Divine Spring in Tonnerre (Tonne).

© BRGM im@gé - M. François





FLOMIN™ Réactifs pour mines

SNF, leader mondial dans la production de flocculants, fabrique sous la marque FLOMIN™ toute une gamme de réactifs pour mines. Des agents de flottation : collecteurs, dépresseurs et moussants, ainsi que des coagulants, des dispersants et des flocculants.

Pour en savoir plus, contactez-nous sur info@snf.fr

SNF sas., ZAC de Milieux, 42163 Andrézieux, FRANCE



La Terre et l'Eau

En conclusion

Les premiers impératifs de la DCE ont conduit à engager un travail de structuration des connaissances : on identifie et on caractérise pour pouvoir agir. Ce stade doit réellement être considéré comme une étape préliminaire. La Directive Cadre est un continuum d'actions dont le cœur est constitué d'actions concrètes, de terrain, pour en tirer les dividendes au terme de 2015 et au-delà. Les eaux souterraines ont une telle inertie de réaction qu'il ne faut pas attendre la publication des catalogues de mesures et les plans d'action, prévue en 2009, pour engager dès à présent en nombre des mesures concrètes de réhabilitation. Certes, la France dispose des SDAGE depuis 1996, mais le terme correspondant aux « mesures », c'est-à-dire aux actions de terrain, serait les SAGE dont on sait avec quelle lenteur ils se mettent en place depuis leur lancement par la loi sur l'eau de 1992. Des actions ont déjà été engagées, mais nombre d'entre elles sont sporadiques, fondées sur le bénévolat et trop peu sont concertées en vue de converger vers les objectifs des SDAGE réellement à l'échelle des districts. La délimitation des masses d'eau est un premier cadre pour lancer des mesures en vue de la protection et de la réhabilitation de la qualité de la ressource. ■

“ Les eaux souterraines ont une telle inertie qu'il ne faut pas attendre 2009 pour engager dès à présent des mesures de réhabilitation. ”

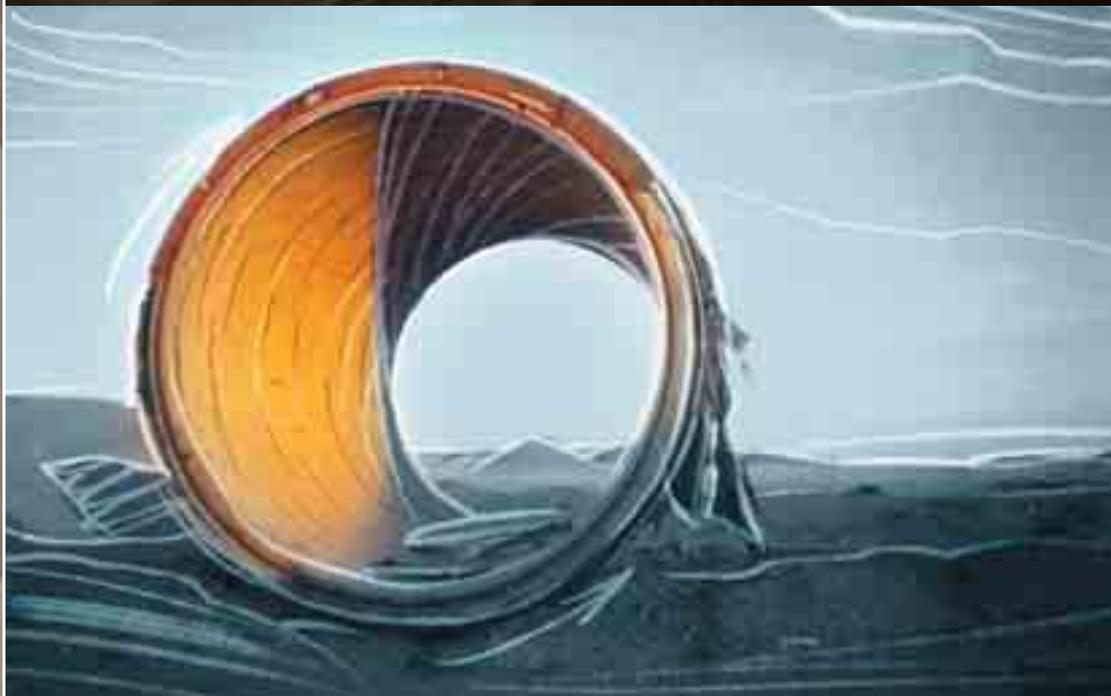


The best model for a single system of water management is management by river basin - the natural geographical and hydrological unit - instead of according to administrative or political boundaries. Initiatives taken forward by the States concerned for the Rhine, Meuse and Escaut river basins have served as positive examples of this approach, with their cooperation and joint objective-setting across Member State borders, or in the case of the Rhine even beyond the EU territory. Although not the case everywhere, several Member States already take a river basin approach; in France, for example, groundwater bodies have been identified according to the WFD. For each river basin district - some of which will traverse national frontiers - a "river basin management plan" will need to be established and updated every six years, and this will provide the context for the co-ordination requirements identified above.

A la question : "Comment résoudre les problèmes de l'eau du 21^e siècle ?", ces spécialistes des questions de l'eau dressent un bilan non complaisant de la situation dans les pays développés et plaident pour une mobilisation internationale en faveur du Sud afin d'éviter des famines qu'ils estiment probables, une raréfaction de la ressource et des conséquences incalculables sur l'environnement et la santé des populations.

Résoudre les problèmes de l'eau au 21^{ème} siècle

Quelles recherches et actions conduire ?



Ghislain de Marsily
 PROFESSEUR À L'UNIVERSITÉ PIERRE
 ET MARIE CURIE, PARIS VI
 MEMBRE DE L'INSTITUT DE FRANCE
 gdm@ccr.jussieu.fr

AVEC DES CONTRIBUTIONS DE

Pierre Ribstein
 PROFESSEUR
 À L'UNIVERSITÉ PARIS VI
 Pierre.Ribstein@ccr.jussieu.fr

**Pierre Hubert et
 Emmanuel Ledoux**
 PROFESSEURS
 À L'ÉCOLE DES MINES DE PARIS
 hubert@cig.ensmp.fr
 ledoux@cig.ensmp.fr

Le problème des ressources et de la qualité de l'eau est-il selon vous un des enjeux majeurs de ce siècle ? Et si oui, comment les scientifiques doivent-ils aborder cette question ?

Plusieurs grandes questions scientifiques viennent immédiatement à l'esprit quand on évoque les "problèmes de l'eau" du 21^{ème} siècle : les habitants de la planète Terre vont-ils manquer d'eau dans un proche futur ? Que faire pour y remédier ? Les changements climatiques annoncés vont-ils induire une modification du cycle de l'eau, et, en particulier, observera-t-on une intensification des phénomènes extrêmes et singulièrement des crues ? La qualité générale des eaux naturelles, des écosystèmes aquatiques, et même des eaux distribuées n'est-elle pas en train de se dégrader de façon inquiétante ?

Ces questions ont en commun d'être pertinentes, de devoir être traitées, et de ne pas être l'expression de craintes, de rumeurs ou d'angoisses irrationnelles auxquelles il serait scientifiquement plus difficile d'apporter des réponses. Elles ont de plus la caractéristique principale de traverser les frontières des disciplines scientifiques classiques, et de

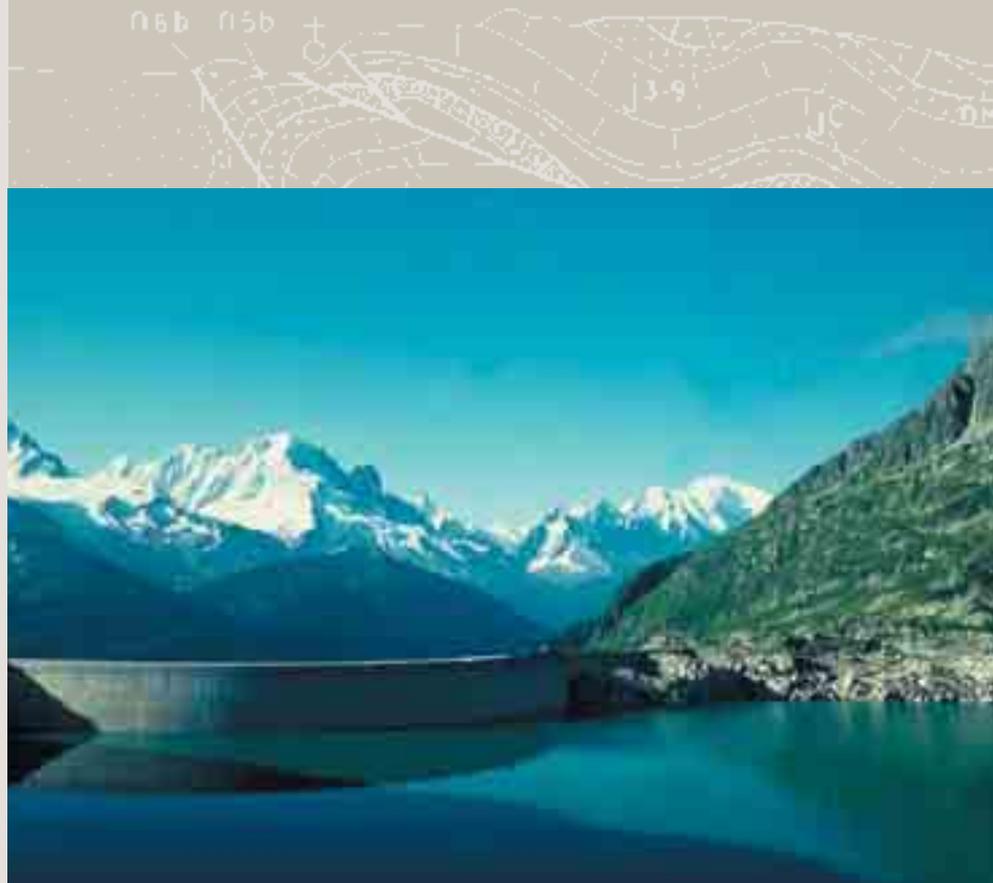


nécessiter un examen en associant étroitement les réflexions des spécialistes des sciences de la Terre et de l'Univers, mais aussi des historiens, des démographes, des économistes, et plus généralement, des spécialistes des sciences humaines (rapport historique, social et spirituel de l'homme et de l'eau), des climatologues, des écologistes, des agronomes, des nutritionnistes, des spécialistes de la santé humaine, des spécialistes des problèmes de l'énergie, du dessalement de l'eau de mer, des urbanistes, des spécialistes de l'analyse des risques, des créateurs de scénarios de notre évolution future, et bien d'autres. Car, pour une fois au moins, il est clair que les "problèmes de l'eau" ne pourront être posés de façon rationnelle, puis examinés de façon scientifique, et enfin éventuellement résolus qu'en abordant de façon conjointe et unitaire l'ensemble de ces facettes.

Les communautés scientifiques françaises et internationales se sont-elle suffisamment mobilisées pour faire émerger cette question sur le devant de la scène ?

Les colloques, les rapports, les articles et les livres sur l'eau abondent ; c'est un sujet de très grande actualité, où tout a été dit et envisagé, mais sans que se dégage encore un consensus et surtout sans que se mette en place un plan d'action concerté et rationnel pour prendre en charge les problèmes de l'eau dans leur ensemble, en y alliant les problèmes de recherche scientifique aux développements technologiques, à l'acceptabilité sociale, puis aux plans d'action de mise en œuvre économique.

Sur le plan international, les problèmes de l'eau sont pour l'essentiel résumés par un travail du Conseil Mondial de l'Eau, basé à Marseille, qui a proposé, à l'issue d'une longue concertation internationale, une "vision mondiale de l'eau" (Cosgrove et Rijsberman, 2000, voir aussi Camdessus et al., 2004), qui dresse un tableau mondial des demandes en eau et tente d'élaborer des schémas de solution. Ce rapport concerne principalement les pays en développement, et ne comporte pas de programme de recherche. L'essentiel du rapport est consacré aux moyens à mettre en œuvre pour résoudre les problèmes d'alimentation en eau potable et d'assainissement des grandes agglomérations mal desservies, avec en filigrane un scénario économique qui confie au secteur privé, et non au secteur public, une grande part de la mise en place des investissements gigantesques nécessaires à la résolution des problèmes d'adduction. Ces besoins en financement sont évalués par la "vision" à 160 000 milliards de dollars US... Ce travail, soutenu par l'UNESCO et la Banque



Le barrage d'Emosson, en Haute-Savoie.
The Emosson dam, Haute-Savoie.

© BRGM im@gé - F. Michel



G. de Marsily.

© BRGM im@gé

Mondiale, est intéressant mais, d'un certain point de vue, trop partiel, trop animé par une vision anglo-saxonne, mercantile, luthérienne des problèmes, sans en envisager toutes les dimensions historiques, sociales, religieuses, techniques. De plus, les grands groupes privés français spécialisés dans la distribution d'eau potable qui se sont lancés dans cette approche d'investissement privé dans ces pays en développement depuis quelques années s'y sont malheureusement le plus souvent heurtés à des problèmes énormes, aux conséquences économiques désastreuses, et marquent pour l'instant un point d'arrêt dans cette voie. De grands forums sur l'eau sont organisés tous les trois ans par le Conseil Mondial de l'Eau (La Haye en 2000, Kyoto en 2003, Mexico en 2006...), au cours desquels de grandes déclarations sont faites, d'innombrables analyses ou solutions sont débattues, des protocoles d'accord sont signés, mais sans conséquence pratique dans les faits.

L'Europe ne devrait-elle pas être le niveau de réflexion et d'action le plus pertinent et le plus opérationnel pour aborder cette question au sein du territoire européen mais aussi dans les pays en développement ?

Sur le plan européen, le moins qu'on puisse dire est que les problèmes de l'eau n'y sont pas abordés de façon cohérente. Une initiative intéressante d'écriture d'un "livre blanc" sur l'eau, lancée à la fin des années 1990 par J.M. Martin, alors directeur de l'Environnement au Centre Commun de Recherche d'Ispra de la CE, à la demande de Mme Edith Cresson, Commissaire

Européen, et qui avait fait travailler des "groupes miroirs" dans chaque pays pour bâtir une vision concertée, s'est soldée par un enterrement. Dans les Programmes Communs de Recherche et Développement, les problèmes de l'eau ne sont que très insuffisamment abordés, très mal financés, et les projets retenus, frappés de gigantisme en réunissant des centaines de participants sur des thèmes plus ciblés sur l'environnement que sur l'eau, mobilisent des moyens administratifs démesurés et tuent dans l'œuf, peut-on dire, l'esprit d'initiative individuelle et l'originalité. Les directives européennes font heureusement avancer les choses sur le plan institutionnel, et en particulier la nouvelle directive cadre sur l'eau (voir par exemple Roche et al., 2005, dans le numéro spécial sur l'eau des Comptes Rendus Geoscience), qui a établi la reconnaissance en droit du bassin versant et fait progresser la recherche sur le "bon état écologique"; il faut néanmoins reconnaître que l'UE n'a pas encore su mettre en cohérence ses diverses directives, en particulier celle sur la politique agricole commune, avec les objectifs de qualité de l'eau. On sait que la directive sur l'industrie chimique REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals), censée s'adresser aux problèmes de la dangerosité des produits, est actuellement en difficulté (d'où l'action médiatique d'une ONG comme par exemple le World Wildlife Fund qui a dosé 70 produits chimiques présents dans l'environnement dans le sang des parlementaires européens, dosage auquel s'est livré M. Lepeltier, alors Ministre de l'écologie et du développement durable, avec des résultats préoccupants...). On sait enfin qu'une directive cadre sur les sols, en préparation, viendra heureusement et utilement compléter la directive sur l'eau, sujets fortement liés.

► L'ACADÉMIE DES SCIENCES MOBILISÉE

Les premiers résultats du programme de réflexion transversale que l'Académie des Sciences a décidé de conduire sur ce sujet vont prochainement voir le jour. Un colloque sur l'eau s'est tenu à Paris, à l'Institut de France, du 15 au 17 septembre 2003 auquel a notamment participé le directeur du service de l'eau du BRGM pour y parler des eaux souterraines. Les comptes rendus de ce colloque, qui sont parus en janvier 2005 dans la série des Geosciences de l'Académie, abordent un

ensemble important de sujets : origine de l'eau sur terre, évolution du climat, devenir des glaciers continentaux, paléohydrologie, prévision des crues, activités humaines et cycle de l'eau, cultures économes en eau, structure et réactivité chimique de la molécule d'eau, eau et santé, l'arsenic dans la vallée du Gange, les eaux minérales, et enfin la directive cadre européenne sur l'eau et la définition du "bon état écologique des masses d'eau". Par ailleurs, un "Rapport Science

et Technologie" sur les eaux continentales, en cours de rédaction, doit paraître au second semestre 2005. Ce rapport a été demandé par le gouvernement pour proposer des orientations aux politiques publiques dans le domaine de l'eau, avec des objectifs à court, moyen et long termes.

Académie des Sciences (2005)
Rapport Science et Technologie
"Les Eaux Continentales",
Groupe de Travail animé par G. de Marsily,
à paraître fin 2005 aux éditions TEC & DOC.



“
Les directives européennes font
heureusement avancer les
choses sur le plan institutionnel,
et en particulier la nouvelle
directive cadre sur l'eau qui a
établi la reconnaissance en droit
du bassin versant et fait
progresser la recherche sur le
“bon état écologique”.”

**Station de jaugeage sur la Traxenne,
affluent de la Lys (Pas-de-Calais, France).**
*Gauging station on the Traxenne, a tributary
of the Lys river (Pas-de-Calais, France).*

Photo P. Hubert

Cette question de l'eau semble mobiliser en France de nombreux chercheurs et organismes scientifiques ...

C'est vrai, on peut noter quelques avancées, avec par exemple un effort important initié par le ministère de l'écologie et du développement durable pour améliorer la prévision et l'annonce des crues, par la mise en place d'un organisme centralisateur au niveau national, le SCHAPI, chargé à la fois de mission de prévision et de coordination, mais aussi du lancement de programmes de recherche. Le Commissariat Général au Plan a publié en 2001 un rapport sur la protection des eaux souterraines. Le BRGM éditera cette année un remarquable atlas des eaux souterraines en France, préparé par l'Association Internationale des Hydrogéologues, avec l'aide de la Direction de l'eau et des Agences de l'eau, qui sera un outil indispensable à la connaissance et la gestion de cette ressource. Le CNRS, par l'intermédiaire de l'Institut National des Sciences de l'Univers, coordonne depuis environ 10 ans un Programme National de Recherche en Hydrologie, auquel le BRGM participe, avec l'INRA, le CEMAGREF, le LCPC, Météo France, l'IRD, etc, qui finance des recherches fondamentales coordonnées dans le domaine de l'eau, mais trop faiblement financées et trop peu ouvertes sur la société civile et ses besoins. L'INRA vient de publier en 2004 un important ouvrage de prospective dans le domaine de l'eau et des milieux aquatiques. Enfin des grands programmes de recherche pluridisciplinaires, souvent initiés par le

CNRS dans le cadre de son programme Environnement, ont été conduits sur de grands bassins français, comme par exemple le Rhône, le Rhin, la Garonne ou la Seine (voir à titre d'exemple Meybeck et al., 1998, pour la Seine). Ces programmes ont abordé les questions de l'eau de façon très pluridisciplinaire, à l'échelle de grands bassins, y incluant les sciences sociales et en associant aux recherches les institutions chargées de la gestion (agences de l'eau, conseils généraux, grandes villes, opérateurs privés, etc). Ils ont orienté leur recherche en fonction des objectifs de ces institutions, apportant ainsi des réponses précises à des questions d'aménagement ou de gestion. Déplorons enfin la suppression, en 1998, du GIP Hydrosystème, qui avait été créé en 1990 pour coordonner la recherche publique française dans le domaine de l'eau, et qui a été rayé d'un trait de plume au niveau ministériel après avoir été l'objet d'un audit dont les conclusions lui étaient pourtant très favorables !

Vous préconisez une approche scientifique interdisciplinaire et notamment des études prospectives sur les évolutions climatiques. En quoi le climat prédétermine-t-il le futur hydrologique de la planète ?

La recherche sur l'évolution du climat nous semble devoir être une priorité absolue. Sans vision correcte de ce que sera l'hydrologie mondiale dans 20, 50 ou 100 ans, il est impossible de bâtir une stratégie globale dans le domaine de l'eau, sachant que les investissements



très lourds des infrastructures hydrauliques sont utilisés et s'amortissent en siècles plutôt qu'en décennies. Dans le cadre du GIEC (Groupe International sur l'Evolution du Climat) auquel la France participe, des travaux importants, faits dans chaque pays, sont analysés et comparés, sur la modélisation de la circulation générale atmosphérique, le bilan du CO₂ et des autres gaz à effet de serre, les couplages avec l'océan, l'effet de la vapeur d'eau atmosphérique, les poussières, etc. Il est important de les poursuivre, de renforcer la modélisation du cycle de l'eau, car les précipitations calculées par ces modèles sont encore très loin de la réalité. Il est très important de mieux étudier les phénomènes extrêmes, tant par les modèles que par les observations. Ceci concerne les épisodes pluvieux exceptionnels comme les sécheresses, sachant qu'il semble certain que l'évolution du climat s'accompagnera d'abord d'un décalage des extrêmes avec les moyennes, en fréquence ou en intensité, c'est-à-dire plus de crues extrêmes là où il pleuvra plus, et plus de sécheresses extrêmes là où il pleuvra moins, puis peut-être d'une augmentation de la variabilité, mais il est indispensable de le préciser. La production des tendances d'évolution climatique est toutefois grevée par la nécessité de construire des scénarios d'émission des gaz à effet de serre, donc de prendre à bras le corps les problèmes de l'évolution de la demande énergétique mondiale, des moyens technologiques pour y satisfaire, de la part dans ces moyens des combustibles fossiles, de la possibilité de séquestration du CO₂, et des évolutions de la demande (économies d'énergie, gaspillage, besoins de transport, niveau de vie des différents pays de la planète, sans parler des protocoles internationaux). Il faut s'accommoder de

Sans vision correcte de ce que sera l'hydrologie mondiale dans 20, 50 ou 100 ans, il est impossible de bâtir une stratégie globale dans le domaine de l'eau, sachant que les investissements très lourds des infrastructures hydrauliques sont utilisés et s'amortissent en siècles plutôt qu'en décennies.

scénarios, et utiliser ces différents scénarios incertains dans la définition des problèmes de l'eau et la recherche de leur solution, qui, elle, demande des actions immédiates.

Une approche historique de l'évolution du climat est à coupler à cette approche très déterministe de la modélisation de la circulation générale actuelle et future. Le rôle des sciences de la terre y est déterminant. En effet, c'est dans les archives sédimentaires ou dans les glaces que sont inscrites les températures, les concentrations des gaz à effet de serre, les précipitations, parfois la nature de la végétation, parfois les événements extrêmes du passé. Des mécanismes inconnus actuellement peuvent être révélés par ces études, par exemple les "événements de Heinrich" qui ont perturbé le climat en Europe depuis la dernière déglaciation il y a 20 000 ans, et qui seraient dus à des détachements importants de pans entiers de la calotte glaciaire dans l'Atlantique Nord, refroidissant l'océan et peut-être ralentissant les courants du Gulf Stream, phénomène que l'on redoute de voir se produire du fait du réchauffement (voir par exemple [Duplessy, 2005], ou [Ramstein et al., 2005] dans le numéro spécial sur l'eau des Comptes Rendus Geoscience). L'étude des climats anciens permettra de mieux comprendre les mécanismes capables de modifier le climat, leurs couplages, et les variabilités climatiques de hautes

► L'EAU POUR REMONTER AU CLIMAT

Des études sur la vitesse de circulation des eaux souterraines dans le bassin de Paris, par exemple, pour lesquelles le BRGM a été souvent moteur, ont montré que les âges des eaux s'échelonnent à Paris d'environ 25 000 ans pour les eaux de l'Albien, à près d'un million d'années pour le Dogger, et peut-être plus de dix millions d'années pour le Trias. Par l'oxygène 18 et le deutérium de l'eau, par la teneur en gaz rares, il est possible de remonter au climat, si l'on sait reconstituer les chemins suivis par l'eau, son âge, et la variation des conditions aux limites du système au cours du temps. Une thèse dans ce sens, celle de Mlle Anne Jost, a été soutenue en juillet 2005 à Paris VI.

A. Jost (2005). "Caractérisation des forçages climatiques et géomorphologiques des cinq derniers millions d'années et modélisation de leurs conséquences sur un système aquifère complexe : le bassin de Paris". Thèse de Doctorat, Université Paris VI, soutenue le 13 juillet 2005, 330 p.

fréquences associées aux évolutions tendanciennes lentes observées. Ces travaux servent aussi à tenter de valider les modèles déterministes d'évolution du climat, en leur demandant de reconstruire les situations passées observées. Il ne faut pas oublier les archives historiques ou sédimentaires des événements extrêmes passés, utiles pour établir les lois de fréquence des événements futurs, sans a priori sur la stationnarité. Voir par exemple une étude passionnante sur la canicule de 2003 dans les Comptes Rendus Biologie, J. Rosa, éditeur (2005).

Dans cet esprit, il faut souligner l'intérêt d'étudier les enregistrements paléoclimatiques inscrits dans les réservoirs aquifères des grands bassins sédimentaires.

**Vous annoncez le retour des grandes famines.
N'est-ce pas une vision pessimiste des choses alors
que la science peut apporter des réponses et qu'une
agriculture "durable" peut voir le jour ?**

Trois paramètres gouvernent la prévision de la demande en eau sur le 21^{ème} siècle, classés dans un ordre croissant d'incertitude :

- 1 > l'évolution démographique et sa répartition dans l'espace ;
- 2 > l'évolution des habitudes alimentaires, principalement en Chine et en Inde, avec l'augmentation du niveau de vie (consommation de viande, qui multiplie par cinq (volailles) ou dix (bœuf) la demande en eau ; à l'inverse, remplacement des cultures très exigeantes en eau, comme le riz, par des cultures plus économes, comme le blé ou la pomme de terre) ;
- 3 > les évolutions climatiques. Il ne semble pas assuré que la programmation des équipements nécessaires à satisfaire cette demande soit faite, à l'échelle mondiale, ni du point de vue technique ni du point de vue financier. Jusqu'ici, les aléas climatiques qui font chuter, dans un pays donné, la production, ont été couverts par les excédents mondiaux venant pour l'essentiel du blé américain ou européen. Mais depuis quelques années, des tensions sur le marché des céréales se sont faites sentir, les stocks sont très bas, et il paraît malheureusement certain que nous nous dirigeons à grands pas vers une crise majeure, dont la cause sera l'augmentation de la population (actuellement au rythme de 70 millions d'habitants supplémentaires sur terre par an), et un épisode de sécheresse prolongé (plusieurs années) frappant une surface importante du globe. Le spectre de la famine est là, devant nous, insupportable, et nous n'aurons rien fait pour l'empêcher d'arriver... La seule solution envisageable à court terme est la constitution de stocks importants, tant dans les pays du Nord que du Sud. Il faut associer à ce risque celui de la disparition des semences, qui auront été consommées, alors que dans de nombreux pays, ces semences sont spécifiques de variétés locales, bien adaptées, qui n'existent nulle part ailleurs. Seule la Tunisie a établi, à notre connaissance, un plan de sauvegarde des semences en cas de sécheresse, pour en assurer la pérennité.

La recherche scientifique peut apporter sa contribution à ces problèmes par l'étude de ressources alternatives, comme les eaux souterraines, plus facilement mobilisables rapidement. Elles pourraient par exemple être mobilisées pour "survivre" à quelques années de sécheresse, même au prix de la "vidange"

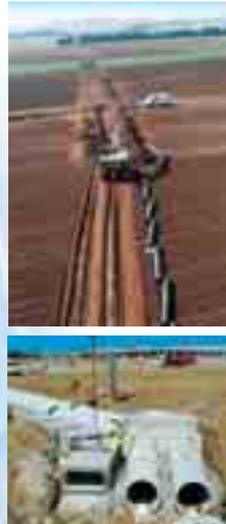


28, rue de La Baume
75008 Paris
Tél. 01 53 75 99 11
Fax 01 53 75 99 05
www.sade-cgth.fr

La Sade est un l'un des acteurs importants, en France et dans le monde, de la conception, la construction et la maintenance des réseaux et des ouvrages associés, dans les domaines de l'eau potable et de l'assainissement.

Sa longue expérience, la permanence de ses métiers, conjuguées à la recherche constante de la qualité, de l'innovation et du progrès, constituent ses forces et ses principaux atouts.

Une organisation privilégiant la proximité géographique et un Bureau d'Etudes intégré assurent à ses clients publics et industriels un service de qualité, dans le respect de leurs contraintes économiques, techniques et environnementales.



Des solutions techniques pour la mise aux normes environnementales

Mal entretenus ou sous-dimensionnés, les équipements hydrauliques peuvent avoir un impact sur l'environnement : fuites, risques de pollution, incidences sur la fourniture et la qualité de l'eau, arrêt des outils de production, ...

Apportant des solutions techniques innovantes répondant aux préoccupations économiques et environnementales des industriels, la Sade réalise tous les travaux correspondant aux besoins et aux pathologies des réseaux : forages, systèmes de défense incendie, transport et distribution des fluides, stations de pompage et de traitement, bassins de rétention ou de stockage, séparateurs d'hydrocarbures, réhabilitation des ouvrages existants, etc.



rapide des nappes. C'est ce qu'ont fait les Indiens, en équipant et surexploitant leurs ressources souterraines, avec une densité de forage dans les zones de socle qui peut atteindre quelques centaines par km². Par cette "révolution verte", ils ont assuré l'alimentation du pays, en tarissant en une ou deux décennies les ressources souterraines. Mais il leur faudra substituer à temps une ressource plus abondante, pour résister à l'épuisement, ou modifier les pratiques, économiser l'eau, modifier les types de culture, recharger artificiellement les aquifères... Au Sahara, l'Office du Sahara et du Sahel a lancé des études concertées entre Algérie, Libye, Tunisie, pour une gestion commune équilibrée des ressources souterraines [OSS (2003)], qui prévoit quand même une surexploitation raisonnée de la ressource, sur des durées séculaires. La recherche agronomique peut aider à la bonne gestion de l'eau et du drainage des sels (problème très important, le pourcentage actuel de terres irriguées ayant des problèmes de salinisation est estimé à 20 % de la surface totale irriguée mondiale, qui est de 264 millions d'hectares). Les nouvelles techniques d'irrigation permettent d'importantes économies d'eau. Enfin la sélection de nouvelles variétés de culture économes en eau ou plus robustes aux aléas climatiques ou aux prédateurs peut apporter un mieux, mais hélas pas de grands bouleversements : voir par exemple Tardieu (2005) dans le numéro spécial sur l'eau des Comptes Rendus Geoscience, ou la mise au point par Monty Jones en Côte d'Ivoire, par sélection, du riz NERICA mieux adapté à l'Afrique, au sein de l'Association pour le Développement de la Riziculture en Afrique de l'Ouest, qui a reçu le 14 octobre 2004 le Prix Mondial de l'Alimentation (www.warda.cgiar.org/adrao/).

Les pays dits riches sont-ils à l'abri de ces menaces ?

Nous ne parlons pas de l'évolution des besoins en eau dans les pays développés, car en général leur démographie est stabilisée, les ressources en eau y sont relativement abondantes, les aménagements principaux sont construits, et la satisfaction des besoins y est un problème de choix de société, d'allocation des ressources entre différents utilisateurs potentiels, de gestion des conflits d'usage, et de recyclage. Si les changements climatiques conduisent à une baisse des ressources en eau, comme cela est probable au Sud de la France, l'alimentation en eau potable sera toujours assurée, ce sont les usages agricoles qui devront soit s'adapter, ou être alimentés par des ressources transférées depuis d'autres bassins. La question du refroidissement des centrales thermiques

► UNE DEMANDE EN EAU CONSIDÉRABLE

La demande en eau, principalement agricole, augmente, c'est une certitude, et va continuer à augmenter. Pour fixer quelques ordres de grandeur (voir par exemple Shiklomanov, 1998), nous prélevons à l'échelle de la planète environ 5 200 km³/an d'eau dans les rivières, les lacs et les nappes, dont 63 % pour l'irrigation, sur une "ressource récupérable" estimée à 13 500 km³/an, sur un apport total d'eau dans le cycle de l'eau continental de 111 000 km³/an. Sur cet apport total, 71 000 km³/an est appelé "l'eau verte", car elle repart à l'atmosphère par l'évaporation et la transpiration des végétaux. C'est elle qui maintient nos écosystèmes et permet l'existence d'une agriculture pluviale, non irriguée. Le reste est constitué par 2 500 km³/an d'eau de fusion des calottes glaciaires, et 24 000 km³/an d'écoulements de crue ou souterrains, qu'il n'est pas envisageable de récupérer, mais qui supportent de nombreux écosystèmes indispensables, alimentent les zones côtières avec l'eau douce nécessaire aux écosystèmes côtiers, lessivent les sels dans les sols et enfin exportent les déchets.

Ce chiffre de 5 200 km³/an comparé à une ressource estimée à 13 500 km³/an, est trompeur car la ressource est très mal

distribuée (le débit de l'Amazone, par exemple, apporte à lui seul 5 800 km³/an à l'océan) avec une augmentation de la demande qui se fait principalement dans les pays du Sud, à démographie en forte augmentation, et au climat déficitaire en eau. Par ailleurs, la domestication de ces 13 500 km³/an disponibles demanderait des travaux d'aménagement titanesques, non réalisés à ce jour. Pour 2050, la demande complémentaire à assurer pour nourrir environ 9 milliards d'êtres humains est estimée à 4 500 km³/an [Rockström (2003)]. L'irrigation à partir de la construction de nouveaux aménagements à elle seule sera incapable de mobiliser une telle quantité d'eau, voir encadré p.22. La seule possibilité réaliste est l'augmentation de l'agriculture pluviale, là où elle est possible (Amérique du Sud, Canada, Russie, Europe de l'Est, Afrique) mais avec peu de possibilités en Asie.

I. Shiklomanov (1998). "World water resources - A new appraisal and assessment for the 21st century". Unesco, International Hydrology Programme. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/>
J. Rockström (2003). "Water for food and nature in drought-prone tropics : vapour shift in rain-fed agriculture". Phil. Trans. R. Soc. Lond. B 358, 1997-2009.

La rivière Tazikawa, sévèrement domestiquée, à Kofu (Japon).
The Tazikawa River, extensively channeled at Kofu (Japan).

Photo P. Hubert



Station de jaugeage sur l'Oued Merguellil (Tunisie).
Gauging station on the Marguellil Wadi (Tunisia).

Photo P. Hubert



sur les cours d'eau pourra poser problème, comme on l'a vu en 2003, qui pourtant n'était pas une année sèche. Mais une situation de tension alimentaire mondiale durable pourrait conduire à des déficits importants, s'il est décidé de combattre durablement la famine au Sud en produisant plus de produits alimentaires dans les pays équipés relativement riches en eau du Nord, en exportant vers les pays en déficit cette nourriture qu'il faudrait produire en consommant donc plus d'eau, c'est ce qu'on appelle parfois "l'eau virtuelle". Mais avec quels moyens les pays importateurs vont-ils financer "l'eau virtuelle" ? La question n'a pas reçu de réponse satisfaisante pour l'instant, pourtant, nous l'avons vu dans les encadrés, c'est la seule solution.

La dégradation de la qualité des eaux - phénomène aujourd'hui généralisé dans tous les pays développés - n'est-elle pas une menace plus importante que le risque de raréfaction des ressources ?

La qualité des eaux pose problème à deux niveaux : celui de la bonne santé des écosystèmes aquatiques, et celui de l'influence de l'éventuelle dégradation de la qualité des eaux sur la santé humaine.

Le problème des déversements de substances chimiques artificielles dans l'environnement est parfois désigné comme "l'imprégnation chimique" de la planète. Il est vrai que le devenir des substances de la chimie de synthèse très inventive en matière de nouvelles molécules est préoccupant. Les atteintes majeures à la santé des écosystèmes ont cependant été principalement dues à quatre activités humaines importantes, classées dans l'ordre d'effet actuel décroissant :

- ▶ La pollution diffuse agricole, qui apporte aux écosystèmes des quantités excessives de nitrates et phosphates, conduisant à l'eutrophisation, puis à l'anoxie, et à la perte de la biodiversité dans les eaux de surface. Certaines espèces végétales, en Hollande, sont en train de disparaître du fait de l'excès de fertilisation. Elle apporte aussi les pesticides.
- ▶ La pollution organique urbaine, aujourd'hui généralement traitée par temps sec dans les pays développés, qui conduit de même à l'anoxie dans les rivières à l'aval des grandes villes. Elle se manifeste aujourd'hui le plus souvent en période d'orages esti-

vaux, où les effluents urbains non traités, mêlés aux eaux de ruissellement, sont rejetés sans traitement dans un écosystème en étiage où la température élevée réduit la concentration en oxygène et en augmente la consommation.

- ▶ Le drainage et la mise en exploitation agricole des zones humides, qui font littéralement disparaître des écosystèmes aquatiques entiers. Ces zones humides sont, depuis peu, l'objet de soins attentifs, et même parfois de tentatives de restauration, pour conserver (ou recréer) ces systèmes complexes, dont la productivité biologique est élevée, et qui entretiennent de nombreuses espèces de faune et de flore. Ces écosystèmes sont fragiles, sensibles au manque d'eau (si la consommation en eau augmente, ils sont souvent touchés les premiers) ; ils sont aussi sensibles à la lutte contre les crues, dont ils ont besoin pour fonctionner, et aux rejets polluants (eutrophisation, contamination chimique).
- ▶ La pollution métallique, tout particulièrement les eaux usées des rejets miniers, en activité ou après fermeture, s'accompagnant souvent d'eaux acides



par l'oxydation des sulfures qui produit de l'acide sulfurique. Les rejets industriels de métaux dans les grands fleuves des régions industrialisées sont aussi préoccupants, bien qu'en régression. Il ne faut pas oublier les rejets atmosphériques des industries métallurgiques, qui engendrent des retombées proches ou plus lointaines.

Les pluies acides ont fait un moment beaucoup parler d'elles, car on leur attribuait la responsabilité de la dégénérescence observée de la forêt ; si cette dégénérescence peut avoir d'autres causes (climatiques,...), il n'en reste pas moins que les rejets acides dans l'atmosphère se retrouvent dans les pluies, et ont une grande influence sur les écosystèmes aquatiques (lacs) dans les pays non calcaires, comme la Scandinavie ou le Canada. Les rejets atmosphériques de nombreux micropolluants organiques dits "persistants" dans l'environnement sont également préoccupants (PCB, HAP, Phtalates, etc.) car ils se

► L'IRRIGATION VA FORTEMENT SE DÉVELOPPER

Les demandes en eau d'irrigation sont appelées à augmenter fortement. Le barrage des Trois Gorges en Chine, à buts multiples (énergie, crues, irrigation) en est une bonne illustration ; l'Inde va s'équiper dans sa partie Nord, où coulent les grands fleuves issus de l'Himalaya, et transférer les eaux vers le Sud assoiffé ; en Afrique, les grands fleuves comme le Congo et le Zambèze sont amenés à être équipés, permettant aussi la production électrique. Les grands aménagements hydrauliques sont très décriés dans nos pays riches, mais, face à la faim, ils sont incontournables dans les pays du Sud. Ainsi, le lac Nasser, d'une capacité de 168 km³, dont a décrié les conséquences écologiques négatives, a quand même permis aux Egyptiens de vivre depuis 1965 en effaçant les sécheresses de 1972 et 1984 et d'éviter la crue dévastatrice de 1996, alors que parallèlement la population passait de 26 à 55 millions entre 1960 et 1990. Alors que 10 km³/an sont perdus par évaporation sur le lac, 55 km³/an sont apportés à la basse plaine, dont 82 % servent à l'irrigation. On ne peut que tenter de limiter les impacts négatifs de ces aménagements sur les écosystèmes, mais il reste fort à faire dans ce domaine de l'écologie des milieux humides naturels ou artificiels, car on est très loin de comprendre et de

savoir modéliser les écosystèmes en évolution sous l'effet des contraintes anthropiques auxquelles il faut ajouter celles dues à l'évolution des climats. Il faut aussi compter avec les micro-aménagements construits par les initiatives locales (comme les petits aménagements hydrauliques de rétention et d'augmentation de l'infiltration des eaux qui se multiplient en Tunisie et en Afrique). Les améliorations des rendements et l'extension des zones cultivées passent impérativement par un meilleur revenu assuré aux paysans du Sud, qui vivent actuellement dans un état de pauvreté extrême du fait de la concurrence avec l'agriculture des pays du Nord (plus d'un milliard d'habitants avec moins de 1 \$/j, et 2 milliards avec 2 \$/j), pour leur permettre d'abord de vivre mieux et ensuite d'augmenter la production. Il faut aussi savoir intégrer les populations locales dans la conception, l'appropriation et la gestion des grandes retenues, comme l'y incitent les nombreux aménagements improductifs ou mal utilisés dont la conception a été réalisée dans les bureaux feutrés de la Banque Mondiale à Washington, sans réelle implication locale. Il faut pour cela concevoir et faire fonctionner des programmes de recherche en

participation avec les pays, pour étudier les conséquences des aménagements, les améliorations aux projets susceptibles de satisfaire les demandes régionales. On pourrait en particulier s'inspirer des programmes « grands fleuves » que le Programme Environnement du CNRS avait lancé à l'échelle de la France, et qui font cruellement défaut dans les Pays du Sud à forts programmes d'équipement. En 2000, l'agriculture pluviale (c'est-à-dire celle qui reçoit son eau par la pluie, sans apports par irrigation) consommait 5 000 km³ d'eau par an sur une superficie de 1 240 million ha, et l'agriculture irriguée 1 500 km³/an, sur une superficie de 264 millions ha. Au rythme d'extension actuel de la superficie irriguée, on atteindrait, en 2050, 331 millions ha irrigués, consommant environ 500 km³/an d'eau de plus qu'aujourd'hui. Or la demande en eau complémentaire en 2050 est estimée à 4 500 km³/an. Il est donc clair que la solution des problèmes de l'eau ne peut venir que de l'extension de l'agriculture pluviale, là où elle est possible. La FAO estime à 4 188 millions ha la superficie totale cultivable de la planète, dont seuls 1 500 millions ha sont effectivement cultivés aujourd'hui.

“
Le spectre de la famine est là,
devant nous, insupportable, et
nous n'aurons rien fait pour
l'empêcher d'arriver...
La seule solution envisageable à
court terme est la constitution
de stocks importants, tant dans
les pays du Nord que du Sud.”

retrouvent dans les eaux et les sols. Les rejets directs de micropolluants dans les eaux font partie de la même préoccupation ; ils sont très nombreux, souvent peu biodégradables, et susceptibles de bioaccumulation. Leur influence éventuelle sur les écosystèmes est très mal connue. Nous citerons enfin les pollutions des nappes souterraines, dont les principaux responsables sont les nitrates et les pesticides, les solvants chlorés (friches industrielles et sites d'enfouissement de déchets), les hydrocarbures (accidents de transport et fuites) et parfois les métaux.

La mise sur le marché de nombreuses molécules aux effets inconnus ou mal connus ne va-t-elle pas représenter à terme une menace de santé publique, voire même sur le long terme un risque pour toutes les espèces vivantes ?

Le problème de la qualité des eaux d'alimentation publique est très lié à la dégradation esquissée ci-dessus des eaux brutes ; des traitements poussés sont cependant mis en place pour épurer les eaux naturelles, et respecter ainsi les normes de potabilité édictées par les autorités (européennes, ou Organisation Mondiale de la Santé). Trois points peuvent être soulignés à ce sujet :

► Dans les pays en développement, les problèmes de qualité des eaux sont principalement bactériologiques, ou liés à la présence de parasites. La distribution d'eau bien traitée et restant potable tout au long du transfert dans les réseaux est le problème numéro un, objet des réflexions de la "vision mondiale de l'eau". Il faut y ajouter l'assainissement, car qui dit alimentation en eau potable dit également collecte et traitement des eaux usées, l'expérience ayant montré que sans cela, l'alimentation en eau seule sans traitement des rejets conduit à une détérioration de l'état de santé des populations. Dans les pays développés, les principales maladies hydriques sont également des contaminations épisodiques bactériologiques ou par des protozoaires des eaux distribuées. Elles se produisent



▲ **Irrigation par aspersion en Provence.**
Spray irrigation in Provence (France).
© BRGM im@gé - F. Michel

partout, en France comme aux Etats-Unis ou dans d'autres pays "riches". Citons enfin le problème gigantesque des mégapoles en cours de constitution dans les pays du Sud, en partie du fait des conditions de vie insupportables faites aux paysans, où l'on comptera plus de cinquante villes de plus de dix millions d'habitants en 2025, contre 17 aujourd'hui et 3 en 1950. Comment assurer la fourniture d'eau potable et l'assainissement de ces agglomérations monstrueuses, en perpétuelle expansion ?

► La présence dans l'eau de diverses molécules à l'état de trace est une source d'inquiétude pour beaucoup. Il peut s'agir de molécules à effets toxiques avérés, dont on limite, dans les normes de potabilité, la teneur à des concentrations suffisamment basses pour que la dose reçue annuellement soit jugée tolérable. Et puis il y a les molécules à effet inconnu, ou les cocktails de molécules dont les effets sont encore moins connus, sans parler des produits intermédiaires engendrés par la biodégradation de certaines molécules, dont on apprend parfois qu'ils sont plus toxiques que la molécule "mère". Deux problèmes se posent à ce sujet. Le premier est la logique de la fixation des normes, et leur légitimité. Pour ne prendre qu'un exemple, l'abaissement de la norme du plomb dans les eaux est certainement intrinsèquement une bonne chose. Cependant vu le coût exorbitant que cette mesure entraîne aux collectivités (3 milliards d'euros) et aux particuliers (12 milliards d'euros) pour la seule France, est-ce là la réelle priorité économique en matière de santé publique ? De plus, comment la dose admissible annuelle doit-elle être répartie entre les diverses voies d'ingestion (eau, aliments) ? Le deuxième problème est le choix a priori des molécules

► **CRÉER DES PARCS NATURELS HYDROGÉOLOGIQUES ?**

La prévention pourrait être un recours possible au traitement. Dans cet esprit, l'un d'entre nous (G. de Marsily) a proposé il y a quelques années déjà que l'on constitue, en France et dans le monde, des "Parcs Naturels Hydrogéologiques" dont la principale fonction serait de produire de l'eau potable par suppression de toute pollution diffuse ou ponctuelle du sol. En pratique, il s'agirait de constituer des bassins versants protégés, où ne serait admise qu'une activité respectueuse de l'environnement (forêt, agriculture exempte d'intrants chimiques, zone de

loisir,...). Les eaux issues de ces bassins seraient réservées en priorité à l'alimentation en eau potable des agglomérations. Cette idée intéresse certaines communes, certaines agences de l'eau. Économiquement, on peut montrer qu'elle n'est pas absurde : produire de l'eau potable sans traitement "économisé" à la société un coût par hectare de sol de bassin versant d'un ordre de grandeur comparable à ce que peut rapporter la culture intensive et polluante du même hectare. Dans une époque où les zones montagneuses ou peu fertiles sont en déprise agricole, au moins en Europe, il serait possible de dégager

les zones nécessaires pour la constitution de tels parcs, dont la superficie totale en France serait de l'ordre de moins de 10 % du territoire, ce qui est déjà important, mais pas impossible. Cette idée est déjà en application pour les bassins versants alimentant des sources d'eau minérale, en France, ou pour l'alimentation de certaines villes à l'étranger (Spa en Belgique, Belfast en Irlande, Perth en Australie, etc.).

G. de Marsily (1991). *Création de "parcs naturels hydrogéologiques". Plaidoyer. Bulletin SRETIE INFO, Recherche Etudes Environnement Développement, Ministère de l'Environnement, 34, juin 1991, 5-7.*

suspectées de dangerosité. Ces molécules sont en nombre très élevé, et en concentration généralement très faible dans l'environnement ; on en appelle pudiquement certaines les "perturbateurs endocriniens", il peut s'agir de médicaments rejetés dans les eaux usées, de pesticides, de produits entrants dans la fabrication des plastiques, comme les phtalates, etc. Leur concentration est faible, leur dosage est une prouesse technique, leur effet est inconnu. Comment procéder ? Multiplier les tests et les produits ? Trouver des bio-tests susceptibles de déceler la toxicité ? Les ignorer et faire comme si tout allait bien ? Faut-il se préoccuper des prions dans les eaux ? Toutes ces questions sont aujourd'hui sans réponse satisfaisante,

et demandent des efforts de recherche soutenus.

► **Devant cette incertitude, on en vient à penser que la prévention pourrait être un recours possible au traitement (cf. encadré « créer des parcs naturels hydrogéologiques »).**

Globalement, estimez-vous qu'aujourd'hui nous avons les moyens et les atouts pour répondre à cet enjeu majeur, dans les pays dits riches mais surtout dans les territoires du Sud ?

Ce bref tour d'horizon des questions touchant à l'eau n'est certes pas exhaustif, et a laissé de côté de nombreux problèmes scientifiques, comme la modélisation couplée des systèmes hydrologiques, dans un

Exutoire d'un réseau d'égouts, apprécié des poissons et des pêcheurs, dans la rivière Issiet à Iekatéribourg (Russie).
Sewer outlet, popular with fish and fishermen, on the Iset River in Ekaterinbourg (Russia).

Photo P. Hubert



... Mesure - Télémessure



DIVER

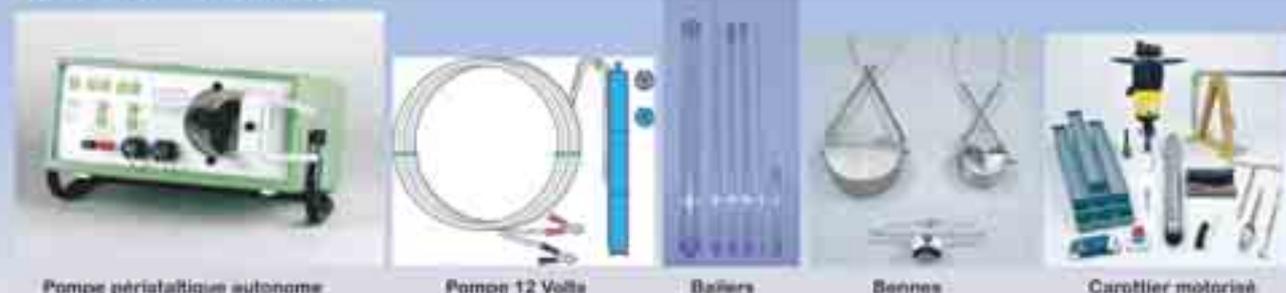
Sondes DIVER/GTO DIVER sur terrain

Modem GSM

Humidimètre

Station Météo

... Echantillonnage



Pompe péristaltique autonome

Pompe 12 Volts

Baïers

Bennes

Carottier motorisé



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

Tél : 00 33 (0)2 47 94 10 00

WEB : www.sdec-france.com

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

Mail : info@sdec-france.com

couplage étroit atmosphère-surface-végétation-souterrain, les méthodes de prédétermination et d'annonce de crue, la description et la modélisation 3-D du milieu souterrain pour le calcul des écoulements et du transport de polluants dans les nappes, etc, voir par exemple Habets et al., Moore et al., Hubert, Givone (2005) dans le numéro spécial sur l'eau des Comptes Rendus Geoscience.

Pourtant, l'essentiel des problèmes se situe ailleurs, dans les pays en développement, où la croissance démographique, la constitution des mégalopoles, les risques liés aux changements climatiques, et enfin la détérioration de la qualité de l'environnement sont les causes répertoriées de catastrophes attendues, qu'aucune action de prévention ne vient pour l'instant tenter d'enrayer. ■

La situation actuelle dans le domaine de l'eau se marque, à notre sens, par un vif déficit de prise en compte des problèmes et d'une vision prospective : aussi surprenant que cela puisse paraître, il n'existe plus rien au niveau français en matière de prospective de la demande en eau du pays dans 5, 20 ou 50 ans, comparée à la ressource, qui pourrait orienter des choix d'aménagement ou de politiques publiques. Le schéma général d'aménagement de la Région Ile de France ne fait, par exemple, pas grand cas de la problématique eau. Ce type de prospective existe cependant aux Etats-Unis, établie de façon conjointe entre le "Geological Survey" et les producteurs d'énergie, qui gèrent, par leurs barrages, et utilisent, pour leurs centrales, de très grandes quantités d'eau, comme c'est le cas en France également.



This article addresses three questions related to water in the 21st century: water deficit in the near future; hydrological effects of expected climate changes; water quality degradation effects on ecosystems and on drinking water. A brief summary is given of current knowledge in each area, and research topics together with actions to overcome the major problems are suggested. The conclusion emphasizes the urgent need to develop a prospective analysis of water demand and water resources, both in France and worldwide. Practical measures are urgently needed in the Developing World to increase water resources, and to develop rain-fed agriculture, wherever possible, to prevent catastrophic events like those in the Sahel region in the 1970s, only much worse because of the combination of population growth and climate instabilities at the world scale instead of at the local scale. These events are unpredictable although certain to occur.

Bibliographie : AIH (2005). "Aquifères et Eaux Souterraines de la France". Ouvrage Collectif sous la direction de J.C. Roux. Editions du BRGM, à paraître. — M. Camdessus, B. Badré, Y. Chéret, P.F. Ténière-Buchot (2004). "Eau". Robert Laffont, Paris, 290 p. — Commissariat Général au Plan (2001). "Rapport sur les Politiques Publiques sur la Protection des Eaux Souterraines". La Documentation Française, 150 p.+ An. — Comptes Rendus Biologie de l'Académie des Sciences, numéro thématique "les canicules", édité par J. Rosa, à paraître en 2005. — Comptes Rendus Geoscience de l'Académie des Sciences, numéro thématique "Eaux Continentales", édité par G. de Marsily, 337, 1-2, 296 p. — W.J. Cosgrove, R. Rijsberman (2000). "World Water Vision. Making water everybody's business". Conseil Mondial de l'Eau. Earthscan Publication Ltd, Londres, 108 p. — INRA (2004) - "Prospective : l'eau et les milieux aquatiques. Enjeux de société et défis pour la recherche". Editions INRA, Collec. Bilan et Prospective, Paris. — M. Meybeck, G. de Marsily, E. Fustec, Editeurs (1998). "La Seine en son Bassin, Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé". Elsevier, Paris, 749 pages. — OSS (2003). "Système Aquifère du Sahara Septentrional. Gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de Synthèse". Ed. Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunis, Tunisie, 129 p.

Face à la rareté et la surexploitation des eaux de surface dans les pays autour de la Méditerranée, la gestion durable et active des eaux souterraines du karst va s'imposer comme une solution d'avenir. Peu exploitée et mal connue, cette ressource peut devenir un facteur de développement pour ces pays. C'est pourquoi le CNRS et le BRGM travaillent au développement de la connaissance sur ces ressources souterraines et surtout pour créer des outils opérationnels de gestion.

©BRGM irm@gé

Ressources en eau du karst : un enjeu pour le bassin méditerranéen



Michel Bakalowicz
CHERCHEUR CNRS, ESIB/CREEN
(HYDROSCIENCES)
michel.baka@fi.usj.edu.lb

Nathalie Dörfliger
HYDROGÉOLOGUE, CHEF DE PROJET,
BRGM - EAU/RMD,
n.dorfliger@brgm.fr

Les ressources en eau des pays méditerranéens sont soumises à une répartition spatiale et saisonnière très déséquilibrée : zones à pluviométrie globalement inférieure à 500 mm, mais de plus de 1500 mm en montagne, saison sèche estivale longue, très forte variabilité des précipitations selon les années. La demande en eau est très forte, aussi bien pour les habitants concentrés depuis toujours sur les côtes que pour les populations touristiques ou pour l'agriculture. Ainsi, les ressources en eau du pourtour méditerranéen constituent un facteur limitant du développement, à l'origine de conflits d'aménagements et d'usages. À l'heure actuelle, les principaux conflits autour de la Méditerranée se cristallisent autour de projets d'aménagements hydrauliques comme la construction de grands barrages (sur le Tigre et l'Euphrate en Turquie) et de canaux de dérivation (Espagne). Les eaux souterraines de ces régions peuvent également être soumises à une exploitation intensive, voire à une surexploitation, et à une dégradation de leur qualité avec les rejets d'eau usées, la salinisation de sols irrigués ou l'intrusion saline liée à des pompages excessifs en zone côtière.

Les hydrosystèmes karstiques

Les calcaires et les dolomies sont des roches très communes dans le bassin méditerranéen, affleurant selon les pays sur 30 à 70 % de la surface (fig. 1). Ils constituent des aquifères particuliers du fait de la karstification, processus qui résulte de l'action dissolvante des eaux et des possibilités de circulation de l'eau. L'eau de pluie infiltrée se

Paysages karstiques méditerranéens au niveau des Corbières (Opoul et Espira d'Agly).
Mediterranean Karstic landscape in Corbières (Opoul and Espira d'Agly).

©BRGM im@gé - N. Dörfliger

“Ainsi, les ressources en eau du pourtour méditerranéen constituent un facteur limitant du développement, à l’origine de conflits d’aménagements et d’usages.”



charge en gaz carbonique lors de son transit à travers le sol et, sous l’effet d’un gradient hydraulique, circule dans les fractures de la roche. Des conduits organisés en réseau se forment et drainent les eaux depuis la surface jusqu’à une source généralement unique tandis que des zones de stockage connectées au réseau de conduits prennent place dans la zone saturée (fig. 2).

Le résultat final se traduit par une hétérogénéité considérable du milieu avec une organisation des vides déterminée par les écoulements souterrains. Par

ailleurs, toute modification de la position de la source principale entraîne l’abandon de la structure de drainage existante au profit d’une nouvelle organisation. Face à ce processus rapide (quelques 10^3 à 10^4 années), tout abaissement du niveau de la source provoque celui des réseaux karstiques.

L’organisation du réseau de conduits drainant l’aquifère constitue une unité, dont la source est l’exutoire. Cette source draine un système karstique dont le bassin d’alimentation peut comprendre un bassin versant sur les terrains imperméables où les eaux de surface s’écoulent dans des pertes et participent à la recharge de l’aquifère. Les limites d’un système karstique sont donc imposées par la géologie et le relief et doivent être déterminées non par une carte piézométrique, mais par des approches complémentaires variées : géométrie des formations, bilan hydrologique, “colorations” et traçage naturel.

Dans les régions méditerranéennes, les systèmes karstiques ont subi de fréquentes et importantes variations de leur niveau de base sous l’effet conjugué des variations du niveau marin et de la surrection des chaînes alpines. Ces variations sont responsables

“Face à la rareté ou la surexploitation des eaux de surface autour de la Méditerranée, la satisfaction de besoins croissants passe désormais par une gestion durable des eaux souterraines, notamment des formations carbonatées.”

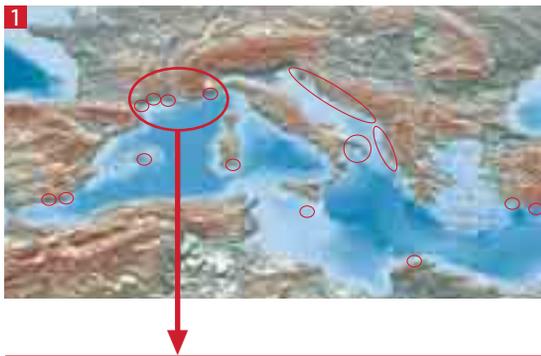
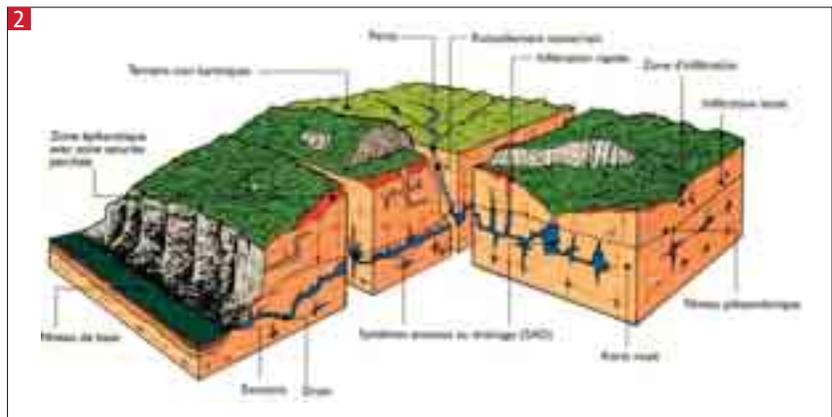


Fig. 1 : Localisation des principaux karsts de Méditerranée
 Fig. 1: Location of the principal Mediterranean karst formations
Fig. 2 : Bloc diagramme schématique d’un aquifère karstique
 Fig. 2: Block diagram of a karst aquifer

Source : Bakalowicz, 1999



d'un intense développement des vides karstiques à différents niveaux. Certains d'entre eux peuvent être abandonnés et ne prennent plus part au fonctionnement des systèmes. D'autres peuvent se situer sous le niveau d'émergence actuel ; ils sont alors noyés et participent au stockage dans la zone noyée.

Le niveau de la Méditerranée a subi d'importantes variations lors des glaciations quaternaires (abaissement de 100-150 m sous le niveau actuel), et surtout au Messinien, (5,5 millions années) avec un abaissement de 1 000 à 1 500 m [Aunay et al., (2003)]. Des karsts se sont ainsi développés en profondeur dans les massifs carbonatés méditerranéens. Les témoins de cette histoire géologique sont nombreux avec des conduits descendant à grande profondeur (Fontaine de Vaucluse, source du Lez, source de Fontestramar), de nombreuses sources littorales saumâtres (Fontestramar, Almyros d'Héraklion en Crète), des sources karstiques sous-marines (sources de la Vise et de Port Miou en France, de la Mortola et du golfe de Taranto en Italie) et avec l'intrusion marine dans de nombreux aquifères karstiques côtiers.

Une méthodologie spécifique pour ces eaux souterraines

La méthodologie d'exploration appliquée depuis une dizaine d'années a abouti à une démarche intégrée d'exploitation et de gestion de la ressource en eau des régions karstiques. Les études réalisées ou en cours pour des collectivités territoriales permettent d'évaluer les ressources et les réserves mobilisables des aquifères karstiques, de définir leur vulnérabilité aux pollutions et de proposer des scénarios de gestion.

La démarche est originale et différente de celle utilisée par l'hydrogéologie classique des nappes alluviales et des milieux "continus". L'approche classique repose sur l'hypothèse d'homogénéité des caractéristiques de l'aquifère où les propriétés hydrauliques sont déterminées à partir des essais de pompage. Les outils géophysiques sont utilisés pour approcher la géométrie et la répartition spatiale des propriétés hydrauliques alors que les impacts qualitatifs et quantitatifs liés aux modifications environnementales sont évalués et simulés sur la base de cette hypothèse. Si cette méthodologie a fait ses preuves pour les milieux poreux et fissurés les plus souvent exploités, elle a montré ses limites et son inadéquation pour les aquifères karstiques, malgré des adaptations successives rendues nécessaires par les échecs relatifs des prospections.

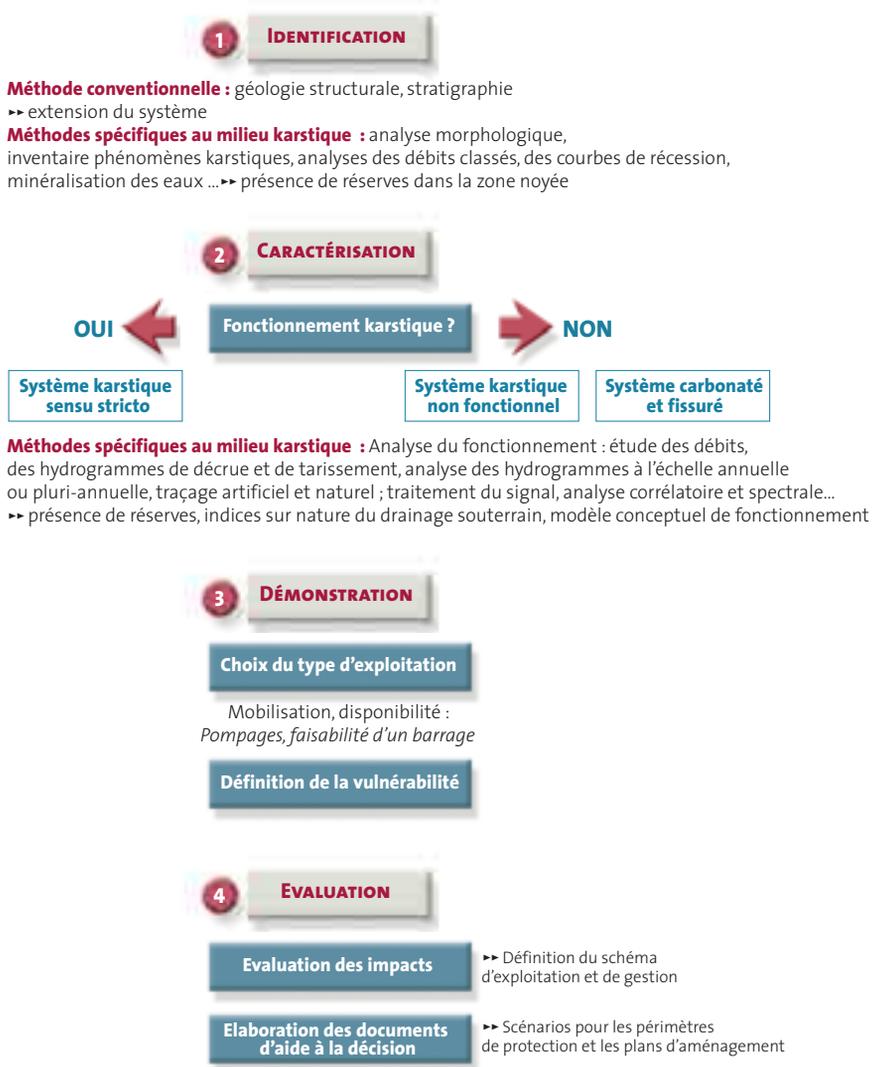
La démarche appliquée aux aquifères karstiques repose sur l'analyse, la surveillance et l'exploitation de l'aquifère à l'intérieur ou à proximité de la source principale. Elle nécessite des moyens lourds et notam-

ment un suivi hydrologique sur plusieurs cycles hydrologiques. Cette démarche est organisée en quatre étapes (fig. 3). Les deux premières étapes concernent l'évaluation et la caractérisation des systèmes karstiques. Le caractère karstique est établi sur la base de critères de fonctionnement en s'appuyant sur des données hydrodynamiques (analyse d'hydrogrammes), le traçage naturel (analyse des chimiogrammes et isotopes), ainsi que sur des approches couplées hydrologie-hydrochimie [Pinault et al., (2001)].

Trois grands types de systèmes sont considérés :

- ▶ systèmes karstiques typiques (existence de circulations rapides, grande variabilité des débits et de la qualité des eaux, capacité de stockage variable),
- ▶ systèmes carbonatés fissurés (faible variabilité des débits et de la qualité),
- ▶ systèmes karstiques non fonctionnels (grande capacité de stockage, peu de variabilité des débits et de la qualité, mais existence de circulations localement rapides).

Rejet débit minimal dans le Lez par les pompages de la source.
Minimal outflow in the Lez river from spring pumping station.
 ©BRGM im@gé - N. Dörfliger





Vasque de la source du Lez en période d'étiage (Prades le Lez).
Lez spring during recession period (Prades le Lez).

© BRGM Im@gé - N. Dörfliger

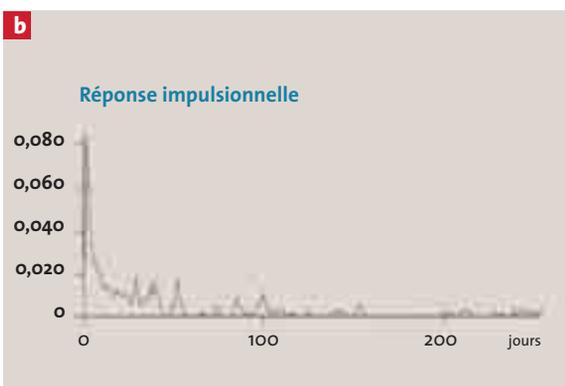
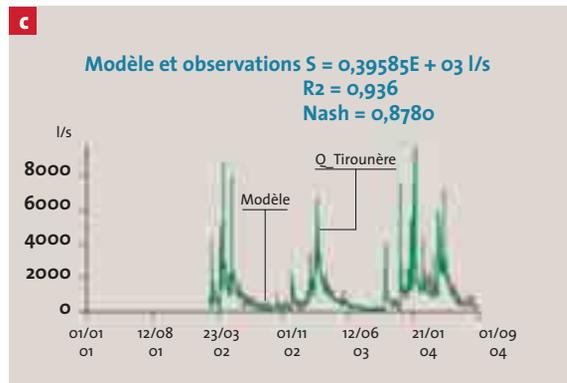
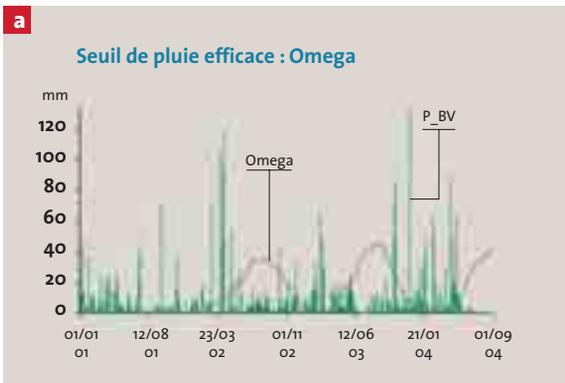


Fig. 4 : Exemple d'application de détermination de l'hydrogramme unitaire d'une source karstique à partir de modélisation inverse effectuée à l'aide du logiciel TEMPO (© Brgm, Pinault et al., 2001) et de la modélisation de l'hydrogramme sur plusieurs cycles hydrologiques :
a) détermination du signal d'entrée (pluie efficace) par inversion,
b) calcul de la réponse impulsionnelle par déconvolution du signal de sortie (débits) à l'aide du signal d'entrée (pluies efficaces),
c) comparaison entre modèle et débits observés à la source de la Tirounère (Pyrénées Orientales). Le débit observé résulte de la transformation à l'aide de la courbe de tarage établie pour la source pour différentes hauteurs d'eau. Les données de hauteur d'eau sont enregistrées en continu à l'aide d'une sonde de pression.

Fig. 4: Example of unit hydrogram determination for a karstic spring using inverse modelling with TEMPO software (© brgm, Pinault et al. 2001) and of hydrogram modelling on several hydrological cycles:

a) input signal determination by inversion (efficient rainfall),
b) transfer function determination by deconvolution of the output signal (discharge time series) by the input signal (efficient rainfall time series),
c) comparison between model and observed discharges of La Tirounère spring (Pyrénées Orientales). The discharges time series is the result of the conversion of the monitored water depth by the discharge-water depth curve; this curve was established at the gauging station for various hydrological conditions.

Source : Dörfliger N. & Ladouche B. 2004, rapport BRGM RP-52921-FR

Fig. 3 : Méthodologie d'étude et de caractérisation d'un système karstique, en vue de son exploitation, de sa gestion et de sa protection (modifié à partir de Bakalowicz, 1999)
Fig. 3: Methodology for the study and characterization of a karst system, in view of its exploitation, management and protection (modified, from Bakalowicz, 1999)

Source : Bakalowicz, 1999

Deux autres phases caractérisent cette démarche : la démonstration par des essais conduisant à choisir le meilleur dispositif de captage, et l'évaluation du dispositif de captage pour mesurer les impacts et définir le schéma d'exploitation et de gestion, y compris la vulnérabilité du système à l'aide d'une approche multicritère [Pételet-Giraud et al., (2000)]. La carte de vulnérabilité constitue un outil pour la gestion de l'aménagement du territoire et pour la délimitation de périmètres de protection des captages.

L'exploitation des aquifères karstiques doit s'appuyer sur la même démarche dans les régions littorales autour de la Méditerranée. Mais sa mise en œuvre est plus délicate, du fait de l'existence d'émergences sous-marines non contrôlées et de risques d'intrusion marine. La surveillance des paramètres physico-chimiques des sources sous-marines devient alors un élément essentiel de la caractérisation et de l'exploitation de la ressource. L'exploitation des émergences sous-marines peut être envisagée lorsque les conditions hydrogéologiques sont favorables. Des méthodes de reconnaissance et d'évaluation sont en cours de développement [Bakalowicz et al., (2003a)].

Une ressource peu connue et sous-exploitée

Les karsts offrent souvent des ressources importantes en eau avec des zones très productives, à proximité des exutoires, mais qui sont encore difficiles à localiser par des méthodes géophysiques. Des recherches de localisation des conduits saturés à proximité d'exutoire de systèmes karstiques à l'aide de méthodes géophysiques ont donné de premiers résultats intéressants [Vouillamoz et al., (2003)].

L'évolution complexe des karsts méditerranéens, liée aux variations du niveau de la mer, leur confère une capacité de stockage souvent considérable. Ils peuvent ainsi offrir des ressources de l'ordre de plusieurs centaines de litres/seconde à quelques m³/s, susceptibles de satisfaire les besoins d'agglomérations de 100 000 à 500 000 habitants. Certains de ces systèmes disposent de réserves parfois considérables de quelques dizaines de millions de m³. De telles réserves permettent de s'affranchir des variations saisonnières de débit, par des prélèvements saisonniers, qui sont ensuite compensés par une recharge lors des hautes eaux : il s'agit de la gestion active, méthode d'exploitation durable qui veille à respecter les conditions de reconstitution des réserves en s'opposant à toute surexploitation de l'aquifère.

Bien que les carbonates constituent la principale formation aquifère des pays méditerranéens, les cas d'exploitation par gestion active restent des exceptions. Citons la source du Lez, alimentant l'agglomération montpelliéraine (prélèvement de 1300 l/s) et la source de Figeh, alimentant Damas (prélèvement de 3000 l/s). Les karsts méditerranéens possèdent finalement des ressources en eaux souterraines très largement sous-exploitées (de l'ordre de 10 milliards de m³/an) et qu'il faudra un jour solliciter pour satisfaire les besoins croissants en eau (+ 93 milliards de m³/an en 2025 [in Plan Bleu, Margat J., (2004)]). Quand cette nécessité se présentera, il faudra alors bien connaître tous ces systèmes afin de définir les conditions d'exploitation et de protection de leurs ressources. C'est l'objectif des recherches en cours. ■

“ Les karsts méditerranéens possèdent finalement des ressources en eaux souterraines très largement sous-exploitées et qu'il faudra un jour solliciter pour satisfaire les besoins croissants en eau. ”



Source sous-marine de la Vise (en surface). Submarine source of the Vise (surface view).



Very abundant in the Mediterranean Basin, carbonate rocks have remarkable aquifer properties due to karstification caused by the combined effect of groundwater flow in their voids and chemical dissolution. This transformation gives them characteristics that are notably different from those of other types of aquifer formations and can only be determined by a novel methodological approach. The aquifer properties of karst and a methodology well adapted to karst hydrogeology are presented, with references to work carried out by BRGM. This methodology can be used to acquire the knowledge needed for the sustained exploitation, management and protection of these major water resources in Mediterranean regions.

► GÉOPHYSIQUE ET KARST

La résonance magnétique protonique (RMP) permet d'identifier la présence de l'eau dans le milieu aquifère. C'est une méthode qui repose sur la stimulation électrique des protons de l'hydrogène de l'eau et sur la mesure du signal de résonance magnétique envoyé par le proton après arrêt de cette stimulation.

La RMP a permis de localiser la position des drains du site karstique de Lamalou, dont le réseau de conduits est connu et cartographié. Associée à d'autres méthodes géophysiques et à une démarche intégrée de caractérisation d'un système karstique, la RMP est un outil intéressant qui permet de locali-

ser des drains à proximité de sources et de proposer des sites de forage en vue d'une gestion active de la ressource. Cette méthode rencontre cependant des limites d'utilisation : conditions de bruit électromagnétique environnant, profondeur d'investigation de l'ordre de 40 mètres, quantité d'eau suffisante.

Source de Fontestramar avec vue sur les aménagements d'écoulement d'eau sous l'autoroute Ag (Salses Leucate)
Fontestramar spring with a view on flow channel under the Ag motorway (Salses Leucate)

© BRGM Im@gé - N. Dörfliger

De nouvelles connaissances permettent de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères de socle qui peuvent représenter une solution importante pour l'alimentation des régions tempérées mais aussi arides ou semi-arides. Les nouveaux outils mis au point doivent favoriser une gestion de proximité afin de préserver ou de restaurer leur qualité et les protéger de la surexploitation.

Affleurement de l'horizon fissuré-altéré au sein du granite de la Margeride (France).
Outcropping of the fractured/weathered horizon in Margeride granite (France).

©BRGM Eau - P. Lachassagne

Aquifères de socle : nouveaux concepts

Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau



Patrick Lachassagne

RESPONSABLE DE L'UNITÉ
 ÉVALUATION DE LA RESSOURCE,
 MILIEUX DISCONTINUS
 SERVICE EAU - BRGM
 p.lachassagne@brgm.fr

Robert Wyns

GÉOLOGUE
 SERVICE CARTOGRAPHIE ET
 DIFFUSION DE L'INFORMATION
 GÉOLOGIQUE
 UNITÉ MODÉLISATIONS ET
 APPLICATIONS - BRGM
 r.wyns@brgm.fr

Les "aquifères de socle" sont constitués de roches cristallines, d'origine plutonique (granites s.l.) et métamorphiques (gneiss, schistes, micaschistes, etc.). Hydrogéologiquement, il s'agit de roches dures qui présentent un comportement mécanique et des propriétés hydrauliques d'ensemble relativement homogènes et qui se caractérisent principalement par une perméabilité de fissures et de fractures. Les aquifères qu'elles renferment sont considérés comme "discontinus", en raison de l'importante variabilité spatiale de leurs propriétés hydrodynamiques.

Ces roches, qui constituent le soubassement de l'ensemble des continents, affleurent sur une grande partie de la planète, y compris en France, dans les massifs dits « anciens » (Fig. 1).

Aquifères de socle : une ressource modeste, mais bien répartie

Compte tenu de leurs perméabilité et porosité relativement faibles, la productivité des aquifères de socle est modeste : les forages sont susceptibles de produire des débits exploitables compris entre 2 - 3 et 10 à 20 m³/h. Néanmoins, les aquifères de socle présentent l'avantage de proposer une ressource en eau souvent bien répartie géogra-

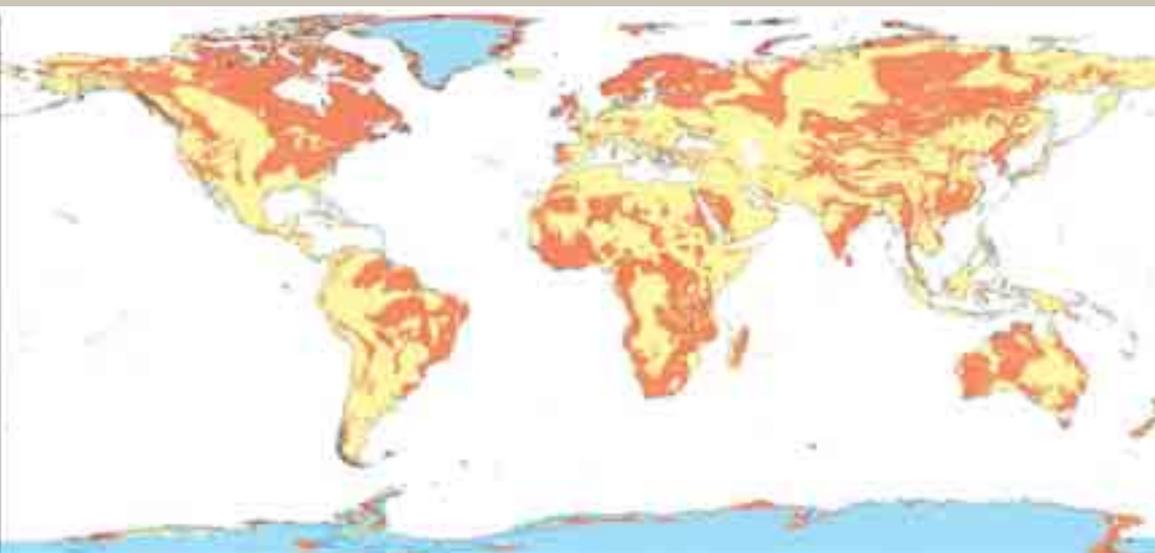


Fig. 1 : Carte des régions de socle dans le monde (en orange).

Fig. 1: Map of the world's bedrock regions (in orange).

© BRGM-lm@gé / CDG - R. Wyns

“*Les aquifères de socle présentent l'avantage de proposer une ressource en eau souvent bien répartie géographiquement et peu dépendante des eaux de surface.*”

phiquement et peu dépendante des eaux de surface. Contrairement aux aquifères alluviaux ou karstiques, des sites favorables à l'implantation de forages en roche de socle sont susceptibles d'être trouvés à l'échelle de chaque commune.

Alors qu'en climat tempéré ces ressources sont rarement concurrentielles aux eaux de surface pour les agglomérations de taille moyenne à grande, il n'en est pas de même en milieu rural. La mise en valeur de ces aquifères est donc susceptible de contribuer au développement économique des régions de socle. Dans les pays arides à semi-arides, ces eaux contribuent ainsi à l'émergence d'une agriculture irriguée à forte valeur ajoutée, alors que dans d'autres régions l'objectif est de produire une eau de bonne qualité sanitaire.

De nouveaux concepts sur les aquifères de socle

Les “aquifères de socle”, “fissurés” ou encore “discontinus”, exploitables à faible profondeur ont une distribution “discrète” de leur perméabilité. En forage, les premières “venues d'eau” significatives apparaissent au sein de la roche “saine”. L'origine de certaines fissures est attribuée à la “décompression” de la roche par l'érosion des terrains qui les surmontaient mais le modèle classique d'aquifère discontinu, développé au cours des années 1970, identifie les principales venues d'eau dans les fractures d'origine tectonique et ouvertes (Fig. 2).

De nombreux auteurs ont constaté la raréfaction des venues d'eau avec la profondeur et l'ont attribuée à la “fermeture” des fractures tectoniques, du fait de l'augmentation de la pression des terrains avec la profondeur.

La plupart des régions où affleurent les roches métamorphiques ou plutoniques sont dites “stables”. Emergées, elles ont été exposées, pendant des durées très longues à l'altération météorique, sous des climats humides. Les roches affleurantes comportent en général une pellicule superficielle altérée de plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur qui correspond à un profil d'altération de type latéritique.

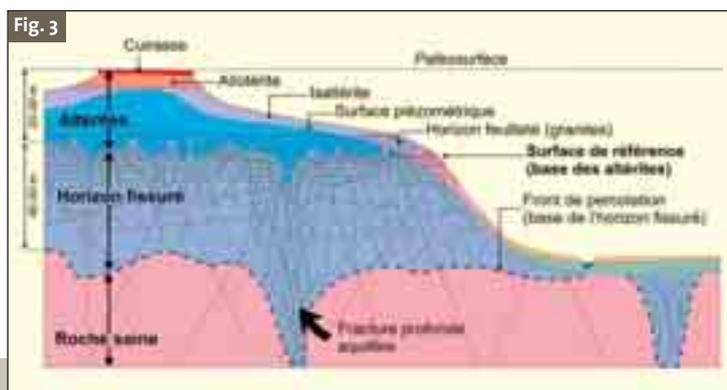
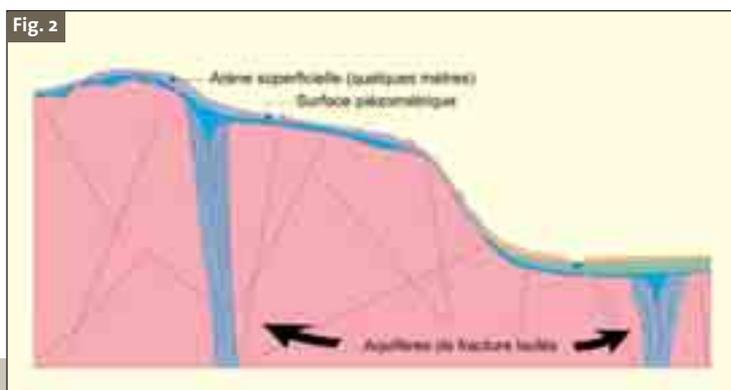
Fig. 2 : Concept “classique” d'aquifère discontinu.

Fig. 2: Classical model of discontinuous aquifers.

Fig. 3 : Modèle conceptuel stratiforme de la structure et des propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle.

Fig. 3: Stratiform conceptual model of the structure and hydrogeological properties of hard rock aquifers.

© BRGM-lm@gé / CDG - R. Wyns



AQUIFÈRES DE SOCLE

Ces profils d'altération confèrent aux roches de socle leurs propriétés d'aquifères, avec, de haut en bas (Fig. 3) :

- 1 > Une cuirasse ferrugineuse ou bauxitique d'épaisseur métrique, dure, souvent absente.
- 2 > Des altérites meubles qui résultent d'une altération très poussée de la roche originelle, avec une perméabilité relativement faible et des capacités de stockage des eaux souterraines significatives.
- 3 > Les travaux de recherche mis en œuvre au BRGM depuis la fin des années 90 ont mis en évidence, sous cette partie meuble, un "horizon fissuré", stratiforme, de 50 à 100 m d'épaisseur, auquel l'aquifère de socle doit sa perméabilité (Cho et al, 2001 ; Lachassagne, Wyns et al., 2001) (Fig. 3). Il est désormais admis que l'origine de cette fracturation résulte des contraintes engendrées par le gonflement des minéraux au cours du processus d'altération avec une fréquence des fissures qui décroît en profondeur (Fig. 3 et photo ci-contre). L'existence et l'intensité du réseau de fissures sont contrôlées par la minéralogie, la texture et, le cas échéant, la schistosité ou la foliation de la roche. L'épaisseur de l'horizon fissuré est environ le double de celle des altérites meubles du profil d'altération (avant érosion). Les propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré ont fait l'objet d'une caractérisation de détail (Maréchal et al., 2005). Au sein des granites (Fig. 4), seules quelques fractures subhorizontales présentent une perméabilité suffisante pour permettre des "venues d'eau" significatives (Fig. 5). D'une perméabilité voisine de 10^{-4} m/s, leur extension latérale est comprise entre 5 et 40 m environ. Des joints

subverticaux, d'une perméabilité 10 fois moindre en moyenne, contribuent à la connexion du réseau. L'ensemble des autres fractures de moindre perméabilité est à l'origine d'une "perméabilité de blocs", voisine de $5 \cdot 10^{-8}$ m/s, significativement plus forte que la perméabilité de matrice (10^{-14} à 10^{-9} m/s). Ces "blocs" assurent 90 % de l'emménagement total de l'horizon fissuré de l'aquifère, de l'ordre de 0,5 à 1 %, les fractures perméables ne contribuant que pour 10 % (0,05 à 0,1 %) à cet emmagasinement.

4 > Le substratum rocheux sain sous-jacent ne présente des perméabilités significatives que très localement, et n'offre qu'une très faible capacité de stockage d'eau souterraine à l'échelle du massif (porosité efficace $\ll 10^{-4}$).

L'horizon fissuré-altéré au sein de granites (Livradois, Massif Central Français).

The fractured-weathered horizon in granite (Livradois, Massif Central, France).

© BRGM-Im@gé / CDG - R. Wyns

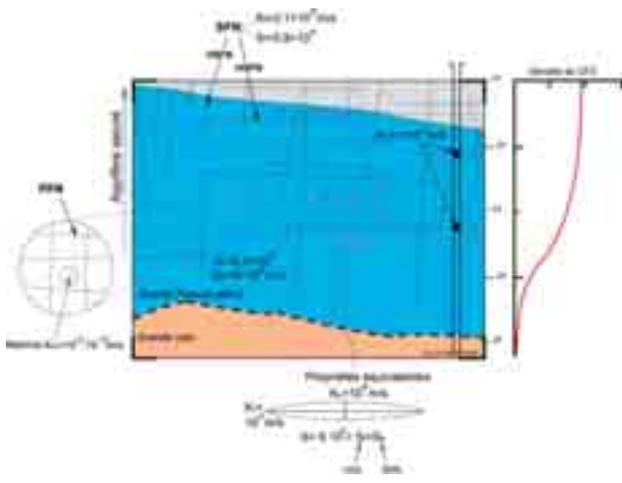


Fig. 4 : Schéma conceptuel des propriétés hydrodynamiques de l'horizon fissuré des aquifères granitiques.

K : perméabilité (Kr : perméabilité radiale, Kz : perméabilité verticale), **S :** coefficient d'emménagement (Sf : fractures, Sb : blocs), **SFN :** réseau de fractures secondaires ou « blocs », **CFZ :** fractures les plus perméables.

Fig. 4: Schematic of hydrodynamic properties of the fractured horizon in granite aquifers.

K: permeability (Kr: radial permeability, Kz: vertical permeability), S: storage coefficient (Sf: fractures, Sb: blocks), SFN: secondary fracture network or "blocks", CFZ: most permeable fractures.

© BRGM-Im@gé / EAU - J.C. Maréchal et B. Dewandel



Le développement de tels profils d'altération requiert de longues périodes pendant lesquelles les régions concernées ne présentent qu'un relief modéré. Si le relief est plus accentué, le taux d'érosion devient supérieur au taux d'altération et les produits d'altération ne peuvent s'accumuler. En Europe, le Crétacé inférieur et l'Eocène inférieur et moyen constituent les périodes les plus récentes durant lesquelles l'essentiel des profils d'altération du Massif Armoricain et du Massif Central s'est développé, avec pour conséquence la création d'un horizon fissuré de 50 à 70 m d'épaisseur sous 20 à 30 m d'altérites meubles (Lachassagne, Wyns et al., 2001 ; Wyns, Baltassat et al., 2004).

Application à la prospection et à la gestion des aquifères de socle

Les différents horizons constituent un aquifère composite, dont les propriétés hydrogéologiques sont optimales dans les secteurs où les trois compartiments décrits sont présents et où ils combinent au mieux leurs caractéristiques hydrodynamiques. L'existence d'une fracturation tectonique ne constitue ainsi pas la seule condition pour assurer de bonnes propriétés hydrogéologiques.

À l'échelle régionale, les couches altérées sont parallèles aux paléosurfaces d'aplanissement, c'est-à-dire à la surface topographique contemporaine de l'altération. Ces paléosurfaces peuvent avoir été érodées. La morphologie de ces horizons peut aussi être influencée par des variations lithologiques ou liées à la fracturation tectonique.

Sur la base de la connaissance de ces principes génétiques, il est relativement aisé de cartographier l'altitude de la limite entre les altérites et l'horizon fissuré sur le principe de la connaissance de son épaisseur moyenne pour chaque type de lithologie (Fig. 6a) (Lachassagne, Wyns et al., 2001).

L'analyse statistique des résultats de forages montre des relations entre les propriétés hydrogéologiques et la lithologie. La cartographie géologique classique et la cartographie des horizons d'altération des roches de socle sont complémentaires pour évaluer a priori la ressource en eau du socle. Elles permettent de tracer, sur la base d'une approche géologique pure croisée avec des statistiques et des observations hydrogéologiques, des secteurs très favorables et d'autres moins (Lachassagne, Wyns et al., 2001).

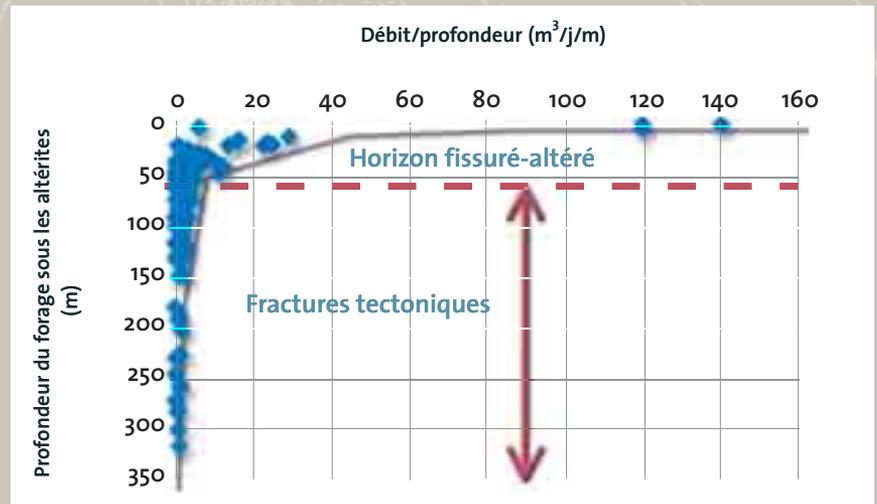


Fig. 5 : Exemple de la distribution verticale des débits spécifiques.

En abscisse : débit total du puits, au soufflage [m³/d]/épaisseur de la formation recoupée [m], mesurée à partir de la base des altérites. En ordonnée : épaisseur de la formation recoupée mesurée à partir de la base des altérites. Exemple de puits forés dans des secteurs présentant une couverture d'altération (granites jurassiques, région de Jeonju-Wanju, Corée du Sud).

Fig. 5: Example of the vertical distribution of specific yield.

(x axis: total well discharge by air-lift pumping [m³/d]/thickness of the drilled formation [m], measured from the bottom of the alterite) plotted against (y-axis) the thickness of the drilled formation underlying the alterite [m] for wells drilled in areas having a regolith (Jurassic granite, Jeonju-Wanju region, South Korea).

© BRGM-lm@gé / EAU - P. Lachassagne

“
La qualité des eaux qu'ils contiennent, peu minéralisées et semi-protégées des agressions de la surface, est généralement bonne ; leur faible profondeur impose la vigilance.
”

La cartographie par analyse multicritères (Fig. 6b), développée sur cette base, autorise, à l'échelle régionale, une cartographie prévisionnelle du taux de réussite des campagnes de forage, très utile pour programmer l'aménagement d'un territoire.

Le type de cartes décrit ci-dessus peut être logiquement utilisé pour programmer les travaux à une échelle plus limitée. Pour des projets d'hydraulique villageoise aux débits modestes, l'implantation pourra se faire sur la base de critères socio-économiques et de connaissances géologiques et hydrogéologiques.

Pour des besoins plus importants, les cibles hydro-géologiques classiques peuvent être recherchées, en complément des fissures d'altération. La configuration optimale est constituée par la présence d'un couloir de fracturation tectonique et d'horizons altérés bien préservés, saturés en eau, d'extension latérale significative, avec une configuration morphologique favorable à la recharge par les précipitations. Les méthodes utilisées pour localiser et caractériser ce type de sites reposent sur des prospections géologiques complémentaires, de la prospection émanométrique radon et sur des méthodes géophysiques.

La méthode géophysique RMP (Résonance Magnétique Protonique) a montré tout son intérêt en contexte de socle pour caractériser la profondeur des niveaux piézométriques, la puissance, ainsi que la porosité des différents horizons de la frange altérée (Wyns, Baltassat et al., 2004).

L'intensification de l'exploitation des aquifères de socle en Europe ou en Afrique, les surexploitations dans certaines régions comme l'Inde requièrent la mise en œuvre d'outils de gestion. Les méthodes de cartographie de la géométrie et des propriétés hydrodynamiques de ces aquifères fournissent des éléments de base qui permettent maintenant de répondre à ces besoins.

L'étude des fluctuations du niveau d'eau au sein de la nappe est réalisable à l'échelle du bassin versant et permet de quantifier les différents termes du bilan hydrologique. L'évaluation de ces paramètres a été mise au point et testée en Inde. Ces méthodes autorisent la gestion de la ressource à l'échelle du bassin versant

Fig. 6 : Bassin versant lozérien de la Truyère (Lozère), 700 km².

Fig. 6a : Carte de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré - altéré. Légende : couleurs jaune, rouge, noir : épaisseurs croissantes d'altérites, vert : horizon fissuré-altéré, blanc : roche saine.

Fig. 6a : Map of the thickness of the alterite and the fractured-weathered horizon. Yellow, red, black: alterite layers of increasing thickness; green: fractured-weathered horizon; white: solid rock.

© BRGM-Im@gé / CDG - R. Wyns

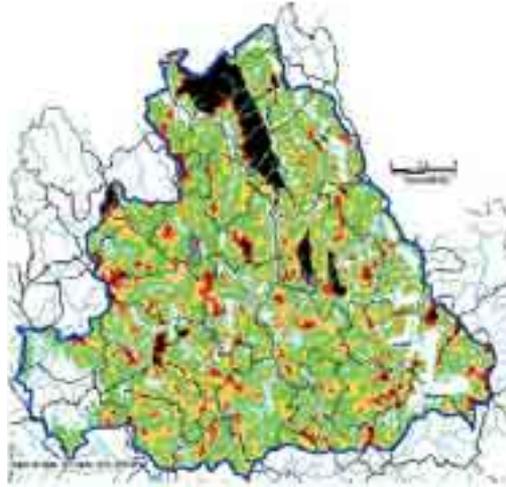
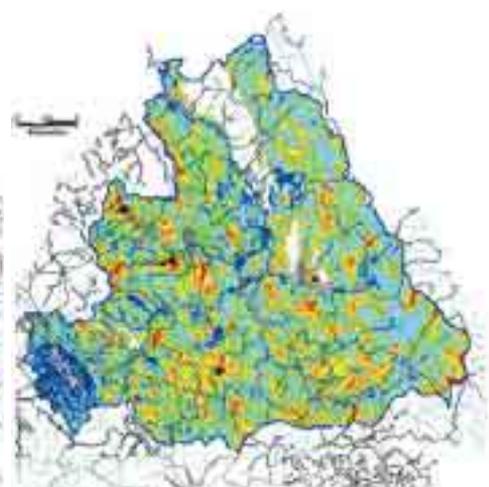


Fig. 6b : Carte des potentialités en eau souterraine (analyse multicritères). Légende : du bleu foncé au rouge : potentialités en eau souterraine croissantes.

Fig. 6b: Map of groundwater potential (multivariate analysis). Dark blue to red: increasing groundwater potential.

© BRGM-Im@gé / EAU - P. Lachassagne



(Fig. 7) et permettent de construire des modèles mathématiques maillés multicouches (Lachassagne, Ahmed et al, 2001).

La prévision de la qualité des eaux souterraines et de la durabilité des pollutions d'origine anthropique passe, entre autres, par l'évaluation de la ressource renouvelable et des réserves. Dans le massif armoricain, plusieurs études ont montré que 80 à 85 % de la réserve est contenue dans l'horizon fissuré (Fig. 8) (Wyns, Baltassat et al., 2004).

Fig. 7 : Prévisions de l'évolution de la réserve d'eau souterraine pour différents scénarios de politiques agricoles. Bassin versant de Maheshwaram, Andhra Pradesh, Inde.

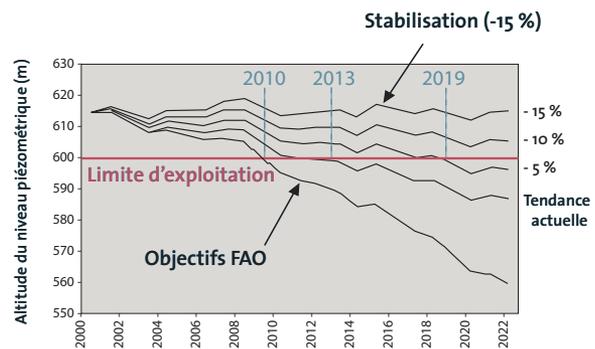
Légende : graphique supérieur : - 5 %, - 10 %, - 15 % : réduction de 5, 10 et 15 % des prélèvements d'eau souterraine pour l'irrigation, "Tendance actuelle" : poursuite de l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation selon la tendance actuelle, FAO : augmentation des prélèvements afin de satisfaire aux objectifs de production des scénarios FAO.

Schémas inférieurs : niveaux piézométriques actuels au sein de l'aquifère (2002) et prévision pour 2022 dans le cas de la poursuite de l'augmentation des prélèvements pour l'irrigation selon la tendance actuelle.

Fig. 7: Predicted evolution of groundwater reserves for different agricultural policy scenarios. Maheshwaram, Andhra Pradesh (India) catchment.

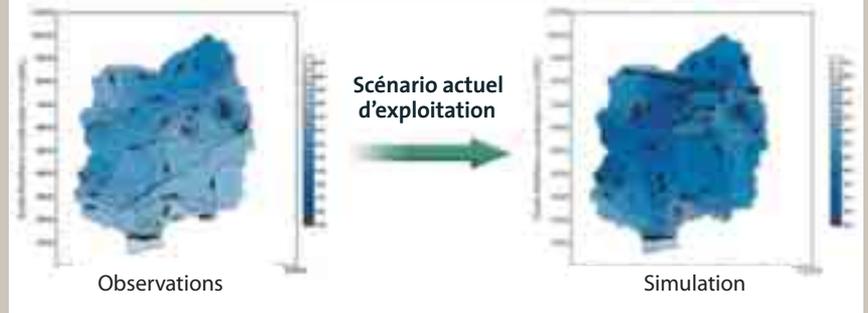
Upper graph: -5%, -10%, -15%: 5, 10 and 15% reduction of groundwater withdrawal for irrigation; "Tendance actuelle": continuation of the current trend of increased pumping for irrigation; FAO: increased withdrawal in order to meet the production objectives of FAO scenarios. Lower graph: current water levels in the aquifer (2002) and predictions for 2022 if increase in withdrawal for irrigation continues to increase according to the current trend.

© BRGM-Im@gé / EAU - B. Dewandel et J.M. Gandolfi



2002

2022



Observations

Simulation

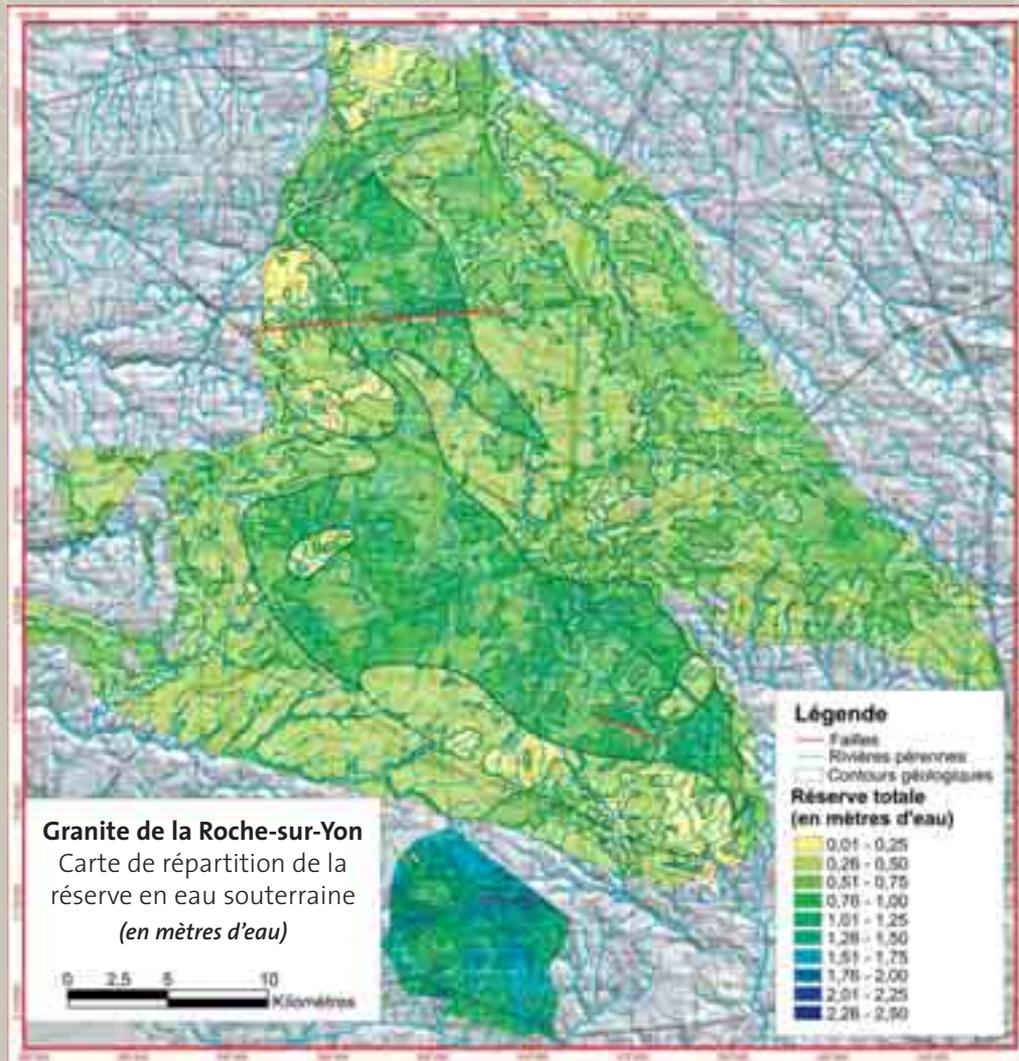


Figure 8 : Carte de la réserve en eau souterraine. Granite de La Roche-sur-Yon (Vendée).
Nota : seules les failles dont le jeu affecte la couverture d'altération ont été figurées.
Figure 8: Map of groundwater reserves. La Roche sur Yon granite (Vendée, France).
N.B. Only the faults whose displacement has affected the regolith are shown.
 © BRGM-lm@gé / CDG - R. Wyns



Bedrock covers large surfaces of the Earth, Europe and France. Water resources in hard rock or bedrock aquifers are modest in terms of available discharge per well compared to those in other types of aquifers -porous, karstic or volcanic-. They are, however, geographically widespread and therefore well suited to scattered populations in bedrock regions with moderate population densities, and are a significant factor in the economic development of these regions, in particular in arid or semi-arid areas where there is little surface water. Significant advances have recently been made in our knowledge of the origin, geometry and functioning of hard rock aquifers. Newly developed geological and hydrogeological concepts find numerous practical applications-from the mapping of groundwater potential on a regional scale, through well siting techniques and methods (increasing the success rate in terms of exploitable discharge), to water resource management at the catchment scale, crucial in areas where groundwater is heavily exploited (in India, for example).

Conclusion

Les ressources du socle sont modestes, ce qui a conduit à chercher des solutions peu coûteuses, souvent indirectes, parfois très imaginatives pour détecter ces eaux précieuses, en particulier en contexte aride ou semi-aride. À l'inverse des aquifères sédimentaires, les propriétés des réservoirs sont dissociées : les altérites accumulent l'eau, les fissures lui permettent d'alimenter les forages. Sur la base de cette observation, l'analyse morphologique, la lithologie, les processus d'altération, la structure apportent un appui considérable à la reconnaissance de ces réservoirs peu profonds mais subtils, mais aussi et surtout à la gestion de leur ressource en eau et à la préservation ou la restauration de sa qualité. ■

“
 L'intensification de l'exploitation des aquifères de socle en Europe ou en Afrique, les surexploitations avérées dans certaines régions du monde comme l'Inde requièrent la mise en œuvre d'outils de gestion.”

Gestion des sites et sols pollués

Risques pour les eaux souterraines

La qualité des eaux souterraines apparaît aujourd'hui essentielle dans la politique nationale de gestion des sites et sols pollués, avec pour objectif principal la sécurité sanitaire de l'homme. Il convient désormais de considérer aussi la protection et la préservation de la qualité initiale de l'eau comme primordiale.

*Eau polluée par des métaux lourds et des oxydes de fer.
Water contaminated by heavy metals and iron oxide.*

©BRGM im@gé - D. Cazaux



Dominique Darmendrail

CHEF DU SERVICE
ENVIRONNEMENT INDUSTRIEL
ET PROCÉDÉS INNOVANTS - BRGM
d.darmendrail@brgm.fr

Romain Chartier

INGÉNIEUR DE PROJET
SERVICE ENVIRONNEMENT
INDUSTRIEL ET PROCÉDÉS
INNOVANTS - BRGM
r.chartier@brgm.fr

Dominique Guyonnet

RESPONSABLE D'UNITÉ
DÉCHETS ET STOCKAGE
SERVICE ENVIRONNEMENT
INDUSTRIEL ET PROCÉDÉS
INNOVANTS - BRGM
d.guyonnet@brgm.fr

La préservation des ressources en eau, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, est une priorité nationale. Compte tenu de l'important historique industriel de la France, de nombreuses ressources en eau subissent une forte pression liée à la présence d'anciens sites industriels dont les sols sont contaminés par diverses substances. Devant ce passif industriel, le Ministère chargé de l'environnement a mis en place, depuis plus d'une dizaine d'années, une politique de gestion des sites et sols (potentiellement) pollués.

Deux approches permettent d'aider à la gestion des sites et sols pollués. La première fait appel à l'utilisation de seuils, définis par rapport à un contenu total du sol en polluant. Ces seuils servent à identifier des sols nécessitant un traitement particulier et à définir des objectifs de traitement (jusqu'ou dépolluer ?). Cette approche a été privilégiée pendant de nombreuses années notamment aux Pays-Bas [1].

L'autre approche est fondée sur la notion de risque [2] et suppose que le problème n'est pas seulement lié à la présence d'un polluant dans le sol, mais plutôt au risque qu'une cible soit exposée à ces polluants et subisse un dommage. Cette approche a été privilégiée en France [3] en raison notamment de la variété des contextes géologiques, et donc de la difficulté de définir des seuils génériques applicables dans toutes les régions françaises.

Parmi les cibles considérées, il y a bien sûr l'homme, mais aussi les ressources en eau, surtout souterraine. L'eau souterraine est non seulement un "vecteur" par lequel l'homme pourrait être amené en contact avec les polluants contenus dans les sols, mais également une cible à part entière. Compte tenu de l'importance stratégique des ressources en eau souterraine, le législateur les a identifiées comme cible prioritaire.

Cet article présente les principales lignes de la démarche adoptée au niveau national, certains aspects qui posent questions, ainsi que des travaux de recherche relatifs au traitement des incertitudes inhérentes à l'évaluation des risques.

Principes de l'approche nationale

Les principes et les conditions de mise en œuvre de la politique relative aux sites et sols pollués en France sont très proches de ceux retenus par d'autres pays européens confrontés à la même problématique, et s'inscrivent dans le cadre de la législation sur les installations classées. Ces principes sont résumés comme suit :

- ▶ **prévenir**, afin que les sites industriels en activité ne deviennent pas des sources de pollution des sols,
- ▶ **traiter** les sites pollués, selon leur usage, pour que la protection de l'homme et de l'environnement soit assurée,
- ▶ **connaître** les risques potentiels et rendre l'information accessible au plus grand nombre,
- ▶ **garder (ou reconstituer) la mémoire**, de sorte que tout nouvel aménagement soit précédé des études et travaux nécessaires au maintien de cette protection des usages.

Un aspect essentiel de cette politique est la notion d'usage. On ne cherche pas à systématiquement restituer toutes les fonctions envisageables d'un sol (agricole, résidentielle, industrielle, etc.), mais à atteindre un objectif de qualité du sol qui correspond à un risque résiduel jugé acceptable pour un usage donné à un moment donné, d'où la nécessité de garder la mémoire. En effet, un site réhabilité pour un usage industriel, ne devra pas à l'avenir être destiné à un usage résidentiel, par exemple, dont le risque résiduel serait différent.



Pollution des eaux par des hydrocarbures.
Water contaminated with petroleum hydrocarbon substances.

© BRGM-im@gé

La notion de risque et de son évaluation (au sens d'une prédiction) est centrale dans cette politique. Or toute prédiction étant entachée d'incertitudes, le guide méthodologique relatif à l'évaluation détaillée des risques [2] insiste tout particulièrement sur le traitement de ces incertitudes et sur la gestion des risques. Parfois, des mesures simples, comme la clôture du site, l'enlèvement des fûts stockés à l'air libre, la mise en place d'une surveillance ou d'un piège hydraulique, permettent la réduction du risque immédiat pour l'homme et l'environnement et de l'évolution de la pollution.

Les objectifs de risque résiduel pour la santé humaine, après un éventuel traitement des sols, sont définis par la circulaire du 10 décembre 1999 et tiennent compte de l'usage prévu et de l'état de l'environnement du site, ainsi que des techniques de traitement disponibles. La circulaire précise les niveaux de risques sanitaires acceptables, considérant une exposition humaine aux différentes substances polluantes. Dans le cas des polluants cancérigènes, la fixation des objectifs de dépollution s'effectue en référence à un excès de risque⁽¹⁾ de 10^{-5} , le niveau 10^{-4} pouvant être parfois toléré selon les cas.

Un site traité pour un usage futur donné, ne peut pas être ultérieurement affecté à un nouvel usage incompatible avec la pollution résiduelle, sans que des études et travaux nécessaires ne soient entrepris. Des dispositifs réglementaires de restriction d'usages sont donc parfois mis en place, et sont décrits dans un guide spécifique (voir www.fasp.info). L'existence de deux sites internet relatifs aux inventaires des sites pollués par des substances chimiques (BASOL⁽²⁾ et BASIAS⁽³⁾) permet l'accès au public à la connaissance des risques potentiels.

“ Les ressources en eau souterraine ont été identifiées par le législateur comme constituant une cible prioritaire. ”

⁽¹⁾ Probabilité de survenue d'un cancer attribuable à la pollution du site, durant la vie d'une personne exposée.

⁽²⁾ L'inventaire mené par le BRGM, à la demande de l'Etat et des partenaires régionaux, consiste à recueillir et communiquer des données brutes relatives aux sites industriels sans présumer de l'éventuelle pollution des sites. C'est pourquoi la base de données BASOL a été mise en place par l'Etat pour dresser l'inventaire des sites pollués ou susceptibles de l'être. Le site internet (<http://basol.ecologie.gouv.fr>) comprend aujourd'hui environ 3800 sites et est actualisé régulièrement par les DRIRE après validation par le ministère de l'écologie et du développement durable.

⁽³⁾ La base de données nationale BASIAS recense, de façon large et systématique, tous les sites industriels abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement, conserve la mémoire de ces sites, et fournit des informations utiles aux acteurs de l'urbanisme, du foncier et de la protection de l'environnement. (<http://basias.brgm.fr>)

Les eaux souterraines : une cible à part entière

La méthodologie de l'évaluation détaillée des risques liés aux sites et sols pollués, considère l'eau souterraine comme une cible à part entière dont il s'agit de préserver la qualité. La Figure 1 illustre un exemple de schéma conceptuel relatif à une pollution des eaux souterraines ainsi que la notion d'usage évoquée précédemment. Les objectifs de qualité sont sélectionnés en référence aux valeurs de concentration dans les eaux destinées à la production d'eau potable [4].

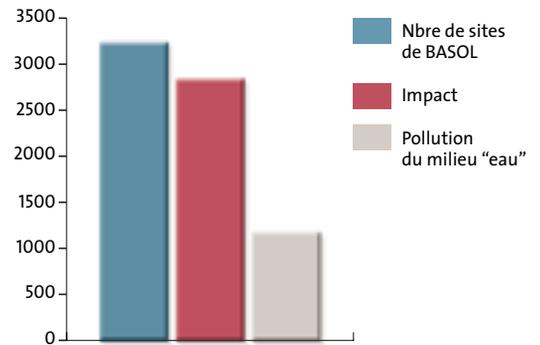
L'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau a pour objectif de quantifier le risque. Cela peut conduire à définir des objectifs de réhabilitation en terme de concentrations résiduelles dans les sols et les eaux, près de la source de pollution, ce qui permet de garantir des concentrations résiduelles acceptables dans les milieux, selon l'usage prévu. Les cibles à prendre en compte sont multiples : les captages actuels (eau potable, industrielle ou agricole, etc.) et les ressources jugées primordiales pour le futur (zones à protéger).

Une des difficultés actuelles dans la mise en œuvre de la méthodologie nationale est que l'on considère généralement l'effet d'un site unique sur la pollution des eaux souterraines, alors que l'impact conjoint de plusieurs sites pollués (même faiblement pris individuellement) sur un même aquifère peut entraîner un dépassement des critères de qualité. Il est donc nécessaire d'envisager une approche globale, avec, si besoin, une évaluation des risques cumulés pour les ressources en eaux (travaux en cours par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable).

Fig. 2 : Nombre de sites répertoriés dans la base BASOL pour lesquels on a constaté un impact sur les ressources en eau souterraine (état 2002).

Fig. 2: Number of sites in the BASOL database for which an impact on groundwater resources has been identified (in 2002).

Source : BRGM



Une telle approche globale nécessite un important effort de suivi de la qualité de la ressource en eau souterraine. La mise en place d'un réseau de surveillance adapté (nombre et localisation des ouvrages, caractéristiques techniques, ...) nécessite une connaissance approfondie du contexte géologique et hydrogéologique, et constitue un préalable indispensable à la connaissance des impacts réels et à la prédiction des risques futurs (voir guide sur www.fasp.info).

Un nombre croissant de sites industriels est soumis à une surveillance. Ceci devrait conduire à une meilleure connaissance de la situation en matière d'impact sur les ressources et donc à revoir à terme les bilans actuels. Un bilan partiel peut déjà être tiré des éléments d'information du tableau de bord des actions de l'administration à titre préventif ou curatif : début 2003, il apparaît que 88 % des sites ont généré un impact sur l'environnement, dont 37 % provoquant une pollution des eaux de surface ou souterraines (Fig. 2).

La directive européenne cadre sur l'Eau recommande d'identifier les pressions sur les eaux souterraines. Cela a conduit l'Agence Européenne de l'Environnement à mettre en place un indicateur de suivi des sites pollués pouvant avoir un impact sur les ressources en eau : un état de la situation européenne devrait être disponible dans les 2 - 3 ans à venir.

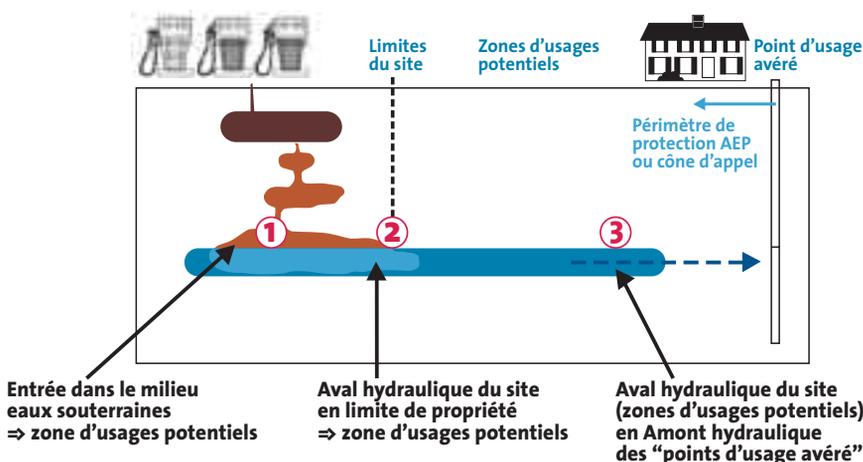


Fig. 1 : Exemple de schéma conceptuel relatif à une pollution des eaux souterraines.

Fig. 1: A schematic diagram of groundwater contamination.

Source : BRGM - EPI

“*L'estimation du risque est un aspect essentiel de la démarche nationale relative aux sites et sols pollués.*”

Traitement des incertitudes

L'estimation du risque est un aspect essentiel de la démarche nationale relative aux sites et sols pollués. Or le risque est fonction de nombreux facteurs dont certains ne sont connus que de manière très imparfaite. C'est pourquoi le BRGM développe depuis une dizaine d'années des méthodologies permettant, d'une part, de représenter l'incertitude relative à l'information disponible et, d'autre part, d'intégrer cette incertitude dans l'estimation du risque.

Un aspect essentiel de la problématique des incertitudes a trait à la nature de l'information réellement disponible. On distinguera ici deux types d'incertitudes qui sont fondamentalement différents :

- ▶ la variabilité aléatoire, relative aux processus dont le résultat est le fruit du hasard,
- ▶ l'ignorance partielle, relative à une information incomplète ou imprécise.

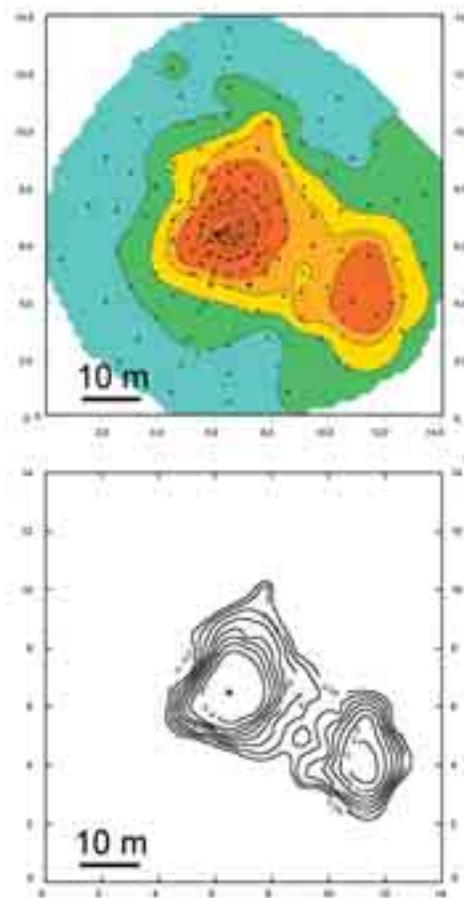
Une variabilité de type aléatoire se représente communément à l'aide d'une distribution de probabilité, ce qui suppose que l'on dispose de suffisamment de données pour identifier une distribution qui soit statistiquement représentative de l'information. Dans un contexte d'évaluation des risques, les données disponibles ne permettent pas toujours d'identifier une telle distribution unique ; l'information disponible est plutôt de nature incomplète/imprécise (par exemple, jugement d'expert ou mesures en nombre très limité). Sélectionner a priori une distribution de probabilité unique pour représenter une telle information revêt alors un côté arbitraire qui peut avoir des conséquences très importantes sur l'estimation du risque.

Dans le cas d'informations de nature incomplète/imprécise, d'autres modes de représentation de l'information existent. Une approche, expérimentée au BRGM, fait appel aux distributions de possibilité (ou nombres flous [5]), qui enrichit la notion de simple intervalle min-max en exprimant des préférences en son sein.

Pour faire le lien avec les probabilités, on peut montrer qu'une distribution de possibilité représente une "famille" de distributions de probabilité : la famille de toutes les distributions comprises entre une distribution haute et basse, l'écart entre ces distributions étant une mesure de notre ignorance.

Dans la pratique de l'évaluation des risques, on a fréquemment affaire à ces deux types d'incertitude (variabilité et ignorance partielle). La méthode dite "hybride" [6] permet de combiner ces deux paramètres. La Figure 3 illustre un exemple de carte du "degré de possibilité" appliqué à l'estimation du risque sur un site pollué. Il s'agit dans ce cas d'évaluer le risque d'exposition à des métaux lourds. A partir de cartes de teneur en polluants, de modèles d'exposition et des informations disponibles sur les caractéristiques du site, on calcule la probabilité de dépasser une dose admissible d'exposition aux polluants.

Cette approche d'évaluation du "degré de possibilité" permet de dresser des cartes visualisant l'incertitude associée à l'évaluation du risque. Ce type de carte est un appui à la prise de décision, notamment pour établir d'éventuelles servitudes relatives à l'usage des sols contaminés.



◀ **Fig. 3 : Pollution de sols par des métaux lourds.**
Haut : carte des teneurs en cadmium dans le sol en µg/l.
Bas : carte du degré de possibilité (probabilité haute) de dépasser une certaine dose d'exposition admissible. Plus on s'approche des sources d'émission (triangle), plus le degré de possibilité de dépasser la dose admissible est élevé.

Fig. 3: Soil contamination by heavy metals.
Upper map: Map of cadmium contents in the soil in µg/l.
Lower map: Map of degree of possibility (high probability) of exceeding a certain admissible dose of exposure. The closer we are to the emission sources (triangle), the higher the degree of possibility of exceeding the admissible dose.

Source : BRGM



Constats et orientations

Une application trop stricte des principes de la démarche nationale en matière de gestion des sites et sols pollués ne va parfois pas vers une meilleure préservation de la qualité des ressources en eau souterraine.

En effet, la notion d'usage, primordiale dans cette démarche, présente des limites dans certaines situations particulières. C'est le cas pour les nappes superficielles historiquement polluées dont aucun usage n'est envisagé, pour les nappes peu productives et donc inexploitable comme ressource, ou pour les nappes parfois localement polluées entraînant juste des restrictions d'usage.

Diagnostic de site potentiellement pollué : sondages à la pelle mécanique
Diagnosis of a potentially contaminated site: backhoe excavation

© BRGM im@gé



Dans ces cas et d'après la démarche nationale, l'absence d'usage possible des eaux conclut à l'absence de cibles et donc à l'absence de risques via la voie eau. Par conséquent, aucune mesure particulière limitant les effets des pollutions ponctuelles sur la qualité des eaux n'est prise.

Il apparaît important que les objectifs d'amélioration de la qualité des eaux reposent en priorité sur la qualité initiale des eaux et sa dégradation, effective ou potentielle, plutôt que sur le risque sanitaire aval uniquement.

Par ailleurs, le critère d'acceptabilité du risque s'exprime en niveau de qualité qui, pour les eaux, repose soit sur un risque sanitaire pour l'homme, soit sur des critères réglementaires (ex. potabilité des eaux), tous deux définis à l'échelle européenne et nationale. Ceci se traduit généralement, au niveau des mesures de gestion des pollutions des eaux souterraines, par l'application d'aucun objectif de dépollution si :

- ▶ les eaux ont une qualité initiale faible ne répondant pas aux critères de qualité applicables (car le risque inacceptable n'est pas attribuable à la pollution étudiée, même importante) ;
- ▶ la pollution générée, même importante par rapport à l'état initial, n'entraîne pas de dépassement des critères de qualité (le risque demeure en effet acceptable).

Seule une limitation de la pollution peut être alors envisagée afin de préserver un usage donné, mais ce indépendamment de l'état initial.

Sans remettre en cause la légitimité des évaluations des risques pour les sites pollués, la prise en compte de la seule composante risque (à un moment donné) limite parfois les possibilités de préservation et de protection de la qualité des eaux souterraines. Pourtant, des pollutions ultérieures pourraient entraîner un dépassement des critères de qualité, nécessitant alors une nouvelle évaluation de la situation.

Les directives européennes sur les eaux, en vigueur ou en préparation, évoquent à la fois des critères de qualité des eaux et des objectifs d'amélioration de cette qualité. Ces critères de qualité ne doivent pas constituer les seuls éléments à prendre en compte pour la gestion des pollutions ponctuelles. Il apparaît important que les objectifs d'amélioration de la qualité des eaux reposent en priorité sur la qualité initiale des eaux et sa dégradation, effective ou potentielle, plutôt que sur le risque sanitaire aval uniquement.

Quant au traitement des incertitudes sur l'évaluation des risques, des travaux sont en cours et visent notamment à définir comment de nouvelles méthodologies peuvent s'adapter à un contexte de communication sur les risques, le terme même de probabilité, voire de possibilité, devant être utilisé avec beaucoup de précaution sur ce sujet. ■



Growing awareness of both the quantitative and qualitative importance of water resources has led to the implementation of policies specifically aimed at better protecting these resources. France has been developing, for more than 10 years, a policy for the management of contaminated sites and soils that is based on various notions including the precautionary principle, the availability of information to the majority of people, and above all, the determination of thresholds of acceptable risk according to specific uses. This article presents the principal characteristics of France's national policy and describes recent research in treating uncertainties in risk evaluation.

Se former aux Sciences de la Terre



Quarante ans d'expérience dans le domaine du sol et du sous-sol

- Vous êtes acteurs et décideurs de l'environnement et de l'aménagement des territoires, services techniques de l'État et des Collectivités territoriales, entreprises, chambres consulaires, bureaux d'études et de contrôle, experts, maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre...
- Nous vous proposons des formations présentées sur catalogue dans des domaines très divers : sites et sols pollués, eau, aménagement durable et risques naturels, cartographie et connaissances géologiques, systèmes d'information numérique, géothermie, analyses et procédés en environnement, ressources minérales et après mine.
[\(http://formation.brgm.fr/\)](http://formation.brgm.fr/)
- Pour s'adapter au mieux à vos besoins, nous proposons des formations à la carte. Nous mettons en place chez vous une formation spécifique, « sur mesure », ajustée à un besoin précis.



Contactez nous : brgmformation@brgm.fr

 **brgm**formation

Increasing shortages of water and deterioration of water quality across the world are prompting a resurgence of research on aquifer systems.

In this matter, new aquifer types have to be studied and research programmes have to investigate the water resource on a larger scale. BRGM, active in this domain, develop such projects with partners in many countries, like Estonia, Russia, Egypt, Poland, Saudi Arabia or Bangladesh.

A partnership with India has also resulted in the Indo-French Research Centre for Groundwater.

Formation de chimistes à l'analyse ionométrique de l'eau.
Training of chemists to water analysis by ionometry.

© BRGM im@gé

Sustainable water resource management and international cooperation: the example of Russia, Estonia and other countries



COORDINATION :

Jean-Claude Guillaneau
 DIRECTOR
 INTERNATIONAL DIVISION - BRGM
 jc.guillaneau@brgm.fr



Didier Pennequin
 HEAD, WATER DIVISION - BRGM
 d.pennequin@brgm.fr



PEIPS EXAMPLE :

Hubert Machard de Gramont
 HYDROGEOLOGIST
 WATER DIVISION - BRGM
 h.machard@brgm.fr



François Pinard
 DEPUTY DIRECTOR
 INTERNATIONAL DIVISION - BRGM
 f.pinard@brgm.fr

Jean-Pierre Houix
 PROJECT MANAGER
 WATER DIVISION - BRGM
 jp.houix@brgm.fr

Increasing population growth worldwide is putting increasing pressure on water resources, often resulting in falling water levels and/or deterioration in water quality. In developing countries with arid or semi-arid climates, there are already water shortages as demand outstrips supply. This could exhaust existing water resources.

In Western and Northern Europe, where rainfall is abundant, pressure on water resources stems primarily from industrial activities, with water quality often degraded by pollutants from human activity contaminating nearby rivers and aquifers.

Already, hundreds of millions of people cannot access or afford safe drinking water, or basic sanitation. This state of affairs was acknowledged by the World Summit on Sustainable Development in Johannesburg in 2002. The Millennium Development Goals consequently set out ambitious goals to redress the situation, for example, to halve the number of people lacking access to safe drinking water or basic sanitation facilities.

Research that directly addresses these problems includes programmes on discontinuous aquifer systems, such as karsts and hard rocks. These systems were neglected until two



decades or so ago because of their complexity, and poor knowledge of their functioning. Karsts are also vulnerable to pollution, while hard rocks tend to have poor aquifer yields. Interest is now being rekindled, however, both because of increasing water shortages in many developing countries, and the fact that such aquifer systems extend over large parts of the world. Research efforts have recently yielded promising methods and tools to allow more efficient use of these aquifer systems.

Research at the basin-scale and integrated water resources management drawing on both surface and groundwater is also helping to alleviate water shortages. It is generating methodologies to model and simulate the behaviour of hydrological systems, and field techniques - in particular, artificial recharge systems - to reduce seasonal surface water loss.

Research on water quality and pollution also has direct field applications. For example, a methodology named "Geochemical background" was developed to assess natural groundwater quality based on analyses of interactions between water and rock. This is particularly important, as the EU Water Framework Directive (E-WFD) requires attaining high quality of surface and groundwater resources by 2015.

Research on point source, and non-point source pollution such as pesticides and nitrates contributes to improving field methods and mathematical models for solving contamination problems.

This paper illustrates this through several examples:

- ▶ transboundary water management in Russia and Estonia,
 - ▶ water quality in Egypt,
 - ▶ implementation of the EU Nitrate directive in Poland,
 - ▶ groundwater management in Bangladesh and in Saudi Arabia,
- and a short introduction to the Indo-French Centre for Groundwater Research.

To mitigate the risk of so-called "water wars", management of transboundary water resources in regions of scarcity has become one of the major challenges of the 21st century. The problem in rainy Western and Northern Europe is different, being one of water quality rather than quantity.

The European Union (EU) Water Framework Directive requires member states to coordinate management of transboundary catchment areas. But outside this EU framework, there are few specific international provisions. With joint funding from the French Environmental Fund (FFEM) and the LIFE programme,

BRGM has been working since 2002 to set up joint management of water resources between Estonia and Russia, in the Lake Peipsi basin, on the new eastern border of Europe.

Since its accession to the European Union (EU), Estonia has had to comply with existing EU environmental regulations. Work on the transboundary Lake Peipsi catchment basin is specifically aimed at verifying Estonia's capacity to comply with the provisions of the EU Water Framework Directive (WFD).

Within this framework, technical assistance focuses on:

- ▶ defining and characterizing groundwater resources;
- ▶ characterizing qualitative (pollution) and quantitative (extraction) pressures on water resources, and looking for means of rehabilitating and improving their management;
- ▶ developing a geographical and metadata information system, chiefly for water resources;
- ▶ analysing water usage, and possible mechanisms to recover costs of water provision, and carrying out the necessary economic analyses associated with applications for exemptions relating to water bodies with respect to the 2015 deadline;
- ▶ contributing to developing a management plan for the Lake Peipsi hydrographic district.

The challenge of restoring and protecting underground water quality

The project will provide the Estonian Ministry of the Environment with the technical tools to analyse and manage the country's water resources, with political and economic decisions being the sole responsibility of the national authorities. The studies are aimed at defining the technical measures needed to reduce pollution and rehabilitate contaminated environments. They should also lead to the establishment of regulations concerning the recovery of the costs of exploiting and treating water resources, so that these can eventually be borne by the users, as required under the WFD.

Lake Peipsi on the border between Estonia and Russia.
Le lac Peipsi à la frontière entre l'Estonie et la Russie.

Source : REGIO

To mitigate the risk of so-called "water wars," management of transboundary water resources in regions of scarcity has become one of the major challenges of the 21st century.

Rehabilitation and sustainable development of the transboundary waters of Lake Peipsi; preliminary findings and initial orientations

Impact of mining on aquifer dynamics

Estonia has rich reserves of oil shale, and the main environmental problems are closely related to intensive mining operations.

In the region of Lake Peipsi, underground water is supplied by four main aquifers formed by superimposed layers of Palaeozoic strata all tilted downwards to the south. Almost everywhere, the shallowest of these aquifers consist of glacial quaternary continental deposits (former moraines). The best known is the fossil valley of Vasavere (in yellow in figure 1) in the region of Lake Kurtna. Of excellent quality, it supplies around 20% of underground water for urban consumption, and is also used for mixing with other deeper aquifers that have higher salt levels.



Peipsi Lake (Estonia) . ▶
Lac Peipsi (Estonie).

Source : Big Lakes II
(http://www.biglakes.net/peipsi/image_library)

▶ BANGLADESH - GROUNDWATER RESOURCES AND HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS IN, AND AROUND, KHULNA CITY

BRGM and its partner ANTEA are about to complete a project for the Local Government Engineering Department (LGED), Government of Bangladesh, aimed at evaluating groundwater resources in the region of Khulna, the third largest city in Bangladesh.

Khulna is located in the Ganges delta, and water resources in the area are characterized by tidal rivers and several superimposed aquifers, with a fragile equilibrium between fresh water lenses and salt-water intrusions.

The city's drinking water supply depends entirely on groundwater resources, which must be shared with increasing demands from irrigation. Over-exploitation of groundwater resources has resulted in lowered groundwater tables and

pollution of drinking water wells by salt water. To improve the situation, BRGM and ANTEA were asked by the World Bank to make a quantitative and qualitative assessment of groundwater resources, and to elaborate a water resources development plan for the region.

The project included drilling of 51 exploration wells down to a depth of 350 meters, to determine the geometry of the aquifer system, and carrying out several scientific tests in the wells - well logging, pumping tests and water sampling - to determine the physico-chemical characteristics of individual soil layers. It also involved setting-up a monitoring network, purchasing scientific equipment, and training engineers from the Government in water exploration and

management techniques.

The successful completion of this work has allowed reconstruction of the aquifer geometry, and determination of the mechanisms of groundwater recharge. Areas for the installation of new wells have been delimited, and recommendations formulated for future groundwater exploration.

A hydrodynamic groundwater model has been constructed to determine the sustainability of the groundwater resources in various development scenarios, taking into account the growing demand for drinking water and irrigation water. Based on these results a water resources development plan has been elaborated.

GÉOTHERMIE, CORROSION, TRAÇAGE DE FUITES...

Pionnière de l'exploitation de la géothermie pour chauffage, la **Compagnie Française de Géothermie (CFG Services)** offre une gamme de prestations élargie en France et à l'étranger :

- ✓ production d'électricité par géothermie
- ✓ expertise en corrosion et traitement des fluides,
- ✓ monitoring en temps réel des risques de bio-corrosion,
- ✓ détection de fuites par traçage à l'hélium.



3, avenue Claude Guillemin
45060 Orléans cedex 2
tél. : 02 38 64 31 22 • fax : 02 38 64 32 83
mail : c.cotiche@cfg-brgm.fr



Centrale de Bouillante (Guadeloupe)
© BRGM - 2005

► SAQ AQUIFER AND ITS IMPORTANCE IN THE DEVELOPMENT OF SOCIOECONOMIC ACTIVITIES IN MAJOR PROVINCES IN SAUDI ARABIA

The Kingdom of Saudi Arabia occupies an area of about 2.2 M km² of the Arabian Peninsula, and sits between two huge bodies of water, the Red Sea and the Arabian Gulf. It faces water scarcity as it is in an arid region with little rainfall, and lacks lakes, running rivers, streams, and flowing springs.

The government is recognized for its efforts in tackling these problems in many different ways, in particular through investment in groundwater studies to enable management of water resources, and to maintain socioeconomic development.

Groundwater resources need comprehensive geological study, and collection of massive amounts of hydro geological data to

analyse the current situation. This requires competent experts with expertise in the field of geology and the geographical area.

In early 1980's, BRGM carried out a very important study in Saudi Arabia on the SAQ aquifer. This aquifer is important by its huge size, 375 000 km². The region also has enormous agricultural activity, and much of population work in the agro-business sector, in particular in wheat growing. The government encourages this through subsidies and incentives to farmers, who have consequently invested heavily in agriculture and related business.

There is controversy as to whether or not this development strategy has seriously

imbalanced water availability in the region. The new SAQ study initiated by the Ministry of Water and Electricity was awarded to an ATC/BRGM consortium, to investigate, update, and evaluate the groundwater resources, and to test the findings, verify the data, and recommend strategies. Sophisticated modelling software and advanced GIS technology have been underpinned development of a sound study. This science and technology-based approach combined with the capabilities of ATC - engineering, procurement, installation, testing and commissioning, project support services, and support with prospective clients - have been key to the success of this study.

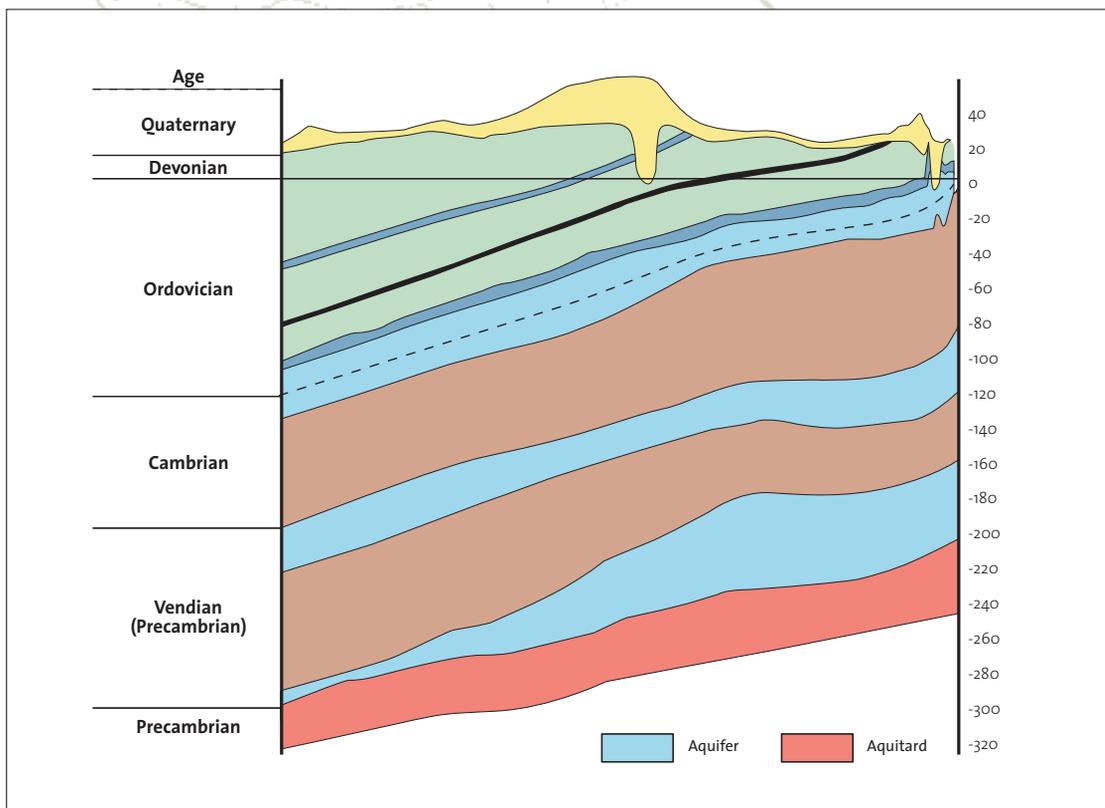


Fig. 1: South-North hydro-geological cross section of Ida-Viru County (Estonia).

Fig. 1 : Coupe schématique hydrogéologique Nord-Sud du Comté Ida-Viru (Estonie).

Source : Estonian Geological Survey

This aquifer is under threat from the nearby oil shale mining operations -- the underground mines of Ahtme and Estonia to the West, and the opencast mines of Viivikonna and Sirgala to the East.

The Ordovician aquifer, within the area where oil shale is mined, has been largely depleted because of mine drainage. The latter amounts to around 600,000 m³/day, whereas groundwater consumption in rural areas from this aquifer is estimated to be about 3,444 m³/day.

The inability to exploit the Ordovician aquifer in mining areas results in overexploitation of the deep aquifers of Voronka and Gdov. Deep boreholes in these aquifers supply 82% of the county's groundwater consumption, but the water contains high salt levels, often exceeding permitted limits for potable water. Furthermore, intensive exploitation has created a deep depression in the aquifer, centred on the conurbations of Jõhvi and Sillamäe, although this problem has been slowly resolving since 1990. Unfortunately, replenishment might come from salt water from the Gulf of Finland.

Contamination and degradation of water resources by mining

In the mining region, underground working has affected the stability of the land, leading to subsidence, in particular after mines have been closed down and are no longer maintained. It has also resulted in chemical pollution of water resources.

“*The Ordovician aquifer, within the area where oil shale is mined, has been largely depleted because of mine drainage. The latter amounts to around 600,000 m³/day, whereas groundwater consumption in rural areas from this aquifer is estimated to be about 3,444 m³/day.*”

L'équipe ENCA observe les techniques d'irrigation dans l'oasis d'Al Kharga.

The ENCA team studying irrigation techniques in the Al Kharga oasis.

© BRGM im@gé - B. Lemière



► **THE NEW NILE VALLEY- GREEN IN THE DESERT...**

In the new agricultural zones of the Libyan Desert, BRGM is helping to improve water and soil quality, and to implement best practices in environmental management of agricultural development.

A huge project aimed at doubling the Nile Valley using water from the Nasser Lake began in 1978. Today it links the lake with the Touchka

depression, and work is progressing to the North-West to reach the Kharga oasis 350km away in the desert. BRGM has worked on the project on site since 2001, in the frame of the ENCA project (Evolution of a new cultivated area).

An environmental laboratory
With the support of the French Egyptian cooperation agency for agri-

culture (BLAFE), the ENCA project is conducted in close partnership with the SWERI research centre for agriculture development.

The target is to win 400,000 hectares in the Kharga oasis. The ENCA project includes the implementation of a lab, training of partners, and a joint survey of water and soil quality.

Spoil heap of ash and mine waste at Kivioli mine (Estonia).
Un terril de cendres et de stériles à Kivioli (Estonia).

Source : Kadriann Sossar (<http://france-estonie.org/>)



“Over the past fifty years, 170 million tonnes of cracking residues have been generated, and these contain large amounts of organic compounds, phenols in particular. Rain causes these to leach downwards to the water table and watercourses.”

Mine waste heaps

Enormous volumes of waste are left over after burning of oil shale or separation of ore from unwanted solid matter. It is stocked in gigantic spoil heaps reaching by places (Kivioli) a hundred metres high, which sometimes contain enough natural hydrocarbons for spontaneous combustion to occur occasionally through natural oxidation processes. Precipitation, and oxidation phenomena, also carry sulphates down into the water table.

Ash

After oil shale has been separated from the unusable matrix, it is reduced to a powder to fuel electricity generating stations or thermal power stations, or used to produce hydrocarbons and solvents for the chemical industry. The quantity of unusable ash produced is equivalent to around a third of the weight of the raw fuel. The Eesti and Balti power stations produce four million tonnes of ash each year.

Cracking residues

When oil shale is distilled to produce fuels or solvents, the residues left over from the cracking process are also deposited on the spoil heaps. They sometimes ignite spontaneously in contact with the air. Over the past fifty years, 170 million tonnes of cracking residues have been generated, and these contain large amounts of organic compounds, phenols in particular. Rain causes these to leach downwards to the water table and watercourses. Some drainage ponds at the foot of the spoil heaps contain reddish-coloured water, indicating the presence of this pollution.



Spoil heaps of oil shale ash (Estonia).
Terrils de cendres de schistes bitumineux (Estonia).

Source : Enn Käiss (http://www.galerii.ee/panoraam/eesti/e_sisu.html?id=59)



Surface water polluted with phenols in the Kohtla-Järve area (Estonia).

Écoulement dans un fossé provenant de terrils de cendres de schistes bitumineux de Kohtla-Järve, dans le bassin de la rivière Purtse (pollution aux phénols) (Estonia).

Source : Valdur Pärtna
(www.ene.ttu.ee/maeinstituut/maeselts/ems/id224.htm)

Water table pollution from abandoned mines, and the subsequent rise in water level

In both opencast and underground mines, extraction of oil shale requires intensive pumping to avoid flooding the work face or the excavation floor. Within the exploitation time delay of a site, the water pumped is equivalent to twenty-five times the volume of shale extracted. In other sectors where the seams have been worked out and mining has ceased, there is a phenomenon similar to that seen in the iron ore mines of Lorraine -- in Estonia, the rise in the water table that occurs after a mine is no longer pumped leads to dissolving of sulphates.

Measures aimed at halting pollution caused by oil shale

To comply with European standards, most storage sites for oil shale mining waste in Estonia will have to be closed down or adapted in the coming years.

Noting this undertaking, the European Union granted Estonia, during the preparation of its accession treaty, a considerable transition phase during which to apply progressively European directives:

> Estonia has been given five years to reduce by ten the quantity of oil shale ash dumped. This must be reduced to 350,000 tonnes per year by 31 December 2008.

► POLAND

WATER RESOURCES PROTECTION VIS-A-VIS AGRICULTURAL IMPACTS

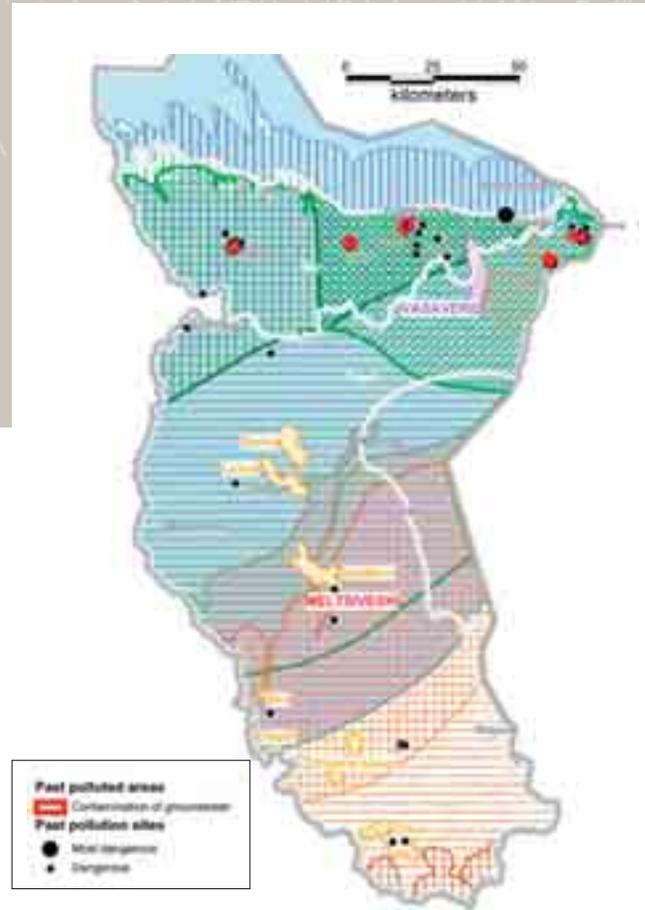
Over the last fifteen to twenty years, non point source pollution has become a growing concern for water resources managers. In Europe, particular attention has been paid to the spread over large areas of increasingly concentrated nitrate pollution, often approaching and sometimes exceeding the 50 mg/l maximum permitted level of drinking water standards. This prompted strengthening of existing legislation with the introduction in 1991 of the European Nitrate Directive. France has been implementing this directive for several years now.

As a pre-requisite to becoming full members of the European Union, several eastern European countries had to upgrade their own legislation, and in some cases change practices to meet European standards, particularly with respect to the environment. To help accelerate this process, the European Commission set up twinning programmes to transfer experience and know how from Western Europe experts to their counterparts in Eastern Europe. In 2003 and 2004, BRGM was involved in a twinning project in Poland to help implement the Nitrate Directive,

along with the British Environment Agency and the Northern Ireland Public Sector Enterprises, and the Polish Ministry of Environment. BRGM's assignment consisted of providing assistance, training and capacity building for monitoring networks, sampling techniques, setting up vulnerable zones to nitrate pollution, data assessment, database federating methodologies, and isotope techniques to determine the origin of nitrate pollution (agriculture, stock breeding, urban, industry, ...). It also helped to set up a nitrogen isotope analysis laboratory facility.

- ▶ Oil shale fuelled installations will have to be modernized by 2015, so that sulphur dioxide emissions do not exceed 25,000 tonnes in 2012, and will be further reduced thereafter.
- ▶ Some water quality limits will only apply from 1st January 2008 to towns with populations of over 2,000, before being extended to the whole country as of 1st January 2013.

According to estimates by the Estonian Ministry of Economic Affairs, the cost of bringing the energy sector into line with the main European directives will amount to more than €370 million by 2009. Other measures might subsequently be needed to remedy pollution from the energy sector. All measures to be proposed within the framework of the Lake Peipsi district management plan will be subject to a second phase of studies.



Location of the main sources of aquifer contamination.

Localisation des principales sources de pollution.

Source : MAVES - LIFE-FFEM "Peipsi-CAMP" Project - Assessment of groundwater bodies status

▶ **CEFIREs : THE INDO-FRENCH CENTRE FOR GROUNDWATER RESEARCH**

The Indo-French Centre for Groundwater Research (IFCGR) was created in 2000 by BRGM and the National Geophysical Research Centre (NGRI) in Hyderabad - Andhra Pradesh, India. In March 2005, the centre celebrated its fifth anniversary.

The centre's main purpose is to research the hard rock aquifer systems that cover most of the Indian Territory. Hard rock systems are quite complex, but proper use of water resources in these aquifers is the only means of preventing the severe water level falls, and growing water shortages, that affect many areas of India, including Andhra Pradesh.

IFCGR staff consists of three French and three permanent Indian researchers. It bene-

fits both from the expertise from BRGM and NGRI. It hosts several postgraduates and often visiting international experts.

Major achievements include refining a conceptual model for hard rock aquifer systems. This was first developed in France, and has now been successfully adapted to the Indian context through work carried out in the small Maheshwaram river basin, southwest of Hyderabad. Field survey methodologies in fractured hard rock environments, including hydraulic tests, have been improved, and modelling techniques developed. Recently, a decision support tool was built and applied successfully in a first attempt to help suggest more efficient use of ground-

water resources in the Maheshwaram river basin. Solutions included use of alternative crop patterns, crop changes, and more efficient use of irrigation water, with a decrease in overall pumping. The feasibility of integrated surface and groundwater management in this basin using artificial recharge is now under study.

Future research at IFCGR will focus more (1) on scaling-up of techniques to adapt existing methodologies and tools to larger-scale basins in hard rock aquifer systems, and (2) on water quality deterioration resulting from human impact, over pumping, or natural water-rock interactions.



IRIS Instruments,

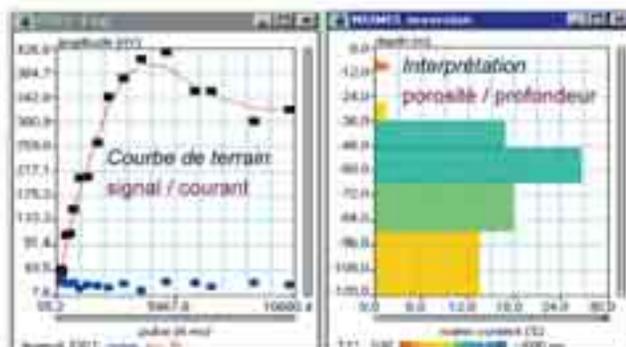
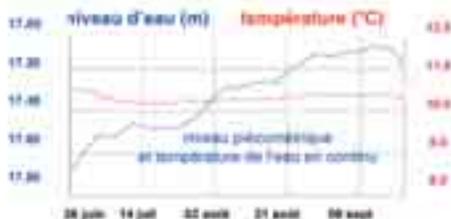
des équipements de reconnaissance et de surveillance des eaux souterraines

Équipements NUMIS

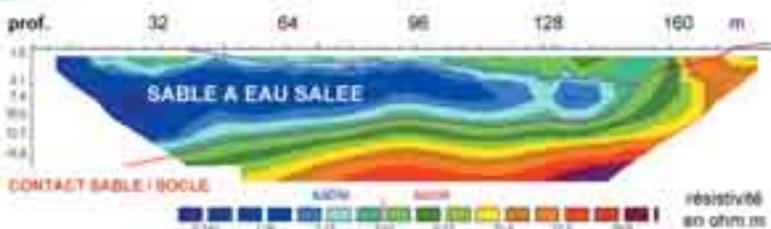
pour la détection directe de l'eau souterraine par résonance magnétique : porosité, perméabilité, profondeurs des aquifères



Centrales MADOFIL
pour le contrôle dans le temps du niveau, de la conductivité et de la température des nappes phréatiques



Résistivimètres SYSCAL
pour les sondages et les images électriques du sous-sol



IRIS Instruments - Orléans, France ; info@iris-instruments.com ; www : iris-instruments.com ; tél : + 33 (0)2 38 63 81 00 ; fax : + 33 (0)2 38 63 81 82

Preliminary findings, and initial orientations

Several sources of pollution, including oil shale mining, have been clearly identified. Overexploited aquifers, and water resources unfit for human consumption due to serious pollution, present a serious risk to the potable water supply of the Lake Peipsi hydrographical district.

In the very near future, overexploitation of groundwater is likely to lead to infiltration of seawater into freshwater resources. Furthermore, the artificial lowering of the water table means that local authorities have to turn to other potential sources of supply: a shallow aquifer, high in the Quaternary alluvial deposits that is vulnerable to accidental pollution, and a deep aquifer, at a depth of over 140 metres. ■

“ The European Union granted Estonia, during the preparation of its accession treaty, a considerable transition phase during which to apply progressively European directives. ”

🇫🇷 A l'échelle de la planète, la diminution constante des ressources en eau potable ainsi que la dégradation de sa qualité conduisent à reprendre des recherches sur les systèmes d'aquifères. Les aquifères karstiques et les aquifères de socle connaissent un regain d'intérêt. La recherche sur les aquifères se conduit maintenant à l'échelle des bassins, avec une attention particulière sur l'exploitation conjointe des ressources de surface et de profondeur. Le BRGM développe de tels projets en partenariat avec de nombreux pays.

Cet article décrit l'un de ces vastes projets mené en Estonie et en Russie. Il fait aussi le point sur les recherches menées en Egypte, Pologne, Arabie Saoudite et Bangladesh. Il présente de façon brève les recherches menées par le Centre de Recherche franco-indien sur les Eaux souterraines.

Bibliographie : Documents BRGM 2003-2005. Rapports du projet "Gestion des ressources en eau du bassin versant transfrontalier du Lac Peipsi". Financement Fonds Français pour l'Environnement Mondial, Life Environnement, BRGM. — Jean-Pierre Houix : "Géostratégie des ressources en eau sur la frontière russo-estonienne". — Karin Pachel (Estonian Centre for Environmental Information). Data on water. http://grida.no/enrin/htmls/estonia/env2001/content/soe/water_3-3.htm. — Société MAVES. Rapport : "Overview of the groundwater resources in Viru-Peipsi catchment area". — Société MAVES. Rapport : "REDOS2 - Water Resources Assessment for Ida Viru County, Estonia", 3rd Draft. October 1999. — Mapping potential areas of ground subsidence in Estonian underground oil shale mining district (Ingo Valgma). The Mining Institute of Tallinn Technical University, Kopli 82, Tallinn, 10412, Estonia. — <http://www.rusnet.nl/encyclo/esteconom.shtml> — <http://www.esis.ee/ist2000/einst/nature/environment.htm#Military%20pollution%20and%20soils%20water> (Andres Tarand) — <http://www.ene.ttu.ee/maeinstituut/maeselts/ems/id24.htm>



La croissance régulière de la population et de l'occupation des sols, une activité industrielle en constante évolution, la conscience de la fragilité de notre environnement naturel et de la nécessité de le préserver, nous poussent à comprendre l'origine des contaminations qui affectent notre cadre de vie. En présence d'un contaminant minéral, le premier réflexe est de rechercher une cause anthropique. Toutefois, la nature peut receler de nombreux "pièges" naturels, et bien des secteurs vierges de toute activité humaine peuvent s'avérer totalement "pollués" par une géologie très discrète.

©BRGM-im@gé

L'eau, facteur de libération de l'arsenic naturel



Michel Bonnemaison

DR. ES SCIENCES
SERVICE DES RESSOURCES
MINÉRALES - BRGM
m.bonnemaison@brgm.fr

Notre environnement naturel est constitué de roches très variées. La banalité de cette évidence est telle que nous finissons par oublier totalement que ces mêmes roches, modèlent nos paysages et définissent notre cadre de vie. Souvent masquée par une couverture végétale, l'omniprésence de cette géologie se révèle parfois de manière brutale et inattendue, mais également de manière insidieuse en introduisant dans notre environnement des "contaminations naturelles" qu'il est parfois très difficile de distinguer des pollutions accidentelles.

Si trois particules fondamentales, le proton, le neutron et l'électron, se combinent en 115 atomes différents, ces atomes se groupent à leur tour en minéraux pour former la majeure partie de la matière solide que nous connaissons ; les roches dures, la terre ou le sable que nous foulons, mais également la majeure partie des matériaux que nous produisons, sont composés de ces minéraux. Ceux-ci, nombreux d'environ 3500 espèces, sont les briques fondamentales de notre environnement.

Ces minéraux, aux compositions très variées, offrent des caractéristiques physico-chimiques bien précises qui peuvent influencer directement sur notre cadre de vie et notre santé.



Lorsqu'ils sont de très petite taille, ils se retrouvent sous forme de poussières dans l'air que nous respirons. Généralement, ce phénomène ne présente pas d'autre inconvénient qu'une gêne estivale par jour de grand vent, mais quelquefois, lorsque les minéraux dispersés par le vent sont de nature fibreuse, comme les amiantes, le risque peut être beaucoup plus important. Transportés par le vent dans la haute atmosphère, certains de ces aérosols peuvent voyager sur des milliers de km, comme les loess du Sahara qui, déposés sur les sols de l'Europe, en modifient sensiblement la composition.

Pour exister, ces minéraux doivent être en équilibre avec leur milieu. Une modification de cet équilibre peut entraîner leur transformation en de nouveaux minéraux, accompagnée de la libération d'une partie (ou parfois de la totalité) des éléments chimiques qui les constituent. Par exemple, le sel de cuisine (cristaux de halite), parfaitement stable dans l'air sec, se dissout rapidement dans l'eau douce en libérant le sodium et le chlore qui le constituent.

Heureusement, la quasi-totalité des minéraux présentent une grande stabilité et ne sont pas sensibles aux modifications "mineures" de notre environnement.

Une question d'équilibre

À l'échelle humaine, la libération du contenu chimique de la grande majorité des minéraux ne peut s'opérer que par des procédés industriels, particulièrement bien illustrés par l'activité métallurgique. Toutefois, à

“ Les minéraux les plus résistants finissent par s'altérer sous l'action combinée du climat et de la biosphère. ”

l'échelle des temps géologiques et soumis aux conditions de la surface, les minéraux les plus résistants finissent par s'altérer sous l'action combinée du climat et de la biosphère. Les sols, si indispensables à notre agriculture en sont les témoins les plus banals ; leur chimie et leur minéralogie actuelles reflétant la composition des roches d'origine dont ils sont issus.

Certains minéraux relativement abondants, comme les sulfures, sont particulièrement instables dans un environnement superficiel. Cette classe minéralogique, dont les espèces constituent une des principales sources de métaux exploités, est à l'origine des principales pollutions par les éléments métalliques en trace, qu'elles soient anthropiques ou naturelles.

Sous l'action combinée de l'eau et de l'oxygène de l'air, mais également sous celle de l'activité bactérienne, les sulfures s'oxydent rapidement pour se transformer en encroûtements de sulfates, d'oxydes et



Arsénopyrite : FeAsS

© Minér@lia

► MINÉRALOGIE DE L'ARSENIC



Tétraédrite (Cuivre gris) :
(Cu, Ag, Zn, Fe)₁₂(Sb,As)₄S₁₃

Élément très commun de l'écorce terrestre, l'arsenic entre dans la composition de plus de 150 espèces minérales (sulfures, arséniures, sulfosels, oxydes et hydroxydes, sulfates, chromates, phosphates, arséniates, silicates) avec de nombreux autres éléments métalliques : Cr, Ni, Co, Cu, Zn, Sb, Pb, ... Une majorité de ces espèces minérales est très sensible aux variations du pH et

du potentiel d'oxydo-réduction. Les rabattements de nappes, les modifications de la composition d'un sol ou même les remontées de nappes, peuvent provoquer la déstabilisation de certains de ces minéraux, la néoformation d'autres, avec libération de traces métalliques indésirables dans les eaux.



“ De très nombreuses roches cristallines, volcaniques ou volcano-sédimentaires peuvent renfermer des proportions importantes d'arsenic. ”

hydroxydes de fer. Ce processus, qui peut opérer sur des temps très courts, de quelques mois à quelques années, provoque un départ du soufre sous forme d'acide sulfurique plus ou moins dilué, ainsi que celui des autres éléments contenus, comme les métaux de base (Cu, Pb, Zn), les métaux lourds (Cd, Co, Ni, Hg,...), ou les métalloïdes (As, Se, ...) dans les eaux environnantes.

Cet abaissement du pH de l'eau peut à son tour provoquer la déstabilisation d'autres espèces minérales, qui libéreront aussi tout ou partie de leur contenu ionique.

Les métaux lourds et l'arsenic

La fin du XX^e siècle a vu émerger la conscience environnementale, et avec elle la préoccupation associée à la nocivité des éléments traces métalliques sur la santé humaine. Longtemps considérées comme résultant exclusivement de l'activité industrielle, les

pollutions par le mercure, le cadmium, le plomb, le chrome, etc. ont été recherchées dans l'environnement immédiat des installations associées à leur extraction, leur élaboration ou leur utilisation ; l'extrême rareté des concentrations minérales qui les contiennent ne pouvant que confirmer cette intuition.

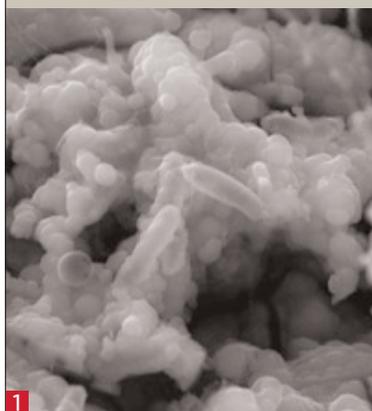
Malheureusement, un métalloïde particulièrement toxique, l'arsenic, fait exception à cette règle. Cet élément s'avère très banal dans l'écorce terrestre, et de très nombreuses roches cristallines, volcaniques ou sédimentaires peuvent renfermer des proportions importantes d'arsenic sous forme de sulfures, dont l'espèce la plus commune est l'arsénopyrite ou mispickel.

Les concentrations d'arsénopyrite ont été particulièrement étudiées à partir des années 60, lorsque l'étroite relation entre ce minéral et les concentrations aurifères avait été clairement établie par la géochimie d'exploration minière. Associé au métal précieux de manière quasi-systématique, tout en étant bien plus largement distribué, ce métalloïde est l'un des traceurs les plus utilisés pour repérer les gisements d'or, mais également d'étain et de tungstène.

En France, le programme d'inventaire systématique du potentiel minier à partir d'analyses géochimiques de sols et de sédiments de ruisseaux a fourni des précieuses informations sur la distribution régionale des concentrations d'arsénopyrite. Ces travaux ont permis de montrer pour la première fois l'extrême abondance de ce minéral qui peut, à partir de fractures ou de coupoles intrusives, imprégner des formations géologiques sur plusieurs dizaines de km.

Le principe de cette exploration systématique de l'or est fort simple. Partant du constat métallogénique que la totalité des gisements aurifères du socle hercynien sont associés à l'arsenic, localiser des gisements d'or inconnus pouvait s'effectuer en recherchant les concentrations anormales en arsenic, beaucoup plus

► BACTÉRIES ARSÉNITE-OXYDANTES



1 ► Souche Caso1 de bactéries provoquant l'oxydation rapide des sulfures d'arsenic. Ces bactéries sont utilisées dans des processus industriels pour détruire le réseau

crystallin des sulfures et libérer ainsi leur contenu métallique : or, mais aussi le cobalt.

2 ► Colonies de bactéries **Variovorax Paradoxus.**

Ces bactéries se retrouvent naturellement dans les sols. Se nourrissant de sulfures d'arsenic, elles provoquent la libération du métalloïde dans les eaux.

faciles à localiser en raison de leur taille. L'arsenic, initialement contenu dans les roches et les minerais, se retrouve piégé sous différentes formes chimiques dans les sols et les sédiments qui résultent de leur altération supergène. Lors de ce transfert, son support minéralogique change et passe du sulfure, à l'équilibre avec la roche non altérée, à celui d'arséniates, de phosphates, de sulfates ou d'oxydes et hydroxydes de fer en équilibre (parfois réversible) avec les conditions de la surface. Ce changement d'état se produit dans un espace restreint, ce qui suppose un déplacement peu important de l'élément chimique.

Ainsi, une roche riche en arsenic développe par altération une auréole géochimique riche en arsenic

“ Les eaux de surface restent généralement libres de la présence d'arsenic. ”

dans les sols qui se forment au-dessus, et l'érosion disperse à son tour une anomalie dans les sédiments fins du réseau hydrographique qui les draine.

Il est intéressant de noter, que, bien que les teneurs enregistrées dans les sols ou les sédiments soient parfois élevées (les teneurs de plusieurs centaines de grammes par tonne sont communes), les eaux de surface restent généralement libres de la présence d'arsenic, ce dernier restant piégé dans des phases minérales, surtout oxydes et hydroxydes, en équilibre avec l'environnement.

La carte des anomalies naturelles en arsenic dans les sédiments de ruisseau du Massif Central (fig. 1) qui est présentée ci-contre ne doit donc pas être lue comme une carte de contamination en arsenic avec risque associé pour la santé.

L'arsenic analysé, correspond à la fraction fine des sédiments de ruisseaux, qui concentre les minéraux stables riches en cet élément.

Bien qu'incomplet, l'inventaire minier du Massif Central n'ayant été réalisé qu'à environ 50 % (les trous de la carte !), ce travail attire l'attention sur la taille importante des formations arséniées. Les anomalies, souvent de très grande dimension, correspondent à divers types de roches ou de drains hydrothermaux.

Les anomalies non linéaires de la carte correspondent pour l'essentiel à des schistes noirs et des auréoles thermiques dans l'encaissant immédiat de certaines intrusions granitiques.

Les anomalies linéaires de grande extension sont liées aux zones de cisaillement associées aux phases tectoniques tardy-hercyniennes (300 MA). L'arsénopyrite y imprègne les roches affectées par les

Fig. 1 : Massif Central, sédiments de l'Inventaire, isovalues As.

Fig. 1: Massif Central, Inventory sediments, As isovalues.

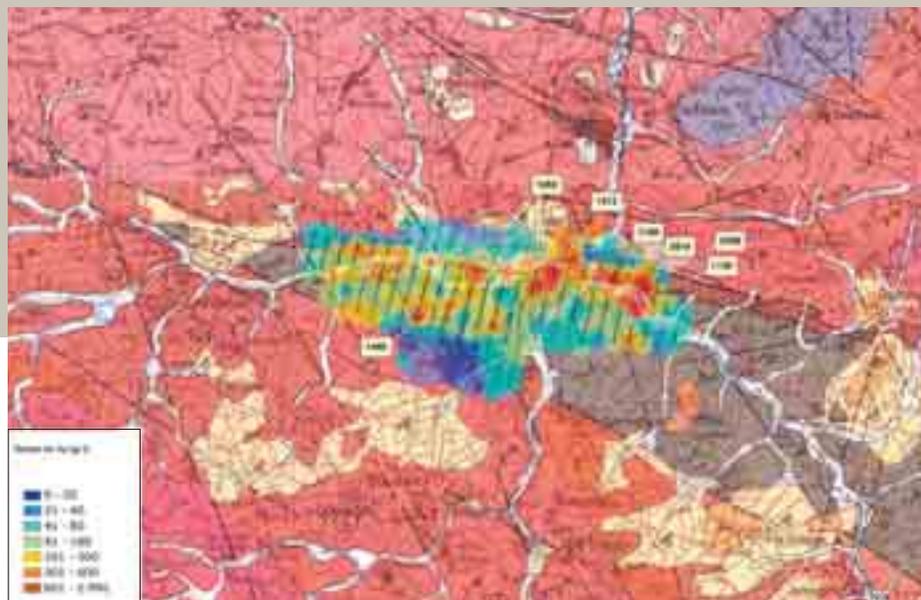
© BRGM-lm@gé



Fig. 2 : Carte géologique montrant le petit sillon houiller de Viges-Villerange dans la Creuse (en marron) avec développement de fortes anomalies en As dans les sols - exprimées en g/t - au niveau de la bordure nord (mylonites : zone hachurée de la carte).

Fig. 2: Geological map showing the small Viges-Villerange coal belt in the Creuse (brown) with strong As anomalies in the soil (g/t) along its northern edge (cross-hatched area on the map: mylonite).

© BRGM-Im@gé



“ Sa présence dans les eaux superficielles correspond bien souvent à une activité humaine ayant perturbé l'équilibre du milieu. ”

cisailllements sur des volumes considérables, le long de segments mylonitiques (roches finement broyées par les déformations du socle) souvent puissants de plusieurs centaines de mètres et pouvant atteindre des extensions de plusieurs dizaines de km. Ces segments arséniés entaillent totalement les massifs cristallins français (Bretagne, Massif Central, Vosges) mais se rencontrent également, quoique plus morcelés par la tectonique alpine, dans les Alpes et les Pyrénées.

Dans ces structures, les teneurs dans la roche atteignent fréquemment plusieurs centaines de grammes par tonne et peuvent localement dépasser quelques %. Lorsque ces roches s'altèrent, les sols développés à leurs dépens enregistrent des niveaux de teneur comparables, en général inférieurs, mais toujours importants, atteignant fréquemment quelques milliers de grammes par tonne.

Ces zones de faiblesse de l'écorce terrestre, qui ont servi de drains pour les fluides hydrothermaux arséniés (eaux chaudes d'origine magmatique ou métamorphique qui ont déposé les minéraux métalliques, dont les sulfures d'arsenic, dans les roches qu'elles ont imprégnées), correspondent à des sites à forte occupation humaine :

- Constituées de roches broyées et altérées, elles ont guidé le réseau hydrographique et correspondent souvent aux vallées, lieu privilégié de l'habitat.

- Ce sont des zones à forte perméabilité, et de nombreux captages d'eau sont préférentiellement implantés sur leur trajet .

- Les zones les plus fortement imprégnées ont pu être exploitées pour leur contenu en métaux précieux ou en métaux lourds.

- Ces zones mylonitiques servent également de bordure aux bassins houillers, et ont facilité les émissions volcaniques ou les intrusions de granites spécialisés, en favorisant ainsi un nouvel apport et une dissémination d'arsenic dans les roches de ces bassins.

De l'arsenic dans l'eau !

Dans un milieu en équilibre ayant atteint sa maturité ⁽¹⁾, l'arsenic se trouve généralement piégé dans des minéraux, et nous ne devrions pas le rencontrer dans les eaux de surface, si l'on fait exception des sources chaudes ⁽²⁾ du volcanisme récent. En France, une étude récente réalisée dans le cadre du futur Atlas géochimique européen montre que le fond géochimique en As des eaux de surface est voisin de 0,73 µg/l.

En fait, sa présence dans les eaux superficielles correspond bien souvent à une activité humaine ayant perturbé l'équilibre du milieu, et cette activité peut être très éloignée d'une activité industrielle

⁽¹⁾ Milieu où les minéraux métastables de l'arsenic (sulfates, arséniates, phosphates) ont été oxydés et ont laissé place aux seuls oxydes et hydroxydes.

⁽²⁾ 20 % des sources thermales renferment des teneurs en As supérieures à 50 µg / l.

associée classiquement à cet élément. Ainsi, la réalisation de travaux publics, comme l'ouverture d'une route ou le fonçement d'un tunnel, s'ils s'effectuent dans des roches imprégnées d'arsénopyrite, provoquera inéluctablement une déstabilisation de ce sulfure et libérera de l'arsenic dans les eaux de ruissellement.

Cette contamination s'exprime particulièrement dans les captages d'eau souterraine. La présence d'arsenic dans les nappes phréatiques est un processus dont le détail peut s'avérer particulièrement complexe. Cependant, un phénomène fort simple est à l'origine de ce processus.

La nappe phréatique subit des battements correspondant aux diverses variations d'origine naturelle : influence saisonnière, variations de la pluviométrie, etc. On peut cependant considérer, qu'à l'échelle des temps géologiques, ce battement de la nappe s'effectue dans un milieu déjà oxydé, où les sulfures ont déjà disparu depuis longtemps et où une bonne partie (la totalité ?) de l'arsenic libéré a été piégée par les oxydes et hydroxydes de fer.

Lors d'un pompage, le rabattement de la nappe peut aboutir à la mise « hors d'eau » d'une zone ayant maintenu jusque là l'équilibre nécessaire à la stabilité des sulfures⁽³⁾.

Le déséquilibre produit par cette mise hors d'eau va rapidement provoquer l'oxydation de ces sulfures et la libération de l'arsenic contenu principalement dans

l'arsénopyrite. Il est important de noter que ce processus prendra un certain temps, et que la contamination ne sera effective que quelque temps (mois, années ?) après le début du pompage. La cinétique de cette réaction dépendra de très nombreux facteurs : nature des roches, porosité, association de sulfures, proximité de la surface, activité bactérienne, ...

L'origine de la contamination de l'eau d'un forage n'est donc pas obligatoirement à associer à un épandage superficiel accidentel ou à une percolation de l'arsenic naturellement contenu dans les sols (si ceux-ci ont atteint leur équilibre). Cependant, on note une excellente corrélation spatiale entre les anomalies naturelles des sols et la contamination en arsenic des captages d'eau. Cette corrélation traduit surtout la relation qui existe entre l'anomalie du sol et la nature des roches sous-jacentes, phénomène qui est le fondement de la géochimie d'exploration.

Une carte de « l'aléa arsenic »

Longtemps après sa réalisation, la carte des anomalies géochimiques en As (sol ou sédiments de ruisseau) trouve une nouvelle utilité. En localisant les roches arséniées, elle permet d'appréhender un « aléa arsenic » en attirant l'attention sur des secteurs où la remobilisation d'un stock d'arsenic préexistant à la faveur de travaux d'aménagement est possible, voire probable.

Ainsi, une étude préalable de cette géochimie, jointe à une interprétation géologique et structurale des terrains sous-jacents, peut permettre d'estimer, avant son forage, le risque de contamination par l'arsenic d'un captage d'eau souterraine. ■



Arsenic, the most "popular" poison, is a metalloid very widely distributed in geological formations like black shale, specialized granite intrusions and their aureoles, lava and volcano-sedimentary formations. It is also found in the veins of hydrothermal deposits criss-crossing crystalline bedrock. Trapped in the soils that come from these rocks, it creates many geochemical anomalies in many places characterised by very high concentrations (in the order of the % level) over areas of several kilometres (10 to 50 km). While surface waters that drain these anomalies usually do not contain significant quantities of arsenic, most groundwater wells drilled into them draw water contaminated by concentrations sometimes well above drinking water limits. This is due to the destabilisation of metastable mineral phases when the equilibrium in the natural environment is disrupted, similar to drawdown around a water well. A geological and geochemical approach enables precise mapping of the risk of natural contamination in the case of pumping or large scale public works projects.



Fig. 3 : Corrélation entre la contamination par l'arsenic de captages d'eau souterraine dans la Région d'Echassière (rectangles bleus - teneurs exprimées en $\mu\text{g/l}$) et l'anomalie enregistrée dans les sédiments de ruisseau (points noirs - teneurs exprimées en g/t).

Fig. 3: Correlation between arsenic contamination in groundwater wells in the Echassière region (blue rectangles, concentrations in $\mu\text{g/l}$) and anomalies measured in stream sediments (black dots, concentrations in g/t).

© BRGM-lm@gé

⁽³⁾ Dans l'industrie minière, les rejets de sulfures sont maintenus dans des bassins sous une couche d'eau, ce qui empêche leur oxydation et la libération des métaux qu'ils contiennent. De graves problèmes de pollution peuvent survenir si cet ennoïement est interrompu (rupture de digues, etc.).

Près de 60 % des captages d'eau potable sont contaminés par des pesticides. Malgré la modification des pratiques agricoles ou l'interdiction de certaines molécules, ces pollutions seront présentes encore très longtemps dans les eaux souterraines.

La variabilité spatiale et temporelle des concentrations de phytosanitaires et l'hétérogénéité des milieux rendent difficile la caractérisation des pollutions et la prédiction de l'évolution de la qualité des eaux.



Contamination des eaux souterraines par les produits phytosanitaires

Mécanismes impliqués et concentrations observées



Christophe Mouvet

RESPONSABLE DES RECHERCHES SUR LE TRANSFERT DE PHYTOSANITAIRES
SERVICE EAU - BRGM
c.mouvet@brgm.fr

Nicole Baran

HYDROGÉOLOGUE
SERVICE EAU - BRGM
SUIVIS DES TRANSFERTS DANS LES SOLS ET DE QUALITÉ DES EAUX
n.baran@brgm.fr

Les mécanismes impliqués dans la présence de pesticides dans les eaux souterraines (fig. 1) sont nombreux, complexes (de nature physique, chimique et biologique), interagissent les uns avec les autres, et, pour la plupart, jouent un rôle de filtre protecteur à l'égard des eaux souterraines. Depuis l'application (où la dérive, la volatilisation et la photolyse vont diminuer la dose atteignant ou restant dans le sol), en passant par le transfert au travers des sols (où les phénomènes de sorption, dégradation -biologique, physique, chimique-, prélèvement par les plantes, entraînement par ruissellement vont minimiser les flux au-delà de la zone racinaire), puis la traversée de la zone non saturée (ZNS, où persiste un potentiel de sorption et dégradation), et enfin le milieu saturé (ZS, avec les phénomènes de dilution, sorption et dégradation), toute une série de mécanismes vont contribuer à la concentration finale observée dans les eaux souterraines.

Le rôle majeur joué par le sol dans la régulation des flux de pesticides susceptibles d'atteindre les nappes est reconnu depuis longtemps. Toutefois, dans un grand nombre

Les termes pesticides, produits phytosanitaires et produits de protection des plantes (PPP) sont synonymes et désignent l'ensemble des molécules destinées à contrôler les parasites des cultures.

de contextes naturels, des transferts préférentiels d'eau et de solutés conduisent, au bas de la zone racinaire, à des flux de pesticides plus élevés que ce que l'on attendait. Ces flux atteignent ensuite le compartiment "zone non saturée au-delà de la zone racinaire", dont des travaux récents ont montré qu'il pouvait être le siège de phénomènes de sorption et de dégradation non négligeables. Ce compartiment, qui est par ailleurs très hétérogène, reste toutefois très peu étudié en raison notamment des difficultés pour y accéder.

Dans le compartiment saturé, les mécanismes impliqués sont souvent considérés comme essentiellement physiques (dilution) mais des travaux récents (Tableau 1) ont mis en évidence des potentiels non négligeables de sorption (notamment dans des horizons réducteurs ; Clausen et al., 2004) et de dégradation (dans les zones saturées aérobies, Albrechtsen et al., 2003). Le retard dans le transfert des produits phytosanitaires résultant de la sorption dans la zone saturée peut être important : un facteur de retard égal à 4,5 (Tableau 1) implique que pour un temps de résidence moyen de l'eau de 4 ans dans la zone saturée, le temps de résidence du pesticide dans la zone saturée sera de 18 ans.

Le bilan de la contamination des eaux souterraines par les phytosanitaires à l'échelle nationale

Depuis 1998, l'Institut français de l'environnement (Ifen) réalise un bilan annuel de la contamination des eaux par les pesticides, le plus récent publié synthétisant les informations de l'année 2002. Pour le réseau de suivi de la connaissance générale de la qualité des eaux souterraines (RNB - RNES), 60 % des 1014 stations révèlent la présence de pesticides, alors que 24 % des stations nécessiteraient un traitement spécifique pour permettre la production d'eau desti-

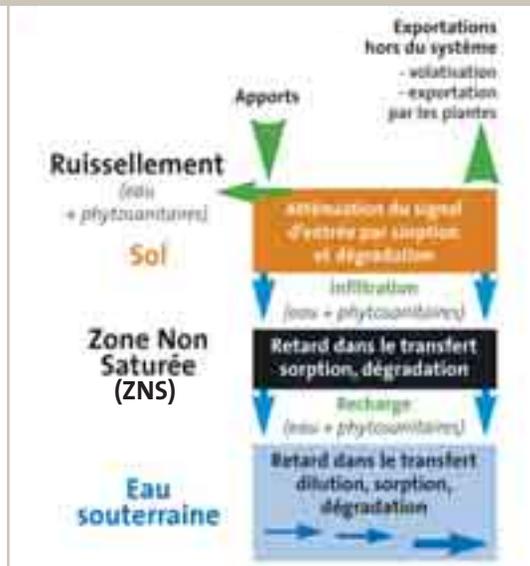


Fig. 1 : Principaux mécanismes intervenant dans le transport des produits phytosanitaires depuis la surface des sols jusque dans les nappes.

Fig. 1: Principal mechanisms involved in the transport of pesticides from the soil surface to groundwater.

© BRGM Im@gé - C. Mouvet

“ Les flux de pesticides susceptibles d’atteindre les nappes sont régulés par toute une série de mécanismes complexes. ”

née à la consommation humaine (Ifen, 2004). Ce sont essentiellement les triazines qui sont présentes dans les eaux souterraines (Ifen, 2004). L'atrazine a, depuis 1997, un taux de quantification compris entre 40 et 54 % (40 % des 7846 mesures effectuées en 2002, tous réseaux confondus). Le principal produit de dégradation de l'atrazine, la déséthylatrazine (DEA), est retrouvé à une fréquence égale (1998-2000) voire supérieure (en 2002, la DEA a été quantifiée dans 48 %

Tableau 1 : Résumé des résultats de sorption et dégradation de 4 pesticides étudiés en laboratoire avec des solides et des eaux prélevés dans la zone saturée de 4 aquifères européens. Adapté de Albrechtsen et al., 2003. *partie moins oxygénée de la zone saturée de l'aquifère de Brévilles (France)

Table 1: Summary of sorption and degradation results of laboratory studies of 4 pesticides in solid and water samples collected in the saturated zone of 4 European aquifers. Adapted from Albrechtsen et al., 2003. *Least oxygenated part of the saturated zone of the Brévilles aquifer (France)

Source : Albrechtsen et al., 2003.

PESTICIDE	SORPTION		DÉGRADATION	
	K _d (L/KG)	R, FACTEUR DE RETARD	CONDITIONS AÉROBIES	CONDITIONS ANAÉROBIES
Atrazine	0,03 - 1,90*	1,2 - 12,4*	-	-
Déséthylatrazine	0,04 - 0,58*	1,2 - 4,5*	-	-
MCPP	0 - 0,23*	1 - 2,4*	+/-	-
Isoproturon	0,05 - 3,10*	1,3 - 19,6*	+/-	-

CONTAMINATION PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

des mesures) au produit parent dont la vente a été interdite par le Ministère de l'Agriculture à compter du 30 juin 2003. Les 8 autres produits les plus fréquemment quantifiés en 2002 dans les eaux souterraines (tous réseaux confondus) sont, par ordre décroissant de fréquence de quantification (donnée en %), la déséthylterbutylazine (21 %), la simazine (12 %), la désisopropylatrazine (9 %), l'hydroxyatrazine (8 %), le diuron (6 %), la terbutylazine et l'oxadixyl (environ 5 %), et l'aminotriazole (environ 3 %).

Par rapport à la période et aux points de 1998-2000, les fréquences de quantification en 2002 de molécules comme le dinoterbe, le dinosèbe, le métolachlore et, dans une moindre mesure l'isoproturon, ont baissé. Des molécules comme le chlortoluron, le glyphosate, la bentazone et l'imidaclopride sont quantifiées dans 1 à 3 % des échantillons de 2002. Pour plusieurs molécules (telles l'alachlore et l'acétochlore, de la famille des chloroacétanilides), il faut noter que les réseaux en place et les laboratoires impliqués ne recherchent pas encore les produits de dégradation, alors que de nombreux travaux à l'étranger ont montré la prépondérance dans les eaux souterraines de certains métabolites par rapport aux molécules parents, tant au niveau des fréquences de détection que des concentrations (Kalkhoff et al., 1998).

Ce type de bilan, dans sa conception actuelle, peut conduire à des interprétations erronées, par exemple pour les zones particulièrement touchées ou pour les molécules fréquemment ou rarement détectées. En effet, aucune information sur la pression polluante (p. ex. les cultures majoritaires dans la zone d'influence des captages) ni sur le milieu naturel (p. ex. le type de nappe) n'est associée au constat de contamination ;

par ailleurs, la question des incertitudes analytiques ou des effets "laboratoire d'analyse" est largement sous-évaluée. Des études complémentaires en partenariat Ifen/BRGM/ARMINES, réalisées en 2005, essaieront de combler certains de ces manques.

Un exemple plus en détail

Dans le cadre du projet de recherche européen PEGASE et avec l'appui d'une convention de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, un aquifère situé dans le Val d'Oise a fait l'objet de travaux très détaillés. Il s'agit d'un aquifère dont le bassin d'alimentation a une superficie d'environ 2,5km² et dont la zone saturée est constituée de sables de Cuise situés sous 0 à 30 m de calcaires lutétiens, eux-mêmes surmontés de deux grands types de sols (caractérisés grâce à une colla-



Système d'extraction de carottes de sols pour le suivi des phytosanitaires.
Soil core extraction device for monitoring pesticides.

© BRGM im@gé

“ Pour le réseau de suivi de la connaissance générale de la qualité des eaux souterraines, 60 % des 1014 stations révèlent la présence de pesticides alors que 24 % des stations nécessiteraient un traitement spécifique pour permettre la production d'eau destinée à la consommation humaine. ”

poration avec l'INRA), des luvisols profonds (1 m) et des calcosols superficiels (0,4 - 0,5 m). L'occupation du sol dans le bassin d'alimentation est essentiellement agricole (blé et maïs étant les cultures dominantes), avec environ un tiers du bassin recouvert de forêts.

Depuis la création d'un réseau de 7 piézomètres (PZ) pendant l'hiver 2000, un suivi mensuel détaillé de la qualité de l'eau souterraine est effectué dans ces piézomètres et à la source, exutoire principal du système. Une des spécificités de ce bassin est l'implication très active des agriculteurs dans la démarche visant à protéger la ressource en eau souterraine. Cette mobilisation a notamment permis l'arrêt de l'usage de l'atrazine dès le printemps 2000, soit 3 ans avant son interdiction officielle, et son remplacement par l'acétochlore en traitement de



pré-lévee, en combinaison avec d'éventuels traitements post-lévées de rattrapage.

Parmi les nombreux enseignements tirés de ce suivi, la variabilité spatiale et temporelle des concentrations mérite une attention particulière d'autant que la nappe est développée dans un milieu poreux souvent présumé homogène.

La Figure 2 illustre pour 3 PZ et la source la chronique disponible actuellement sur les concentrations en produits phytosanitaires et produits de dégradation détectés (d'autres molécules que celles représentées ont été recherchées mais jamais détectées). La distance maximale entre chacun de ces points est de 750 mètres. Malgré cette faible distance entre points (a priori gage d'une certaine homogénéité) et la forte épaisseur de ZNS (susceptible d'engendrer un certain lissage des concentrations), l'hétérogénéité spatiale des résultats est très grande : aucune contamination significative n'est observée dans l'eau du PZ4, alors qu'elle est forte dans le PZ2 et significative dans le PZ3. Ces trois points, situés dans des parcelles agricoles de la moitié amont du bassin, ont par ailleurs un niveau

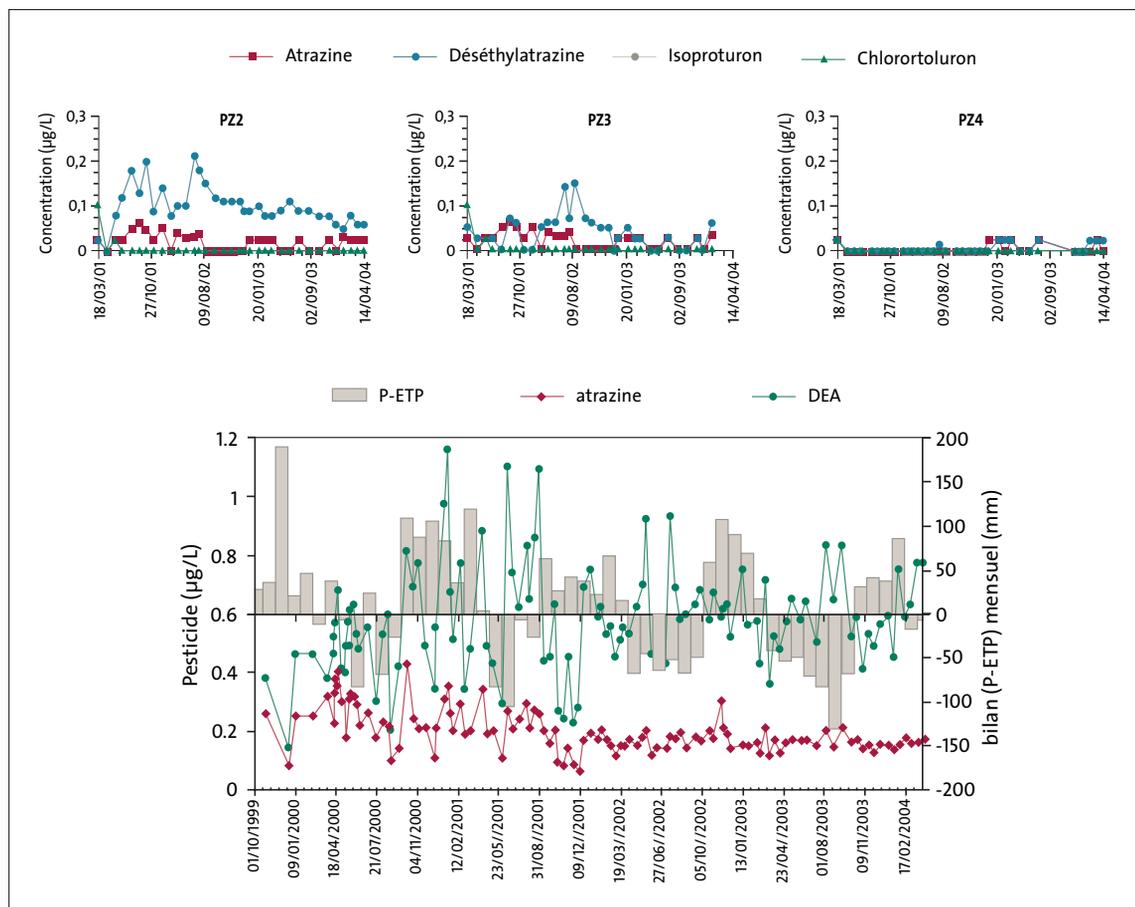


Fig. 2 : Chronique des concentrations en produits phytosanitaires et produits de dégradation détectés dans l'eau souterraine de l'aquifère de Brévilles. Pour les piézomètres (figures du haut), entre mars 2001 et avril 2004, prélèvements mensuels ; pour la source, entre octobre 1999 et mars 2004, prélèvements bi-mensuels. P = pluie ; ETP = évapotranspiration potentielle.

Fig. 2: Time series of pesticide and degradation product concentrations in groundwater in the Brévilles aquifer. Top graphs: Piezometers sampled monthly March 2001 to April 2004; Bottom graph: the spring, sampled twice a month, October 1999 to March 2004. P = rainfall, ETP = potential evapotranspiration.

Source BRGM - C. Mouvet et N. Baran



CONTAMINATION PAR LES PRODUITS PHYTOSANITAIRES

de contamination beaucoup plus faible que celui observé à la source (Mouvet et al., 2004).

La variabilité temporelle peut également être considérable. Pour une même molécule, deux prélèvements successifs à la source effectués à seulement 15 jours d'intervalle peuvent donner des concentrations variant d'un facteur 2. Au pas de temps mensuel adopté pour le suivi de PZ, des fluctuations tout aussi importantes sont observées.

Ces deux variabilités traduisent à la fois la complexité des mécanismes impliqués et l'hétérogénéité du système dans son continuum sol/ZNS/ZS. Les différences de contaminations traduisent aussi bien des différences de pratiques agricoles à l'échelle d'une parcelle de quelques hectares, que des différences d'épaisseur, de matériaux constitutifs et de fracturation de la ZNS, mais aussi de propriétés hydrauliques de la nappe qui peuvent également varier en latéral comme en vertical.

“
Les différences de contamination traduisent aussi bien des différences de pratiques agricoles que des variations des milieux souterrains.”

Mesure au micro-moulinet du débit d'une source.
Measuring spring discharge with a micro current meter.

© BRGM im@gé



Il faut enfin noter que l'arrêt de l'usage d'atrazine sur le bassin d'alimentation depuis avril 2000 n'a entraîné après 3 ans qu'une légère tendance à la diminution des concentrations, qui restent toutefois bien supérieures à la limite de 0,1 µg/L et qui semblent assez stabilisées depuis 1 an. En revanche, les concentrations en déséthylatrazine, principal produit de dégradation de l'atrazine, ne montrent aucune tendance à la

diminution, signe probable de l'existence d'un stock considérable dans le sol, la ZNS et la nappe elle-même. Le retour à une eau dépourvue de contamination par ces deux molécules nécessitera donc une durée nettement plus longue que les 3 années écoulées, probablement de l'ordre d'une ou de plusieurs décennies.

Chantier de forage par carottage pour la création d'un piézomètre.
Core drilling for piezometer installation.

© BRGM im@gé - A. Gutierrez



Conclusion

La contamination de nombreuses masses d'eaux souterraines par les produits phytosanitaires est un fait établi. Les rares études menées à l'échelle de bassins hydrogéologiques montrent que cette contamination, hétérogène spatialement et fluctuante temporellement, résulte d'une combinaison non linéaire de facteurs multiples. La caractérisation fiable de cette contamination, et la prédiction de l'évolution de la qualité, sont donc difficiles et coûteuses. De plus, les temps de réponse à des changements des signaux d'entrée (pratiques culturales, précipitations, recharge...) peuvent être longs, de l'ordre des décennies, augmentant ainsi encore la difficulté de prédiction. La modélisation peut venir en appui à la prédiction, mais elle ne peut être menée à bien que si d'une part le fonctionnement hydrodynamique du bassin est très bien connu, et si d'autre part les mécanismes impliqués dans le devenir des produits (mécanismes dont l'importance relative varie selon la famille de phytosanitaires) sont quantifiés dans des conditions représentatives des situations naturelles. C'est en particulier dans la zone non saturée au-delà de la zone racinaire, et dans la zone saturée, que les données sont les plus rares et que des travaux supplémentaires devraient être menés. ■

“Aucune information sur la pression polluante ni sur le milieu naturel n'est associée au constat de contamination ; par ailleurs, la question des incertitudes analytiques ou des effets “laboratoire d'analyse” est largement sous-évaluée.”



The mechanisms that can cause pesticides to turn up in groundwater can be physical, chemical or biological and can interact with each other. In addition to the soil compartment, the vadose and saturated zones also play a major role in the control of concentrations observed in groundwater. Available results on a national scale indicate that pesticides (both parent and degradation products) are found in 60% of the measurement points of the general groundwater quality monitoring network. Groundwater contamination by pesticides within a given aquifer can be highly variable in both space and time, even in as few as 15 days. The combined specificities of aquifer systems and pesticides result in very long response times, even after changes in farming practices as radical as the total halting of the use of a molecule have taken place.

► DES EXEMPLES DE PROJETS DE RECHERCHE EUROPÉENS DU 5^E PCRD SUR LES PRODUITS PHYTO SANITAIRES

Le projet PEGASE (Pesticides in European Groundwaters: Actual status and Scenarios of possible Evolution; <http://www.brgm.fr/pegase/>) coordonné par le BRGM a permis l'étude détaillée à différentes échelles (depuis la parcelle agricole jusqu'à l'aquifère dans sa globalité) de 5 aquifères contrastés (poreux ou karstiques, superficiels ou profonds) et le développement et la validation

de différents types d'outils de modélisation (de 1 à 3 D). Le projet comportait également un volet socio-économique.

Le projet APECOP (Effective approaches for Assessing the Predicted Environmental Concentrations of Pesticides: A proposal supporting the harmonised registration of pesticides in Europe; <http://www.geru.ucl.ac.be/>) coordonné par l'Université Catho-

lique de Louvain (B), s'est consacré à la validation de modèles de transfert vers les eaux souterraines (PEARL) et de scénarios pédo-climatiques utilisables à l'échelle européenne. L'amélioration de la prise en compte des phénomènes de transfert préférentiel et de volatilisation dans certains modèles (PELMO) était également un des objectifs du projet.



La gestion de l'eau des mines en phase post-extractive

La fin de l'extraction minière peut entraîner des désordres multiples dont la modification du fonctionnement hydrogéologique du bassin minier. L'ennoyage des galeries crée des réservoirs potentiellement utilisables comme ressource en eau. Cependant cette eau est souvent trop minéralisée pour être directement utilisable pour l'alimentation en eau potable, et dans certains cas extrêmes, elle est une source de contamination importante de l'environnement. Tout cela impose une véritable gestion de l'eau des mines abandonnées.

©BRGM / image - R. Fabriol



Robert Fabriol

GÉOCHIMISTE
SERVICE EAU - BRGM
PRÉSIDENT DU GISOS
r.fabriol@brgm.fr

L'exploitation d'une mine souterraine perturbe l'équilibre hydrogéologique en créant des drains artificiels qui modifient les écoulements naturels et qui nécessitent d'évacuer l'eau (l'exhaure) s'écoulant par gravité vers les points les plus bas des travaux. Pendant la période d'exploitation, une mine de grande dimension produit, en climat tempéré, plus d'eau que de minerai. C'est le cas des mines de fer en Lorraine où, en fin d'exploitation, 20 m³ d'eau devaient être pompés pour chaque tonne de minerai extraite. À la fin de l'exploitation, l'arrêt de l'exhaure entraîne une montée du niveau de l'eau dans les réseaux de galeries et dans les aquifères autour de la mine. Un nouvel équilibre hydrogéologique, différent de l'équilibre naturel avant exploitation va alors progressivement se mettre en place.

La gestion de l'eau pendant la période d'exploitation : l'exhaure

Les galeries constituent des drains où l'eau s'écoule plus rapidement que dans les aquifères environnants alors que les techniques d'exploitation utilisant le foudroyage (effondrement provoqué par torpillage des piliers), déstructurent les terrains au toit des galeries et créent des courts-circuits hydrauliques entre la surface et les travaux miniers (fig. 1). L'eau de pluie est alors rapidement drainée par gravité depuis la surface vers les points les plus bas de la mine avec pour conséquence la diminution du débit des sources (qui peuvent, dans certains cas, disparaître) et des rivières.



Dispositif d'exhaure dans un puits d'une mine de fer (Lorraine, France).

Dewatering device in an iron mine shaft (Lorraine, France).

© BRGM im@gé - R.Fabriel

Carte simplifiée du bassin ferrifère lorrain.

Simplified map of the Lorraine iron basin.

©BRGM



Quand le point bas de la mine se situe au-dessus du niveau de base des rivières du secteur et que la pente des galeries est bien orientée, l'eau peut s'écouler par gravité vers l'extérieur. Dans le cas contraire, l'eau doit être pompée pour garder la mine à sec et assurer l'exploitation. Dans le bassin nord des mines de fer de Lorraine, l'exhaure repose sur un système complexe de drains convergeant vers des albraques (réservoirs souterrains) qui servent de réserve d'eau pour les pompes d'exhaure regroupées dans des salles souterraines à différents niveaux jusqu'à 200 m de profondeur (fig. 2). La puissance totale des pompes permet d'extraire un débit équivalent aux pics de crues cinquantennales (environ 7m³/s). Cette eau d'exhaure est utilisée pour l'alimentation en eau potable et industrielle, ainsi que pour le soutien d'étiage des rivières dont le débit a été fortement modifié par l'exploitation de la mine.

La gestion de l'eau à l'abandon de la mine : l'ennoyage

L'arrêt de l'exploitation est suivi d'une phase de mise en sécurité avant l'abandon de la mine. Généralement il est décidé d'arrêter l'exhaure, ce qui conduit à l'ennoyage progressif de la mine (fig. 3), le niveau d'eau dans les galeries remontant en même temps que le niveau dans les aquifères autour. Pour le bassin sud des mines de fer de Lorraine, quatre années ont été nécessaires pour atteindre le point de débordement du réservoir de 230 millions de m³. La remontée du

niveau de l'eau peut conduire à l'apparition de zones humides dans les secteurs affaissés à l'aplomb de l'exploitation. C'est notamment le cas dans certains secteurs des anciennes mines de charbon de la région Nord - Pas-de-Calais et dans certains fonds de vallées pour les mines de charbon en Lorraine mais avec moins d'ampleur.

L'ennoyage du bassin sud des mines de fer en Lorraine (fig. 4) a provoqué la remontée du niveau de la nappe alluviale de la plaine de l'Orne à Moyeuve Grande où l'arrêt de l'exhaure a eu pour conséquences l'apparition de fontis, la fissuration de maisons et l'inondation de caves. Des mesures correctives ont été prises et notamment le creusement d'une galerie de débordement plus basse qui a permis d'abaisser le niveau général du réservoir minier de trois mètres ainsi que celui de la nappe alluviale (Wojtkowiak et al., 2002 ; Vaute et al., 2004).

Pendant l'exploitation, l'eau d'exhaure est rejetée en plusieurs points du réseau hydrographique, répartissant ainsi les débits dans différentes rivières. À l'arrêt de l'exhaure, le point de débordement de la mine ennoyée devient le point de convergence de l'ensemble des écoulements du bassin alimenté par la pluie. Le débit de crue converge en un seul point, ce qui peut nécessiter de recalibrer la rivière à partir du point de confluence.

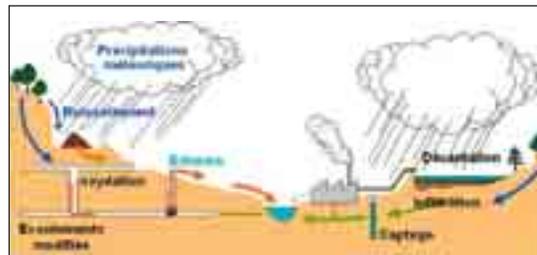


La qualité de l'eau de la mine pendant l'exploitation

Avant l'ouverture de la mine, la roche est en équilibre chimique dans son environnement géologique. Après l'ouverture des galeries, cette roche est brutalement mise en contact avec l'oxygène de l'air qui circule dans les travaux miniers. Des réactions d'oxydation des sulfures contenus dans la roche (comme la pyrite) se produisent alors avec production d'acide sulfurique. Ce type de réactions très répandu produit les effluents acides des mines, connus sous le nom de drainage minier acide (DMA). Les tas de stériles en surface soumis au lessivage par la pluie sont le siège des mêmes réactions d'oxydation. L'augmentation de l'acidité de l'eau, dont le pH peut atteindre dans les cas extrêmes des valeurs inférieures à 2, va favoriser l'attaque des minéraux de la roche avec mise en solution de contaminants comme le plomb, l'arsenic, le zinc, le cuivre... qui seront alors transportés vers les rivières et les aquifères. Le drainage minier acide est un des problèmes majeurs de l'industrie extractive (Banks et al., 1997) et peut atteindre une ampleur catastrophique comme, par exemple, dans les mines métalliques de la ceinture pyriteuse sud ibérique.

Dans certains contextes géologiques particuliers, la présence de minéraux carbonatés ou silicatés dans la roche permet une neutralisation naturelle in situ de

l'acidité de l'eau. La réaction de neutralisation par dissolution de ces minéraux est observée, dans les mines de charbons en Ecosse, dans la mine métallique de Largentière, ainsi que dans les mines de fer de Lorraine où le pH est proche de 7 (Collon et al., 2004). Ce type de mécanisme est appelé drainage minier neutre (DMN). Mais le pH neutre ne rend pas pour autant l'eau potable : cette eau est en effet généralement fortement sulfatée et peut contenir des éléments chimiques qui la rendent impropre à la consommation.



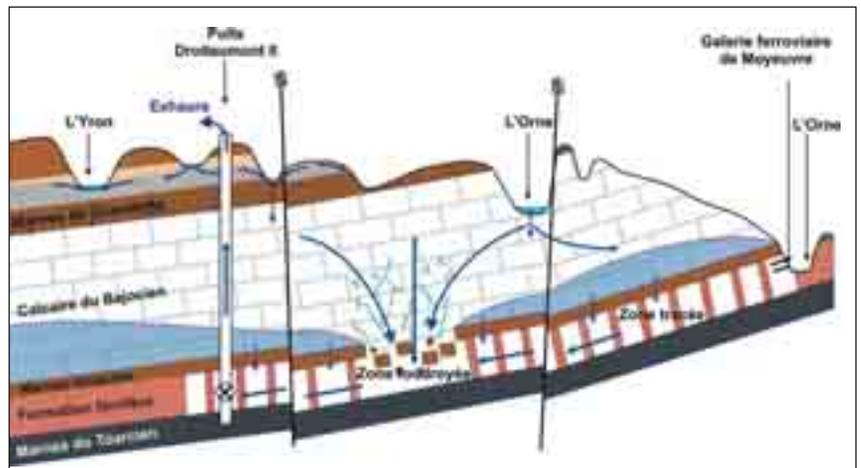
◀ **Fig. 1 : Schéma de principe de fonctionnement hydrogéologique d'un site minier pendant l'exploitation.**
Fig. 1: Schematic of the hydrogeological functioning of a working mine.

Source : BRGM

Fig. 2 : Schéma de fonctionnement hydrogéologique pendant l'exploitation du bassin sud des mines de fer de Lorraine.

Fig. 2: Schematic of hydrogeological functioning during mining of the South Basin of the Lorraine Iron Mines.

Source : BRGM



“ Le drainage minier acide est un des problèmes majeurs de l'industrie extractive et peut atteindre une ampleur catastrophique. ”

Surveillance de la qualité de l'eau dans les mines de fer ennoyées (Lorraine).
Monitoring water quality in flooded iron mines (Lorraine, France).

© BRGM im@gé - R.Fabriol

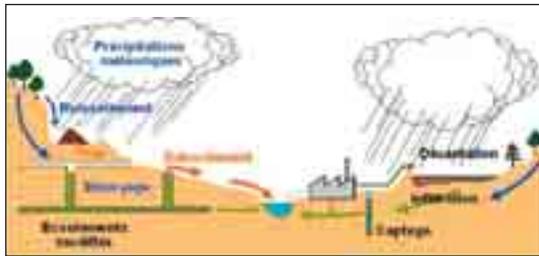


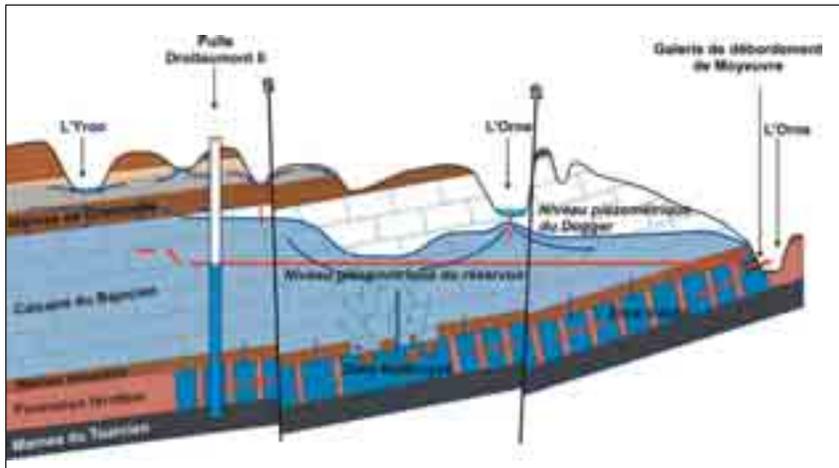
Fig. 3 : Schéma de principe de fonctionnement hydrogéologique d'un site minier après abandon et ennoyage.
Fig. 3: Schematic of the hydrogeological functioning of a mine after closure and flooding.

Source : BRGM

Fig. 4 : Schéma de fonctionnement hydrogéologique après abandon et ennoyage du bassin sud des mines de fer de Lorraine.

Fig. 4: Schematic of hydrogeological functioning after closure and flooding in the South Basin of the Lorraine Iron Mines.

Source : BRGM





La qualité de l'eau de la mine à l'arrêt de l'exploitation

70 L'ennoyage des mines n'est pas sans conséquence sur la qualité de l'eau. Pendant la phase de remplissage, l'eau va lessiver les parois des galeries et la roche fragmentée des zones foudroyées. Ces zones, où la fragmentation de la roche augmente la réactivité, sont à l'origine de l'élévation rapide des concentrations en éléments chimiques dans l'eau. Par ailleurs, l'eau va dissoudre et entraîner les restes de produits chimiques qui ont été utilisés durant l'exploitation et qui n'auront pas pu être évacués en surface. En contrepartie, l'ennoyage des travaux miniers freine l'oxydation des minéraux sulfurés, car l'oxygène ne diffuse que très lentement dans l'eau.

Il existe plusieurs techniques de remédiation du drainage minier acide en surface (Brunet, 2000). Le traitement des effluents par ajout de roche calcaire ou de chaux est classique, mais il conduit à la précipitation de boues riches en sulfate et en métaux lourds. L'utilisation de zones humides artificielles, par l'action conjuguée du système racinaire des végétaux, des bactéries et de la matière organique, permet un traitement efficace des effluents miniers. Cependant, un nouveau problème apparaît concernant la stabilité à long terme des composés organiques ou minéraux qui ont piégé les contaminants au cours de ces traitements. Une modification ultérieure du milieu par assèchement ou apport d'eau, peut entraîner un relargage des contaminants dans l'environnement. Trouver des solutions concrètes de prévention et de traitement des drainages miniers est un objectif de recherche pluriannuel du BRGM.

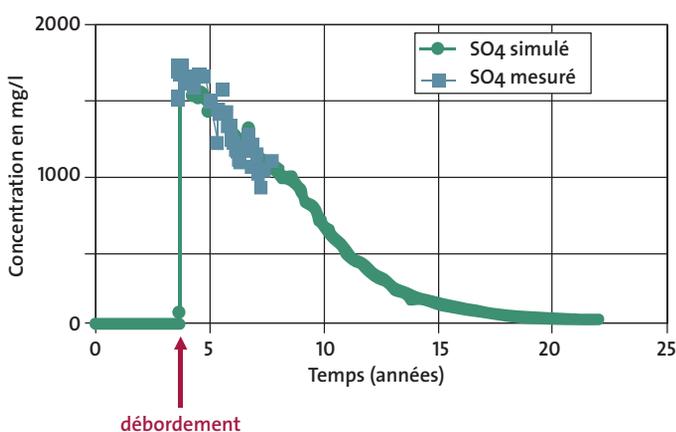
“
Trouver des solutions
concrètes de prévention
et de traitement des
drainages miniers est un
objectif de recherche
pluriannuel du BRGM.
”

La gestion de l'eau des réservoirs : prévoir l'évolution de la qualité de l'eau

L'ennoyage des travaux provoque une modification de la qualité de l'eau dans la mine par rapport à la période d'exhaure. Pendant l'exploitation des mines de fer en Lorraine, l'eau d'exhaure était de qualité suffisante pour l'alimentation en eau potable d'une population de 300 000 personnes. L'écoulement rapide dans les travaux miniers et un temps de séjour limité dans les albaques font que les réactions chimiques n'ont pas le temps de modifier notablement la composition de l'eau pendant son trajet dans la mine. Les concentrations, notamment en sulfate, ont augmenté à l'ennoyage et ont atteint des valeurs supérieures aux normes de potabilité, rendant l'eau des réservoirs impropre à la consommation. Pour les pouvoirs publics, la conséquence directe a été la restructuration du réseau de distribution d'eau potable. La question qui se posait alors était de savoir si l'eau de ces réservoirs redeviendrait potable et dans quel délai.

Cette question se pose à chaque ennoyage de mine (Younger, 1997), même s'il n'existe pas de réponse générale, valable pour tous les sites. En effet, chaque mine s'inscrit dans un contexte hydrogéologique et géochimique qui lui est propre et qui contrôlera l'évolution de la qualité de l'eau du réservoir. La démarche de prévision de l'évolution reposera, d'une part, sur une reconnaissance des écoulements dans le réservoir de la mine ennoyée, et d'autre part, sur une caractérisation des réactions chimiques contrôlant la composition de l'eau. Les modèles actuels permettent de prédire l'évolution de la qualité de l'eau au point de débordement des mines dans différents contextes : mines de charbon en Angleterre et en Ecosse (Adams et Younger, 2001), mine métallique de l'Argentière (Schmitt et al., 2003), mines de fer de Lorraine (Collon, 2003).

Mais dans le cas de réservoirs de grandes amplitudes, la seule prévision de la qualité de l'eau au point de débordement ne suffit plus, car la ressource est exploitée à partir de puits de pompage situés dans différentes zones de la mine. Il est alors nécessaire de prendre en compte la répartition spatiale des caractéristiques hydraulique et géochimique dans la mine (fig. 5), afin d'établir un modèle prédictif de la qualité de l'eau. Le développement de ces outils d'aide à la gestion de ces grands réservoirs fait partie des travaux en cours au BRGM dans le cadre du GISOS (Groupement d'Intérêt scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains). ■



◀ **Fig. 5 : Simulation de l'évolution de la concentration en sulfate dans l'eau d'une mine de fer ennoyée (modèle de réacteurs en réseau).**

Fig. 5. Modelling the evolution of the sulphate concentration in the water of a flooded iron mine (reactor network model).

Source : BRGM



Underground or opencast mine workings modify natural flow paths and enable water to drain rapidly to the bottom of the mine. During mining, water must be pumped out in order to keep workings above the water level. Air flowing in presence of moisture through workings causes the oxidation of sulphides very commonly present in the surrounding rock. This oxidation produces acidic water known as acid mine drainage. In some geological environments, mine drainage is neutral due to the neutralisation of the acidity by dissolution of carbonates. In this case, the water flowing rapidly in the mine workings will be of good quality and can be used for the drinking water supply. When mining ceases and pumping stops, the mine floods until the water level rises to the discharge point. The water in this reservoir is a potential resource for the water supply. However, it is often of poor quality when flooding begins and is usually unusable for several years, until the reservoir rock has been naturally leached. The efficient management of this resource requires an understanding and prediction of the hydraulic and chemical behaviour of mine reservoirs.



L'eau et les risques de glissements de terrain

Les eaux souterraines et de surface jouent un rôle déstabilisant sur les sols et les massifs rocheux avec des manifestations qui peuvent être extrêmes comme les glissements de terrain ou les éboulements de roches. Pour prévenir ces risques, la modélisation hydro-mécanique et hydro-géologique doit aller de pair avec des opérations de drainage des eaux et une surveillance.

Glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes), état en 1998. Dimensions : 600 m de large, 600 m de dénivelée.
The La Clapière landslide (Alpes-Maritimes) in 1998. Dimension: 600 m wide, 600 m high.

© J-L. Durville



Christian Chapeau

CHEF DU GROUPE GÉOTECHNIQUE
LRPC DE LYON-CÊTE DE LYON
Christian.chapeau@equipement.gouv.fr

Jean-Louis Durville

CHARGÉ DE MISSION RISQUES NATURELS
CENTRE D'ÉTUDES TECHNIQUES DE
L'ÉQUIPEMENT DE LYON
jean-louis.durville@equipement.gouv.fr

Les glissements de terrain s'expliquent par la conjonction de facteurs permanents ou de prédisposition (nature et structure des formations géologiques, pente, etc.) et de facteurs déclenchants comme la pluie, une fuite de canalisation, une secousse sismique ou des travaux de terrassement malencontreux. Les nappes souterraines, et plus exactement leurs fluctuations liées aux conditions météorologiques ou parfois aux actions humaines, sont très souvent à l'origine de déclenchements des mouvements de versants : glissements, éboulements, coulées ou laves torrentielles.

Sur les pentes, l'action déstabilisatrice de l'eau infiltrée dans le sol est triple :

- ▶ accroissement du poids volumique des sols par augmentation de la teneur en eau : cet effet est le plus souvent mineur ;
- ▶ changement de comportement rhéologique : le sol passe de l'état solide à l'état de fluide visqueux ; certaines coulées de boue ou laves torrentielles sont ainsi engendrées par l'imbibition d'une masse de sol. On peut aussi évoquer, lors d'un séisme, la liquéfaction des sables sous nappe qui est à l'origine de nombreux glissements sur très faible pente, ou le comportement thixotropique de certaines argiles sensibles à forte teneur en eau en Scandinavie ou au Canada. Par ailleurs, des circulations d'eau souterraine peuvent engendrer sur le long terme une altération progressive des terrains encaissants, avec dégradation de leurs caractéristiques mécaniques ;
- ▶ action mécanique défavorable des pressions d'eau souterraine.

C'est ce dernier processus, le plus courant, qui retiendra notre attention.

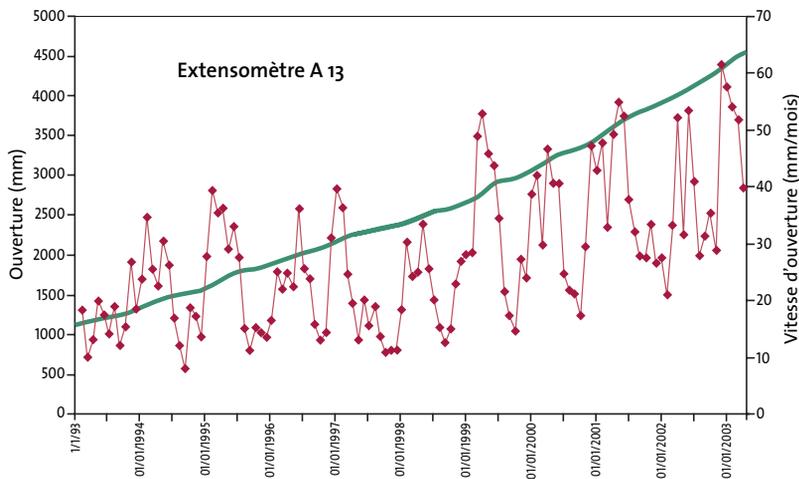


Fig. 1 : Site de Séchillienne (Isère) : ouverture et vitesse d'ouverture de l'extensomètre A 13 (1993-2003).

Fig. 1: Séchillienne site (Isère, France): opening and opening speed of the A 13 extensometer (1993-2003).

Source : C. Chapeau et J-L. Durville

Eau et glissements de terrain : quelques exemples

Les épisodes de très fortes pluies ou de fonte massive et rapide des neiges engendrent de multiples instabilités superficielles et glissements de terrain. Ainsi, une pluie brève de très forte intensité entraînera de nombreux glissements superficiels et des coulées alors que des pluies d'intensité modérée mais persistant plusieurs semaines sont susceptibles de provoquer des glissements de grande ampleur.

À Roquebillière (Alpes-Maritimes), le 24 novembre 1926, un glissement mobilisant plusieurs centaines de milliers de mètres cubes dégénère en coulée boueuse, détruit plusieurs maisons et fait 19 victimes. Cet évènement s'explique sans doute par la mise en charge de conduits karstiques dans les gypses du Trias qui aurait brutalement déstabilisé la couverture morainique. Les mois d'octobre et novembre 1926 avaient en effet été exceptionnellement pluvieux avec plus de pluie dans le seul mois précédant l'évènement que la pluviosité moyenne annuelle. Plusieurs autres mouvements de terrain se sont d'ailleurs produits dans la région à cette époque.

L'éboulement du Monte Zandila en Valtellina (Lombardie, Italie), survenu en 1987, a mobilisé plus de 30 millions de mètres cubes et fait 27 victimes. De très fortes pluies entre les 15 et 20 juillet ont engendré de nombreuses crues torrentielles et coulées de boue dans toute la vallée. Les températures élevées à partir du 21 juillet ont en outre accéléré la fonte des neiges sur les sommets. La rupture du Monte Zandila est survenue le 28 du même mois [Azzoni et al., (1992)].

Dans les Langhe (Piémont, Italie), des pluies extrêmes (plus de 250 mm en 24 heures) ont provoqué en novembre 1994 des crues catastrophiques et plusieurs centaines de glissements, notamment des glissements plans le long des joints des marnes sableuses.

En octobre et novembre 2000, il est tombé environ 900 mm de pluie cumulée dans l'arrière-pays niçois avec à la clé de nombreuses instabilités, essentiellement des petites coulées ou glissements superficiels. Au total, plus d'une centaine d'arrêts "cat'nat"⁽¹⁾ ont été pris en application de loi de 1982 sur l'indemnisation des catastrophes naturelles.

À Séchillienne (Isère), vaste mouvement de versant affectant des formations métamorphiques paléozoïques, une surveillance est en place depuis de nombreuses années et révèle un mouvement continu. Le mécanisme de déformation est complexe, mais on observe clairement des variations saisonnières de la vitesse du mouvement (Fig. 1), qui se superposent à une tendance générale à l'accélération. Ces variations ne peuvent s'expliquer que par les fluctuations d'apports hydriques sous forme de pluie ou de fonte de neige qui s'infiltrent dans le massif.

“ Les épisodes de très fortes pluies ou de fonte massive et rapide des neiges engendrent de multiples instabilités superficielles et glissements de terrain. ”

⁽¹⁾ La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 modifiée institue un régime légal de garantie des catastrophes naturelles fondé sur la notion de solidarité. Toute personne qui possède pour ses biens (habitation, véhicule, entreprise) une assurance dommages ou pertes d'exploitation est également couverte en cas de dommages causés à ses biens par une inondation, un mouvement de terrain, la sécheresse, une avalanche, un séisme... Une condition toutefois : que l'évènement soit déclaré catastrophe naturelle par les pouvoirs publics. Cette déclaration est fondée sur l'analyse de "l'intensité anormale du phénomène naturel". Le taux de cotisation de la garantie catastrophes naturelles est identique pour tous les assurés. Fixé par arrêté, de 9 % à l'origine, il est passé en septembre 1999 à 12 % de la cotisation des contrats incendie, explosion, vol, multirisques habitations ou entreprise. L'équilibre du régime, gouverné par les mécanismes normaux d'assurance et de réassurance, est in fine garanti par l'Etat.

Quantifications empiriques

Le déclenchement des instabilités

Divers auteurs ont tenté de définir des critères météorologiques de déclenchement d'instabilités, notamment à partir de cumuls de pluie sur n jours ou du couple intensité/durée de l'épisode pluvieux. L'expérience montre cependant que des facteurs plus subtils entrent en jeu. Ainsi, une période de sécheresse provoque des fissurations par retrait des sols argileux superficiels, ce qui facilite l'infiltration de l'eau dans les fissures lors d'épisode pluvieux et déstabilisant.

Sur la route du littoral (RN 1) de La Réunion, les chutes de blocs de basalte de la falaise littorale sont nombreuses lors des fortes pluies tropicales. L'étude statistique montre que le nombre mensuel N de chutes de blocs peut être relié à la hauteur d'eau mensuelle P . La corrélation reste toutefois médiocre : l'influence de l'eau sur les chutes est sans doute plus complexe qu'une simple relation linéaire, et d'autres facteurs jouent sans doute un rôle : périodes préalables de sécheresse, altération des couches de tufs volcaniques, etc.

La prévision des vitesses de glissement

À Séchilienne par exemple, une corrélation entre apports hydriques et vitesse peut être mise en évidence. Les apports A_n du mois n sont constitués de la pluie augmentée de la neige fondue et diminuée de l'évapotranspiration. La vitesse V_n du mois n est corrélée avec une combinaison pondérée des apports des mois n , $n-1$ et $n-2$. La corrélation n'est guère satisfaisante cependant, et l'on peut invoquer deux raisons à cela : la complexité du système hydrogéologique (non-linéarité) et l'existence de facteurs purement mécaniques influençant la vitesse.

Signalons l'emploi des réseaux neuronaux qui a donné des résultats intéressants sur les sites de La Chenaula en Suisse et de Sallèles en Auvergne [Mayoraz et al., (1996)].

“ Les modèles mécaniques comme les mesures *in situ* démontrent l'action déstabilisante des eaux souterraines dans les sols comme dans les massifs rocheux. ”

Eau et déclenchement des instabilités

Les modèles hydro-mécaniques : cas des sols

Dans les sols meubles, l'eau présente entre les grains solides développe une pression interstitielle u . La loi de Terzaghi introduit la relation entre contraintes totales σ , contraintes effectives σ' (s'exerçant sur le squelette solide) et pression interstitielle u : $\sigma = \sigma' + u$. Le rôle mécanique de l'eau peut alors être étudié de deux manières, qui sont en fait équivalentes :

- ▶ si l'on prend comme système mécanique une portion de sol, y compris son eau interstitielle, ce système est soumis à des forces volumiques, la gravité par exemple, et à des contraintes totales σ sur son contour (Fig. 2a);
- ▶ si l'on prend comme système mécanique une portion de sol avec les seuls grains solides, il faut tenir compte de deux forces volumiques supplémentaires, la poussée d'Archimède et les forces d'écoulement induites par la circulation de l'eau, et ce sont les contraintes effectives σ' qui s'exercent sur le contour (Fig. 2b).

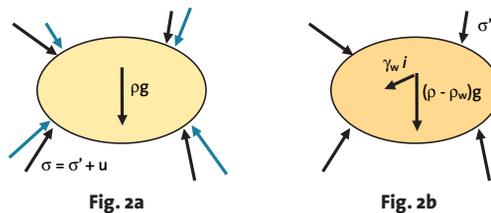


Fig. 2 : Deux manières de rendre compte du rôle mécanique de l'eau interstitielle.

Fig. 2: Two ways to account for the mechanical role of interstitial water.

Source : C. Chapeau et J-L. Durville

Le critère de rupture le plus simple que l'on utilise dans les sols est le critère de Mohr-Coulomb, qui exprime la résistance au cisaillement τ_f à l'aide de deux caractéristiques, la cohésion c et l'angle de frottement φ :

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \tan \varphi = c + \sigma' \tan \varphi$$

Lorsque le sol n'est pas saturé (remblais ou sols des pays tropicaux, par exemple), l'eau exerce une succion par capillarité qui crée une cohésion apparente pouvant atteindre quelques centaines de kilopascals ; des glissements de terrain peuvent se produire en cas de saturation complète, à la suite par exemple d'une pluie intense et durable entraînant la descente du front de saturation à partir de la surface et l'annulation de la cohésion apparente.



**Le glissement de terrain du
Tour, dans la vallée de
Chamonix, en Haute-Savoie.**
*The Tour landslide, Chamonix
Valley, Haute-Savoie.*

© BRGM im@gé - F.Michel

La stabilité d'un talus s'étudie généralement en déterminant d'abord le champ des pressions interstitielles u , puis en étudiant la stabilité à partir de $\sigma' = \sigma - u$. Il faut, bien entendu, tenir compte des changements dans la distribution des pressions u dans le sol au cours du temps :

- dans le cas d'une excavation, une phase transitoire s'instaure avant d'atteindre un nouveau régime permanent ; cette phase dure de quelques jours à quelques années en général ;
- dans le cas d'un versant naturel, l'évaluation de la stabilité prend en compte des conditions raisonnablement défavorables de hauteur de nappe, par exemple nappe affleurante sur le versant (encadré n°1).

Une situation particulièrement défavorable est celle où des formations de pente argileuses surmontent un substratum aquifère pouvant se mettre en charge lors d'épisodes pluvieux exceptionnels. Ce mécanisme a été évoqué pour expliquer la coulée de Roquebillière de 1926 (conduits de dissolution dans le gypse triasique recouvert de moraines), les coulées catastrophiques de 1998 à Sarno en Campanie (karsts dans les calcaires surmontés de cendres et tufs volcaniques altérés), ou le glissement dramatique de Cabassou (Guyane) en 2000 (granite fissuré recouvert de latérites argileuses).

► 1 - STABILITÉ D'UNE PENTE INFINIE

Le versant, de pente constante, est formé de colluvions reposant sur un substratum imperméable (Fig. 3). La nappe est à une hauteur h_w et l'eau s'écoule parallèlement à la pente dans

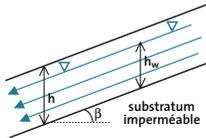


Fig. 3 : Stabilité d'une pente infinie

Fig. 3: Stability of an infinite slope

Source : C. Chapeau et J-L. Durville

la couche de sol. Pour un glissement à l'interface sol/substratum, la stabilité est évaluée au moyen du coefficient de sécurité F , rapport des forces résistantes mobilisables aux forces motrices.

Dans ce cas, F est égal au rapport de la résistance au cisaillement τ_f donnée par (1) à la contrainte de cisaillement sur l'interface, et l'on a :

$$F = \frac{c}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} + \left(1 - \frac{\gamma_w h_w}{\gamma h}\right) \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

F décroît lorsque h_w augmente et, pour $h_w = h$ (nappe affleurante), dans le cas courant d'un sol sans cohésion à long terme ($c = 0$), avec $\gamma \approx 20 \text{ kN/m}^3$, on trouve que le coefficient de sécurité

$$F \approx \frac{1}{2} \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

est réduit de moitié environ par rapport à l'état sec.

Le rôle de l'eau est clairement mis en évidence dans le cas d'un barrage en terre ou d'une berge naturelle. La Figure 4 présente trois situations-types :

- Cas I : talus sans eau, soumis à la gravité (et aux réactions du sol le long de la surface de glissement).
- Cas II : talus en équilibre hydraulique avec le réservoir plein.
- Cas III : talus avec eau après une vidange rapide.

Dans les deux dernières configurations, seules sont figurées les forces hydrauliques s'exerçant sur la portion de sol dont on analyse l'équilibre. En examinant l'effet des forces hydrauliques en présence, on voit immédiatement que les degrés de stabilité se rangent dans l'ordre suivant : $\text{III} < \text{I} \leq \text{II}$.

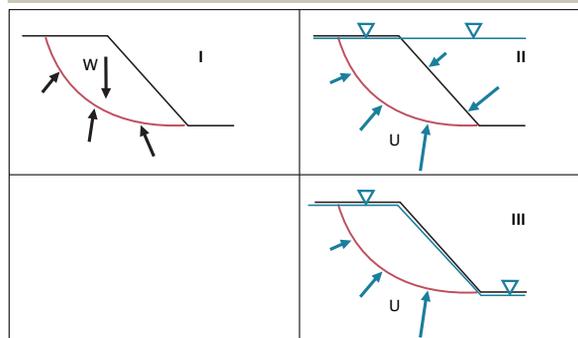


Fig. 4 : Différentes conditions de stabilité d'un barrage en terre.
Fig. 4: Various stability conditions of an earth dam.

Source : C. Chapeau et J-L. Durville

Cas des massifs rocheux : pressions fissurales

Dans les massifs rocheux, les instabilités sont le plus souvent limitées par les discontinuités (diaclasses, failles, joints stratigraphiques, etc.) dans lesquelles l'eau exerce une pression sur les épontes, la roche elle-même étant supposée quasi-imperméable. Dans l'exemple de l'encadré n° 2, on peut supposer qu'en cas d'orage, la fissure arrière se remplit rapidement : F diminue alors fortement (le dénominateur contient un terme qui augmente comme le cube de la hauteur d'eau) et peut s'abaisser en dessous de 1. Dès que le bloc commencera à basculer, il est probable que la fissure se drainera rapidement et que l'équilibre se rétablira.

De façon analogue, il semble qu'une alternance de périodes durant lesquelles les fractures se colmatent et se débouchent, en raison même des déformations du massif, explique les changements de comportement du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes), qui mobilise environ 50 hm³ de gneiss et migmatites fracturés. L'alerte de 1987-1988, avec un pic de vitesse approchant le décimètre par jour, a tourné court après une décélération importante que l'on attribue à un accroissement de perméabilité et donc à un drainage rapide du massif en mouvement.

Eau et vitesse de glissement

L'alimentation des nappes souterraines à partir des précipitations P obéit à la relation suivante :

$$P = E + R + I$$

où E désigne l'évapotranspiration, R le ruissellement et I l'infiltration.



La Réunion, route du littoral (RN1) : de nombreux éboulements se produisent le long de cette falaise artificielle.

The coast highway (RN1) in Reunion: rock falls are common along this man-made cliff.

Source : J.-L. Durville

Pour les glissements de terrain établis, dont la vitesse fluctue au gré des saisons, avec des valeurs pouvant aller de quelques millimètres à quelques mètres par an, la commande hydraulique peut être schématisée de la façon suivante : $P_e \rightarrow H \rightarrow V$. La pluie brute P est le plus souvent remplacée par la pluie efficace $P_e = P - E$; la lettre H représentant l'eau souterraine peut correspondre à une hauteur de nappe ou à une pression interstitielle en un point représentatif ; V désigne la vitesse de glissement. La première partie du modèle ($P_e \rightarrow H$) est purement hydrogéologique ; on utilise souvent un modèle à réservoir(s) pour représenter l'alimentation de la nappe par les apports de surface. La seconde partie ($H \rightarrow V$) exprime le rôle mécanique de l'eau souterraine.

Pour le glissement de La Clapière, dans lequel il n'y a pas de nappe bien identifiée, mais plutôt des circulations fissurales mal connues, Favre *et al.* (1992) ont employé un modèle simple donnant une pseudo-hauteur piézométrique H(n) en fonction des apports A(n), pluie ou neige fondue au jour n :

$$H(n+1) = \sqrt{H(n) - \beta} + \alpha A(n).$$

► 2 - STABILITÉ AU RENVERSEMENT DE LA MASSE ROCHEUSE

Cas d'une masse rocheuse sur un plan incliné, limitée par une fissure arrière (Fig. 5) : étudions la stabilité au renversement de la masse rocheuse, la fissure étant remplie d'eau sur une hauteur h_w ; supposons par ailleurs que l'eau s'écoule lentement sous la masse rocheuse, la pression d'eau décroissant linéairement.

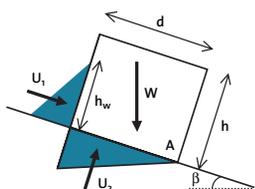


Fig. 5 : Schéma d'un bloc sur une pente

Fig. 5: Schematic of a boulder on a slope

Source : C. Chapeau et J.-L. Durville

Si l'on définit le coefficient de sécurité comme le rapport du moment des forces résistantes au moment des forces motrices, moments pris par rapport au point A :

$$F = \frac{Wd \cos \beta}{Wh \sin \beta + \frac{1}{3} \gamma_w (h_w^3 + 2dh_w)}$$

D'autre part, la relation linéaire suivante s'est révélée satisfaisante : $V(n) = \lambda H(n) + \mu$. Ce type de relation évoque un comportement rhéologique visqueux de la surface de rupture, dans lequel un régime permanent, à vitesse constante, s'instaure si les efforts sont constants : une variation des efforts moteurs (pressions d'eau) donne lieu rapidement à l'établissement d'un nouveau régime permanent. Ce modèle, de type "boîte grise", a donné de bons résultats à La Clapière, mais les paramètres α, β, λ et μ doivent être recalés fréquemment.

Dans les glissements de sols, on observe souvent un comportement très tranché : le mouvement est faible ou nul en dessous d'une certaine hauteur piézométrique, mais dès que la nappe dépasse ce niveau, le versant se met en mouvement. Le phénomène présente donc des périodes de repos, parfois longues, entrecoupées de "crises" plus ou moins brutales, comme cela a été mis en évidence sur le site expérimental de Sallèdes dans le Massif Central [Pouget & Livet, (1994)].

Enfin, des modèles de couplage hydro-mécanique, incorporant la géométrie du glissement en trois dimensions, ont pu être développés [Vulliet & Hutter, (1988)] suivant les principes des milieux continus biphasés. Mais ces modèles relèvent encore du domaine de la recherche.

L'eau et la gestion du risque de glissement de terrain

La maîtrise du risque

La lutte contre l'eau est une des actions les plus efficaces pour prévenir, stabiliser ou ralentir un glissement de terrain. La connaissance du mode d'alimentation de la nappe est indispensable pour intervenir efficacement. La Figure 6 schématise quelques configurations classiques dans les versants naturels, avec alimentation par l'impluvium local, par l'amont (cas fréquent de versants marneux situés au pied d'un plateau rocheux fissuré, calcaire ou basaltique par exemple) ou par la profondeur, à la faveur d'une couche perméable ou d'une faille.

La lutte contre l'eau est une des actions les plus efficaces pour prévenir, stabiliser ou ralentir un glissement de terrain.

Des systèmes d'alerte reposant sur des critères pluviométriques ont été mis en œuvre dans certains sites.



Drains subhorizontaux avec exutoire bien aménagé, autoroute A43 (Savoie).
Subhorizontal drains with well-designed outlets, A43 motorway (Savoie, France).

Source : J.-L. Durville

Selon les cas, on procèdera à la collecte des eaux de surface ou à un drainage par drains subhorizontaux, tranchées, galeries ou puits drainants afin de diminuer les pressions hydrauliques. Mais cela suppose de trouver des zones de perméabilité suffisante dans les terrains meubles afin que le rayon d'action des drains soit maximum, ou encore de rencontrer des fractures "productrices" dans les massifs rocheux.

Le succès d'un drainage repose aussi sur son entretien pour éviter un risque de colmatage par des dépôts sulfatés, calcaires ou ferrugineux, des arrivées de fines, etc.

La surveillance et l'alerte

Puisque le rôle des précipitations dans le déclenchement des instabilités est reconnu, des systèmes d'alerte reposant sur des critères pluviométriques ont été mis en œuvre dans certains sites.

Dans le cas de la RN 1 à La Réunion, un critère de gestion du risque a été adopté depuis plusieurs années par la Direction Départementale de l'Équipement : si la quantité d'eau tombée en 24 heures dépasse 15 mm, la chaussée côté falaise, celle qui est la plus exposée aux chutes de pierres, est fermée à la circulation pendant 72 heures. On évite ainsi d'exposer les usagers aux périodes les plus critiques, et l'on minimise la gêne occasionnée par la fermeture de la route. L'analyse statistique des événements a montré que ce critère est sans doute optimal, même si des pierres tombent aussi lorsque la route est ouverte.

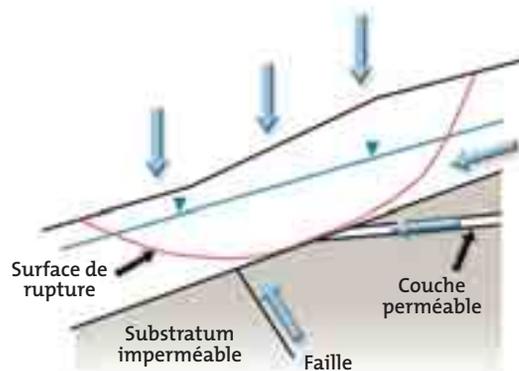


Fig. 6 : Schéma illustrant les principaux types d'alimentation en eau dans un glissement de terrain.
Fig. 6: Schematic diagram of the main types of water inputs in a landslide.

Source : C. Chapeau et J.-L. Durville

À La Clapière, le passage d'une surveillance normale à une surveillance renforcée est décidé lorsque plusieurs capteurs cinématiques et/ou pluviométriques dépassent simultanément des seuils préalablement fixés. Cependant, compte tenu des implications et des risques, ce passage ne peut être entièrement automatique et l'intervention du spécialiste est requise pour validation.

Conclusions

L'eau souterraine est un facteur majeur de localisation des glissements, de déclenchement ou d'accélération des mouvements. Cela démontre toute l'importance de l'étude hydrogéologique pour la compréhension de l'évolution des glissements de terrain, mais aussi pour la maîtrise du risque correspondant. Reposant sur les observations de terrain ou la pose de piézomètres, cette étude doit être menée sur une durée suffisante pour apprécier les fluctuations saisonnières ou annuelles des nappes.

L'introduction d'un modèle hydrogéologique dans l'étude de stabilité permet d'évaluer l'influence des eaux souterraines sur la stabilité et de tester l'efficacité d'un traitement par drainage. Il apparaît cependant que le couplage hydraulique/mécanique est parfois complexe. Pour de grands versants rocheux comme

La Clapière et Séchilienne, la compréhension du rôle de l'eau dans la déformation et le mouvement est donc encore très imparfaite. ■

“L'introduction d'un modèle hydrogéologique dans l'étude de stabilité permet d'évaluer l'influence des eaux souterraines sur la stabilité et de tester l'efficacité d'un traitement par drainage.”



Water is the cause of most land movement, and the relationships between rainfall, groundwater and landslides are complex. Both mechanical models and in situ measurements show the destabilizing effect of groundwater in soil and rock. Acting on water, notably by drainage, is therefore one of the keys to landslide risk control.

Bibliographie : Alfonsi, P. (1997). Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains. Exemple de la Clapière et de Séchilienne (France). *Revue française de géotechnique*, 79, pp. 3-12 — Azzoni A., Chiesa S., Frassoni A., Govi M. (1992). The Valpola landslide. *Engineering Geology*, 33, pp. 59-70. — Favre J.-L., Gervreau E., Durville J.-L. (1992). Prévoir l'évolution des mouvements de terrain. *Revue française de géotechnique*, 59, pp. 65-73. — Mayoraz F., Cornu T., Vulliet L. (1996). Using neural networks to predict slope movements. *Proc. International Symposium on Landslides (Trondheim)*, Balkema, pp. 295-300. — Pouget P., Livet M. (1994). Relations entre la pluviométrie, la piézométrie et les déplacements d'un versant instable (site expérimental de Sallèles, Puy-de-Dôme). *Études et recherches des LPC*, GT 57, 198 p. — Vulliet L., Hutter K. (1988). Continuum model for natural slopes in slow movement. *Géotechnique*, 38, n° 2, 199-217.

Instruments de mesure pour l'hydrologie, l'hydrogéologie et la météorologie



OTT Orpheus Mini

Enregistreur de niveau et de température de nappe



ADCP - RDI
Mesures ponctuelles ou continues du débit par effet Doppler. Jaugeage direct



PARSIVEL
Disdromètre capteur de temps présent
Mesure LASER



Bouée autonome
de suivi et d'alerte de la qualité des e aux alimentation solaire transmission GSM



Hydrolab - série 5
Sondes multiparamètres pour la mesure autonome de la qualité des eaux de surfaces et souterraines



Capteurs Optiques
Oxygène Dissous LDO
Cyanobactéries
Chlorophylle a
Rhodamine WT

- Grande stabilité des mesures à long terme
- Robuste et Fiable: membrane de mesure en céramique
- Faible diamètre: 22 mm pour tube à partir de 1"
- Essai de pompage configuration de cycle début/fin
- Autonomie jusqu'à 5 ans
- Suivi de l'alimentation intégré
- Communication GSM en option



OTT FRANCE
Europarc de Pichaury
Bat D2, BP 395
13799 AIX EN PROVENCE CX 3
Tél: 04 42 90 05 90
Fax: 04 42 90 05 95
E-mail: info@ottfrance.fr
www.ottfrance.com
ou www.hydrolab.com



La contribution des eaux souterraines aux inondations

Modélisation des hautes eaux de la Somme

Les importantes inondations de la Somme au printemps 2001 ont révélé le rôle fondamental des eaux souterraines dans l'apparition et l'intensité de certaines crues. Les modèles de prévision développés doivent maintenant permettre d'annoncer les périodes à risque suffisamment tôt pour ce type de crues.



Thierry Pointet

HYDROGÉOLOGUE
MISSION DE SERVICE PUBLIC
SUR LES EAUX SOUTERRAINES
SERVICE EAU - BRGM
t.pointet@brgm.fr



Nadia Amraoui

HYDROGÉOLOGUE MODÉLISATEUR
SERVICE EAU - BRGM
n.amraoui@brgm.fr



Vincent Mardhel

HYDROGÉOLOGUE
SERVICE EAU - BRGM
v.mardhel@brgm.fr



Philippe Negrel

GÉOCHIMISTE ISOTOPISTE
SERVICE METROLOGIE,
MONITORING, ANALYSE
p.negrel@brgm.fr



Marie-Luce Noyer

HYDROGÉOLOGUE MODÉLISATEUR
SERVICE EAU - BRGM
ml.oyer@brgm.fr



Didier Pennequin

HYDROGÉOLOGUE MODÉLISATEUR
CHEF DU SERVICE EAU - BRGM
d.pennequin@brgm.fr



Dominique Thiery

HYDRODYNAMICIEN
SERVICE EAU - BRGM
d.thiery@brgm.fr

Les inondations de la Somme au printemps 2001 soulevèrent l'idée d'une crue de nappe qui fit l'effet d'une découverte. Une forte contribution des eaux souterraines semblait manifeste à l'examen des venues d'eau apparues dans des excavations à flanc de coteau (photo 1), en hauteur par rapport à la plaine alluviale, ou à l'observation des vallées sèches sur le plateau picard qui se remettaient en eau avec des écoulements très présents, plus de 100 mètres au-dessus de la vallée de la Somme (photo 2). On remettait en cause le cliché de la crue provoquée par le seul ruissellement consécutif à des pluies intenses.

L'historique des crues de la Somme [Champion (1858)] a révélé des événements importants, survenus principalement en janvier et février, d'une durée voisine de la semaine, succédant le plus souvent à des épisodes froids, mais jamais il n'a été fait allusion à des crues d'une durée de deux mois, voire plus, se prolongeant jusqu'en mai ou juin.

L'hydrosystème et la contribution possible des nappes

Une crue est un phénomène intégrateur. Dans un milieu stratigraphiquement homogène, les composantes des écoulements de la pluie au sol (diminuée de l'évapo-transpiration) sont (fig. 1) le ruissellement, les écoulements préférentiels et assez rapides dans les parties les plus perméables du sous-sol superficiel, les écoulements souterrains plus lents avec une accumulation temporaire de l'eau au sein de réservoirs aquifères, parfois de grande capacité, enfin les écoulements en rivière. Le poids relatif de ces composantes

Photo 1 - Une crue de versant : affleurement de nappe à flanc de coteau provoquant des écoulements exceptionnels au jour.

Picture 1 - Hillside seepage: Outcropping water table on hillslope causing uncommon seepage.

© BRGM-Im@gé



“ Les inondations de la Somme au printemps 2001 soulevèrent l'idée d'une crue de nappe qui fit effet d'une découverte. ”



Photo 2 - Crue de nappe sur un plateau : affleurement de la nappe et naissance d'un écoulement dans une vallée sèche sur le plateau picard (bassin de la Somme, 2001).

Picture 2 - Groundwater flood on a plateau: Outcropping water table and commencement of flow in a dry valley on the Picardy Plateau (Somme River Basin, 2001).

© BRGM-Im@gé

peut varier d'un événement pluvieux à l'autre et dépend de la morphologie du bassin versant, de son hydrogéologie, des états de surface - y compris le gel des sols en hiver-, de l'occupation des sols, et de facteurs temporels : état instantané du bassin, historique des pluies.

Les nappes alluviales ne sont souvent qu'un élément mineur au sein de l'hydrosystème. En période de hautes eaux, les nappes alluviales, vite saturées, perdent toute fonction régulatrice et leur contribution consiste surtout à transmettre les flux per ascensum qui proviennent des aquifères sous-jacents. Le bassin versant hydrogéologique dans son ensemble constitue le réservoir souterrain principal et sa vidange s'opère par le relais des nappes alluviales.

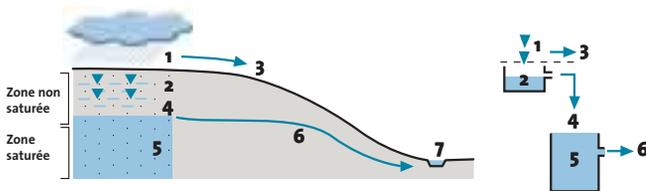
Le bassin versant de la Somme (20 km x 120 km, fig. 2) est un plateau qui domine la plaine alluviale de près de 150 m. Même si les nappes descendent à une certaine profondeur -40 m sous le sol au cœur du plateau- et si la perméabilité n'est pas uniformément développée au sein du massif crayeux, ces masses d'eau n'en sont pas moins des objets naturels colossaux (photo 3) qui dominent par endroits la vallée de plus de 100 m.

Une typologie des crues

Les différentes composantes des écoulements opèrent selon des constantes de temps très différentes qui sont un facteur très important dans le phénomène de crue. A contrario leur méconnaissance est la cause des erreurs d'analyse les plus fréquemment commises.

Les différents types de crues sont définies comme suit.

1) Des pluies intenses et brutales sur un bassin au relief accusé vont provoquer un ruissellement intense et une crue par engouffrement dans les vallées. Sur sol sec, l'infiltration est insignifiante dans ce court laps de temps. L'unité de temps est de quelques heures à quelques jours : c'est le cas des crues éclair du sud de la France (Gard, Vidourle, mais aussi Maurienne, Dordogne, etc.), consécutives à des pluies d'orage intenses, sur sol sec. Ce sont les pluies et crues de l'arc cévenol. Le délai de prévision n'est que de quelques heures.



- 1 - Pluie
- 2 - Réserve facilement utilisable (RFU) du sol
- 3 - Ruissellement
- 4 - Infiltration/recharge
- 5 - Nappe
- 6 - Vidange gravitaire de la nappe
- 7 - Cours d'eau alimenté par la nappe

Fig. 1 : Schéma simplifié des écoulements dans le sol, montrant une nappe en position haute par rapport à l'altitude du cours d'eau. A droite le schéma représente l'architecture du logiciel Gardenia et le principe des réservoirs emboîtés.

Fig. 1: Schematic of groundwater flow, showing a water table perched high above the watercourse. On the right, the sketch represents the architecture of the Gardenia software and the principle of nested reservoirs.

© BRGM-Im@gé

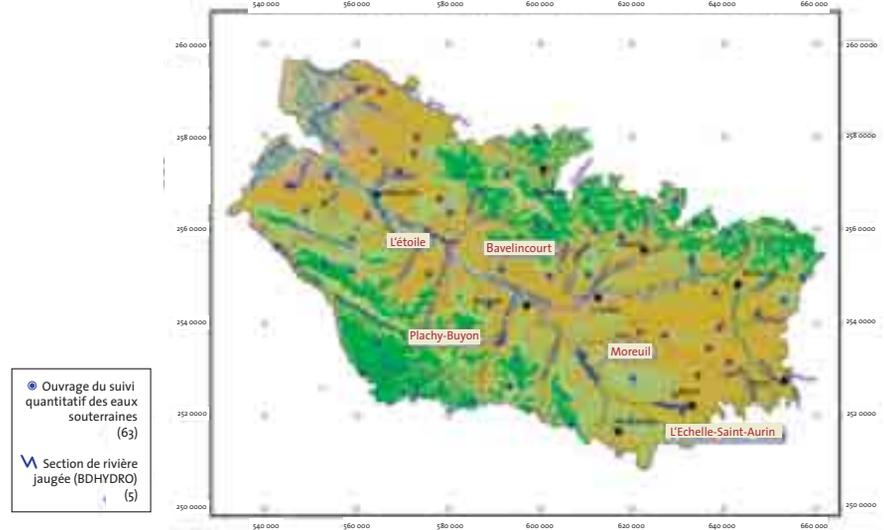
“ On remettait en cause le cliché de la crue provoquée par le seul ruissellement consécutif à des pluies intenses. ”

“ Les différentes composantes des écoulements opèrent selon des constantes de temps très différentes qui sont un facteur très important dans le phénomène de crue. ”

2) Un bassin sédimentaire aquifère à relief de plateau, qui reçoit des pluies en quantité supérieure à la normale pendant plusieurs années consécutives, voit se produire un transit par les nappes, supérieur au débit moyen que celles-ci connaissent en années moyennes. La constante de temps - le temps de réaction d'une nappe pour schématiser - est le mois voire plusieurs mois. On dispose donc sinon d'un délai de prévision, du moins d'un délai d'anticipation sur l'apparition d'une "période à risque" d'au moins un mois.

3) Les crues qui surviennent lors d'un redoux accompagné de fortes pluies, en hiver ou fin d'hiver, sont fréquentes mais peu connues. C'est souvent le cas de crues survenant en janvier ou février dans la moitié nord de la France et qui correspondent à la fin d'une période froide où le sol a gelé pendant quelques semaines. Un retour rapide à une influence Atlantique et Manche sous vent d'ouest, provoque un redoux accompagné de pluies parfois très fortes. L'inertie thermique des sols - autre constante de temps - est très supérieure à celle de l'atmosphère : les pluies vont rencontrer un sol gelé totalement imperméable. La reprise par évaporation ou par la végétation est insignifiante. Un maximum d'eau disponible va ruisseler alors que les mêmes pluies sur un sol non gelé se seraient infiltrées en grande proportion. Le transit accéléré de l'eau vers l'aval du bassin suit un temps de réaction de 1 à 3 jours. Ce cas pourrait en partie expliquer un bon nombre des crues majeures de la Seine à Paris, caractérisées par une

Localisation des points de suivi quantitatif des eaux souterraines et superficielles



montée du niveau de la Seine assez rapide (moins de 8 jours). Les historiques mentionnent souvent des épisodes froids dans les semaines précédentes ("La Houille Blanche", n° 8, 1997). Il explique aussi la plupart des crues historiques majeures de la Somme, de durée inférieure au mois, survenues en janvier, février ou mars, peu de temps après un épisode très froid, décrit avec neige voire embâcles des rivières (Champion, 1858).

Dues à un ruissellement pur, de telles crues sont assez rapides et durent de quelques jours à deux semaines. Elles ne sont vraiment prévisibles que quelques jours à l'avance. Par contre, l'approche et la durée de la période à risque (le gel) sont prévisibles plusieurs semaines à l'avance.

4) D'autres scénarios sont la conjonction de plusieurs composantes. En 1910, deux trains de pluies intenses se sont succédé sur le haut bassin de la Seine à 5 jours d'intervalle. Le déphasage qui existe à Paris entre les flux provenant des affluents à transit rapide (l'Yonne, les Morins, le Loing) et des affluents à transit lent (la Marne, la Petite Seine) est précisément de 5 jours : le débit de la Marne gonflée par les premières pluies a rencontré, juste à l'amont de Paris, le débit de l'Yonne gonflée par les secondes, provoquant un phénomène de fréquence centennale.

Fig. 2 : Morphologie du bassin de la Somme et actuel réseau de suivi des nappes.

Fig. 2: Morphology of the Somme River Basin and current groundwater monitoring network.

© BRGM-lm@gé



Photo 3 - Crues de la Somme en 2001 : la crue est en partie alimentée par l'écoulement des nappes de versants, tels celui que l'on distingue à l'arrière plan, amplifié par les pluies d'automne et d'hiver ajoutées au régime excédentaire des trois années précédentes.

Picture 3- 2001 Somme River flood: The flood was partially fed by groundwater seeping from the surrounding slopes like the one seen in the background, and amplified by rainfall during the autumn and winter that further added to the excess rainfall of the three previous years.



Comprendre les mécanismes

L'analyse et la prévision des crues ont jusqu'à récemment recouru à l'analogie entre événements comparables plus qu'à l'approche causale.

La démarche causale passe par l'analyse et la modélisation des écoulements et permet, si l'on connaît bien les différents compartiments naturels de l'hydrosystème, de prévoir les effets d'une séquence pluviométrique donnée, en confrontant l'événement pluvieux avec les états de surface du sol, l'état hydrique des compartiments intermédiaires, l'incidence des prélèvements artificiels, etc. Cette démarche d'ingénierie et de prévention permet d'estimer - par modélisation - quel pourrait être l'effet sur les écoulements d'actions artificielles modificatrices des conditions de fonctionnement du bassin : drainage actif, ralentissement provoqué, drainage saisonnier des champs par anticipation, etc.

La Somme, le déroulement des événements

Au temps le plus fort de la crue (avril 2001), l'hydrogramme de la Somme à Abbeville présentait un pic de débit de plus de 110 m³/seconde.

Sur la période 1999-2000, le bilan hydrologique annuel était excédentaire par rapport à la moyenne inter-annuelle sur 20 ans. A l'entrée de l'hiver 2001, les chroniques piezométriques relevées sur des ouvrages parfois éloignés de plusieurs kilomètres de la Somme et de la plaine alluviale, témoignaient d'un état de hautes eaux des nappes établi depuis 1998.

Pendant l'hivernage 2000-2001 les nappes, déjà hautes, réagirent à la reprise de la recharge dès le mois d'octobre 2000. La période d'octobre 2000 à avril 2001 fut exceptionnellement pluvieuse (de 1,5 à 2 fois la normale, voire de 3 à 4 fois la normale pour mars et avril). On observa alors de brusques remontées de nappes, inattendues en milieu sédimentaire peu ou pas karstique où une nappe se caractérise par une

inertie moyenne à forte. En mars 2001, cette montée paradoxale du niveau des nappes atteignit par endroits 10 mètres en quelques jours, ce qui fut peut-être l'élément déclencheur de la phase paroxysmale de la crue.

Le lent retour à la normale, plusieurs mois après l'arrêt des pluies, a suivi l'inertie que l'on observe habituellement pour les nappes, ce qui renforça l'idée que l'on assistait à la manifestation d'écoulements souterrains, plutôt qu'à du ruissellement.

Validation et modélisation

Les lois de l'hydrodynamique qui s'appliquent aux écoulements souterrains sont semblables en crue et en étiage, ce qui a permis de recourir d'emblée aux techniques de modélisation développées dans le cadre de la gestion des nappes pour expliquer le comportement du bassin versant souterrain de la Somme en crue (fig. 3). Le test des hypothèses émises sur le phénomène a été engagé en juillet 2001.

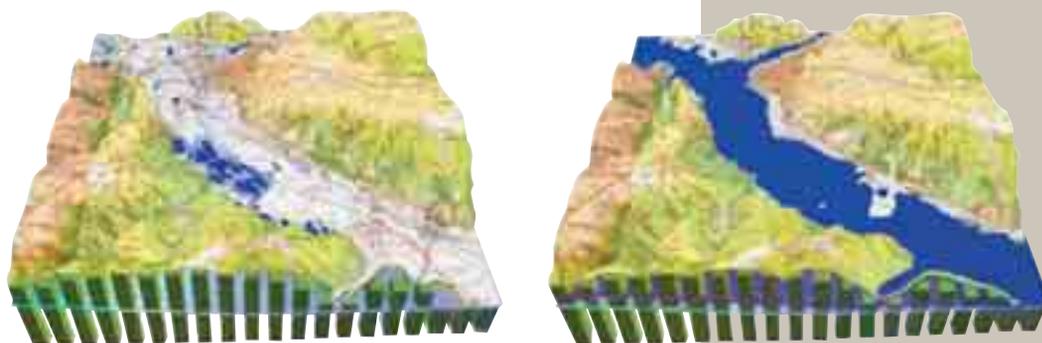


Fig. 3 - Model of an overflowing water table: Block diagram from a grid model done for the entire basin showing the Somme River Valley above Abbeville. On the left (average situation in 1997), the water table outcrops on the valley floor in the Fontaine sur Somme wetlands. On the right (high water situation in 2001), the high water table almost totally inundates the valley, linking the flood to its groundwater origin. The vertical columns correspond to the locations of the meshes of the model used for computation. On the left, water-table level under medium-water conditions; on the right, a second surface represents the water-table level under high-water conditions.

Un modèle permet donc de prédire avec une très bonne approximation le comportement de la nappe, les fluctuations des niveaux et les débits associés, pendant une semaine, un mois ou plus. L'incertitude augmente avec la portée de la prévision, mais disposer d'une semaine ou d'un mois de délai est un avantage certain, comparé à la prévision des crues "éclair" qui ne peut se fonder que sur la prévision météorologique augmentée de quelques heures.

Signature chimique et isotopique des eaux

La contribution des eaux souterraines aux crues a aussi été étudiée à partir de données chimiques issues de deux campagnes de prélèvements en avril 2001 (hautes eaux) et octobre 2001 (basses eaux), réalisées sur des puits, des forages, des résurgences de la nappe de la craie, en quatre points sur la Somme et sur plusieurs affluents : l'Hallue, l'Avre, l'Ancre et la Selle. Les analyses ont concerné les éléments bilantiels, les isotopes de la molécule d'eau et les isotopes du strontium.

La chimie des eaux de la Somme évolue d'amont en aval en un ruissellement dominant, progressivement dilué par les eaux souterraines venues des versants, beaucoup plus abondantes et de chimie différente. Sur leur parcours aval, les eaux de la Somme ont une signature chimique et isotopique pratiquement semblable à celle des nappes.

Les échantillons provenant de certains affluents dont l'Hallue et la Selle ont des signatures très proches du faciès isotopique des eaux de la craie, ce qui confirme l'influence prépondérante des eaux souterraines dans ces sous-bassins.

La signature chimique en tous points échantillonnés est restée stable dans le temps, ce qui renforce l'idée de l'abondance et de la stabilité des apports souterrains.

“ La contribution importante des eaux souterraines et l'inertie de leur écoulement donnent une portée d'un mois ou plus aux prévisions, qui restent très satisfaisantes. ”

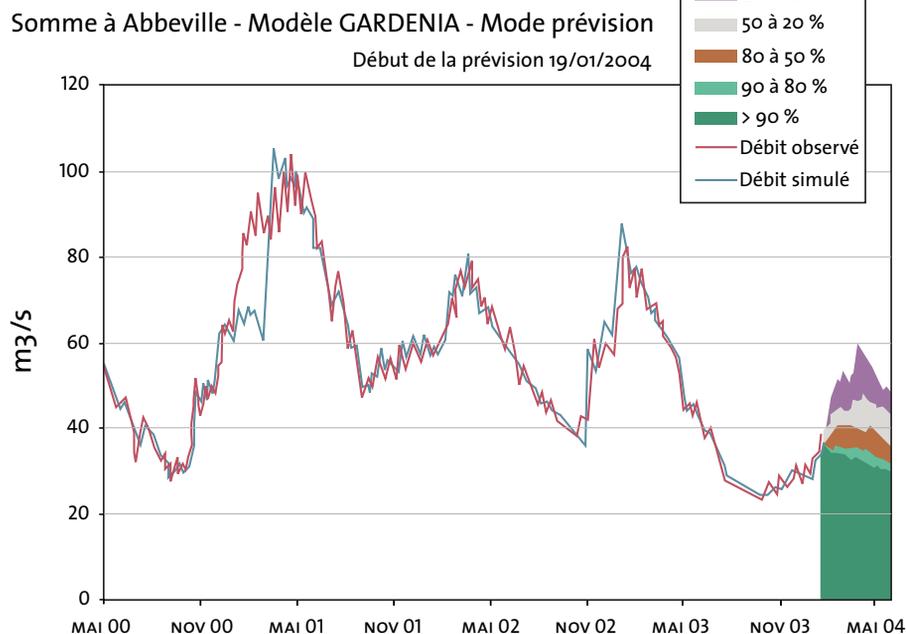
Réalisation d'un outil de prévision

L'outil de simulation-prévision comporte un modèle pluie-débit incluant les transferts souterrains (GARDENIA ⁽¹⁾), ajusté sur les débits de la Somme à Abbeville. Depuis 2002, il est exploité tous les quinze jours en période de hautes eaux (de novembre à mai). Il comporte aussi un modèle maillé destiné à être exploité une à deux fois par an pour établir la contribution des nappes des différents sous-bassins aux débits des cours d'eau.

Le modèle pluie-débit est l'outil de prévision proprement dit. Trente neuf cycles pluviométriques ont été reconstitués sur la période 1962-2001 et ont permis de simuler 39 cycles d'évolution du débit à Abbeville. Des séries statistiques correspondant à des probabilités d'occurrence plus ou moins élevées de crues ont alors été générées. Depuis l'hiver 2001-2002 ces séries servent à établir cinq scénarios prévisionnels d'évolution du débit de la Somme à Abbeville (fig. 4) : année décennale sèche, année quinquennale sèche, année moyenne, année quinquennale humide, année décennale humide.

Entre la saisie des données pluviométriques par Météo-France et la remise des simulations à la DIREN-Picardie, 48 heures s'écoulent, ce qui permet une annonce pratiquement en temps réel si besoin est.

⁽¹⁾ Le logiciel GARDENIA, conçu et commercialisé par le BRGM, sert à construire des modèles globaux qui mettent en relation un signal d'entrée -la pluie- et l'un ou l'autre signal de sortie -un niveau de nappe ou un débit de cours d'eau ou de source-. Le calage du modèle se fait à l'aide de constantes de temps et d'un coefficient de répartition de l'eau dans le sol entre ruissellement et infiltration. Les simulations sont toujours en régime transitoire et permettent de déduire la variabilité des composantes du cycle de l'eau entre ruissellement, écoulements souterrains rapides, écoulements lents et débit à l'exutoire. Contact : d.thierry@brgm.fr



▲ Fig. 4 : Simulations prédictives du débit de la Somme : à partir du jour j , le modèle propose 5 hypothèses de chroniques pluviométriques correspondant aux probabilités de non dépassement 1/10 (décennal humide), 2/10, 5/10, 8/10, 9/10. Chaque simulation utilise un scénario statistiquement probable puisqu'il a été construit sur les événements réels de 39 années écoulées. L'écart entre les 5 scénarios est faible dans les premiers jours de la prévision, montrant bien la pré-détermination forte par les événements pluvieux passés et déjà connus.

Fig. 4: Predictive simulations of Somme discharge: From a given day on, d , the model proposes 5 possible rainfall series corresponding to probabilities of 1/10 (10-year maximum rainfall), 2/10, 5/10, 8/10, 9/10 of not exceeding maximum rainfall. Each simulation uses a statistically probable scenario based on events that have actually occurred during the last 39 years. There is little difference between the 5 scenarios in the beginning of the forecast period, showing that past rainfall events are very predetermining.

© BRGM-lm@gé

La contribution importante des eaux souterraines et l'inertie de leur écoulement donnent une portée d'un mois ou plus aux prévisions, qui restent très satisfaisantes. Ce type de prévision ne s'exprime pas par une certitude sur des événements, mais par une probabilité sur l'intensité et la durée de la crue qu'une séquence pluvieuse forte pourrait déclencher. Ces prévisions ne conduisent pas à la notion d'alerte mais à la notion de "période à risque", risque qu'une séquence pluvieuse entraîne des conséquences justifiant une prise de précautions.

Conclusion

Les crues, trop longtemps réduites à une liaison univoque pluie-ruissellement-débit, sont en fait l'intégration d'un nombre variable de composantes. Certaines crues sont engendrées par le seul ruissellement, d'autres majoritairement par les eaux souterraines, mais le plus souvent, les mécanismes et les composantes sont multiples avec des cinétiques différentes, même parfois variables d'une année à l'autre sur un même bassin.

Il a toujours été difficile de percevoir intuitivement le lien qui unit la vigueur de l'écoulement d'une rivière en crue et la lenteur caractéristique d'un écoulement souterrain, et pourtant... On pourrait qualifier de paradoxales les crues pour lesquelles l'état du sol et du sous-sol sont déterminants.

L'expérience de la Somme en 2001 a permis d'observer ces différentes composantes dont chacune suit un rythme qui a sa propre constante de temps.

Il semble fondamental de bien connaître le mode de fonctionnement des bassins et de détailler les manifestations de chaque composante pour pouvoir prédire le risque de conjonction des phénomènes. Le délai dont on dispose avant d'entrer dans une "période à risque" est en général assez long pour prévenir et prendre des dispositions de protection. ■



The floods in the Somme River Valley during the Winter of 2000-2001 highlighted the possible contribution of groundwater to flooding and led to observations that can be extrapolated to many plateaus in other regions. A flood is a phenomenon that integrates numerous components—from rainfall on land to water flowing in rivers, and including groundwater flow. The relative importance of each component depends on a basin's morphology, hydrogeology, surface conditions—including frozen soils in winter, land use and rainfall records.

Since the hydrodynamics of groundwater flow are similar during high and low flow periods, models developed for groundwater resource management can be used to simulate the operating mode of the basin's aquifer system during the Somme River flood. These models have shown that the contribution of compartments of the chalk aquifer to streamflow in the Somme increased proportionally upstream to downstream. While the groundwater contribution to streamflow during the summer months is nearly 100%, it was shown to have accounted for 80% during the 2001 flood.

A study of the chemical and isotopic signatures of the Somme river water confirmed the major contribution of groundwater to streamflow in the Somme and its tributaries during the 2001 flood.

The flood risk assessment model developed in 2001 has been calculating and simulating streamflow at Abbeville every two weeks during the Winter and Spring since 2002.

ANTONIO GARCIA FRAGIO

The European response to the challenges of **water and sanitation** in developing countries

Antonio Garcia Fragio
 HEAD OF DIVISION
 INFRASTRUCTURE POLICY
 EUROPEAN COMMISSION
 Antonio.Garcia-Fragio@cec.eu.int



Population growth, changing lifestyles and economic development are behind the increasing pressure on water resources everywhere. By 2025, two thirds of the world's population could be living in countries subject to water stress. The situation in many countries of Africa and Asia is complicated by the fact that water availability is subject to large seasonal fluctuations, as well as by periodic cycles of drought and flood. Climate change is and will continue to be part of the cause of additional pressure, most severely in the developing world, and particularly affecting the poor in these regions. This paper outlines the policy orientations and summarises the actions taken by the European Union in the field of water and sanitation as part of the global strategy to fight poverty and contribute to sustainable development.



Dans plusieurs pays, l'irrigation représente 80% de l'utilisation d'eau. Maheshwaram, Inde.
For several countries, irrigation represents 80% of the water consumption. Maheshwaram, India.

© BRGM im@gé - J.C. Maréchal

The challenges of water and sanitation in development

More than 1.2 billion people in the world lack access to safe drinking water and 2.6 billion lack access to even basic sanitation. The challenges of water management, fresh-water provision, sanitation and health are known in all countries, yet the issues are different. Freshwater is a finite and precious resource essential for sustaining life, human development and the environment. A regular supply of drinking water is a basic humanitarian need and it becomes a daily factor for survival during a humanitarian crisis. In recognition of the critical importance of water and sanitation for development, the Millennium Development Goals (MDG's) include a target to halve, by 2015, the proportion of people without sustainable access to safe drinking water and basic sanitation.

The urban dimension of this challenge deserves proper attention. Urban population in the developing world is growing rapidly. By 2030, Sub-Saharan African cities could host close to 50 per cent of its entire population. If we want to succeed in reaching the Millennium Development goals- and in particular the water-related ones- a clear action must be taken in support of cities and towns to improve urban dwellers' access to water and sanitation services.

Water security is most critical at household level, but reliable supplies are also needed for agriculture, industry and energy production, as well as to preserve ecosystems and the environment. Agriculture is the largest user of water; in some developing countries irrigation accounts for 80% of water use, although its share may decline with improved water productivity. Groundwater supports rural livelihoods across extensive areas of the world with major social and economic benefits, but significant problems are arising from over-abstraction, which is not sustainable in the longer term and can result in water

quality deterioration - for example high levels of salinity in the water, making it unfit for human consumption or for irrigation and industrial uses.

The different and growing demands for water at local regional, national, and international levels (e.g. through unsustainable irrigation practices) can lead to drought and desertification and can develop into conflict. Many major rivers, lakes and underground aquifers cross national boundaries and mismanagement of water can be a source of potential conflict. The sharing of water resources between countries with different policy priorities and institutional capacities, can be an important means of conflict prevention, and is demanding an increasing amount of policy attention.

The European Union is not only the world's leader in development aid for water and sanitation but also the largest provider of development assistance overall. This puts us in a position of particular responsibility. The reports of the United Nations on the fulfilment of the Millennium Development Goals speak a clear language: we must do more and we must do better. By "we", I mean both the developed and the developing world. The European Union has just committed to increasing the amount of its collective development assistance by €20 billion by 2010, with further increases by 2015. It is foreseen that about 50% of the agreed increase of Official Development Assistance resources will be targeted at Africa, where the development challenges are the greatest, while fully respecting individual Member States priorities' in development assistance.

European Union policy background

There is a coherent approach at European Union level on how to support partner countries to ensure sustainable and equitable access to water and sanitation. The European Commission "Communication on water management in developing countries" of March 2002, endorsed by the European Council, stresses the need to integrate sustainable water management in national and regional development strategies and to support partner countries in devising sustainable solutions. The over-arching policy framework is 'Integrated Water Resources Management' (IWRM) at a basin level.

The European Union policy on water and development highlights that good governance and, political and sectoral reforms are necessary. Awareness raising, institutional strengthening and capacity building activities, and expanding the knowledge base are essential to support planning and decision-making, whereas participation of all stakeholders is essential for ownership of policies and

Nigéria - Paysans puisant de l'eau.

Nigeria - Farmers drawing water from a well.

Source : Commission Européenne / European Commission





Sierra Leone - Enfants autour d'un puit.
Sierra Leone - Children around a well.

Source : Commission Européenne / European Commission

Translating policy into action: the European Union water initiative

strategies. Partnerships between public, private and civil society actors have to be promoted. Those partnerships must be equitable and transparent, allow free and reversible choices on water services management, safeguard consumers' and investors' interests and maintain high standards of environmental protection. The involvement of the private sector in the delivery of water and sanitation services should be a national or local government choice and service provision should be undertaken in the most efficient and effective manner whether public, private or appropriate combination of the two options.

The European Union has made the Millennium Development Goals their own. The Union and the 25 Member States provide collectively around €1.4 billion annually to water and sanitation in developing countries which generate significant results on the ground. On the 2002 Johannesburg World Summit for Sustainable Development, the European Union launched its Water Initiative. This initiative is built on partnership. It brings together key actors from the development, environment and research communities, at government, NGO or operator level, both in Europe and in developing countries to promote better water governance. It also encourages an increased stakeholder participation, regional and sub-regional co-operation and acts as a catalyst for additional funding.

The European Union Water Initiative aims to mobilise all available European Union resources in a coordinated fashion in support of achieving the water-related Millennium Development Goals. It is an example of how to bring about in practice the alignment and harmonisation of development aid in accordance with developing country priorities. This is in line with the OECD led process on aid effectiveness, as stated in high level declarations of Rome in 2003, Marrakech in 2004 and, most recently, Paris in March 2005. It shows how scientific cooperation with partner countries and regions can be mobilised to produce inputs into innovative solutions to water problems while promoting sustainable development.

The European Union Water Initiative is contributing to the achievement of the World Summit on Sustainable Development target for Integrated Water Resource Management and water efficiency plans by 2005. In Africa, the European Union Water Initiative has supported river basin cooperation in 5 transboundary river basins (Volta, Niger, Lake Chad, Orange Senqu, Lake Victoria-Kagera) where €10 million have been earmarked by the European Commission to implement prioritised activities in the basins.

The European Union Water Initiative also pays attention to the water and sanitation Millennium Development Goals targets. Through the European Union Water Initiative, the European Commission, Member States and other stakeholders are working with the New Partnership for African Development (NEPAD) and African Ministerial Council on Water (AMCOW) to strengthen regional policies and strategies as well as to coordinate donor activities aligned behind nationally owned development plans. Improved water policy and governance is being promoted through the Africa Water Supply and Sanitation Working Group. National Water Policy Dialogues are being initiated in ten pilot countries proposed by AMCOW. The National Water Policy Dialogues are multi-stakeholder fora to identify the bottlenecks to the achievement of the water-related Millennium Development Goals and to transfer these findings into an agreed roadmap to achieve the water and sanitation related Millennium Development Goals. An European Union Member State leads the process in partnership with the national authorities. The Dialogues will map what governments are currently doing, and what else needs to be done to achieve the water and sanitation related Millennium Development Goals. An objective is to ensure this becomes an enduring process with regular annual review and feedback into national development priorities. The Dialogue process will ensure that, in each of these countries, there is a core donor group on water and sanitation if one does not already exist.

The ACP-EU water facility

The European Union is seeking new ways to deliver its assistance. The €500 million EU-ACP Water Facility launched in 2004 and targeted at developing countries in Africa, the Caribbean and the Pacific is a response to the need to catalyse additional funding and to work directly with those concerned by shortages of water and the absence of sanitation. The ACP-EU Water Facility will create the conditions to attract funding from sources other than public development assistance (ODA) and it will bring funding directly to the local level. The Facility is a new mechanism addressing in particular a real need for better use and mixing of funding (loans of various types and from various sources, and grants). The reply to the first call for proposals for the EU-ACP Water Facility on 31 January has been enthusiastic: We received more than 800 proposals from various state- and non state actors, private sector, NGOs and civil society which represents an impressive commitment for change.

Conclusion

The European Union is making a significant contribution to water and sanitation. Innovative ideas to unlock new sources of funding and to deliver on the ground will make a difference in meeting the Millennium Development Goals. The European Union is committed to act. The UN Millennium Project Task Force on Water and Sanitation has identified ten critical actions it believes are needed if the MDGs are to be met. The recently published report of the Africa Commission has also pointed out the critical need to improve efforts to deliver safe water and basic sanitation. The EU Water Initiative, as a means of improving the efficiency and effectiveness of our cooperation, and the Water Facility, to address at least in part the financing gap, are examples of good European practice.

Afrique du Sud - Point d'eau. South Africa - Water outlet.

Source : Commission Européenne / European Commission



The financial challenge

In order to make a decisive step forward in achieving the Millennium Development Goals, in particular in Africa, we must consider new ways in delivering on the ground and be able to unlock more resources. With the Water Initiative, the European Union provides the framework for strategic partnerships on water and sanitation to leverage additional resources from public and private sources, locally and internationally. The European Union is already the largest provider of funding for water-related development aid and scientific cooperation. There is a need however for a significant increase in funding for water and sanitation, as well as better use of development aid to leverage more resources from a large range of sources (public and private, local and international), if the Millennium Development Goals targets are to be met. The European Union Water Initiative has included a major assessment of financing water sector development and the Camdessus Panel report 'Financing Water for All' stresses that the flow of funds has to roughly double, with increases from all sources.

The Water Facility provides a useful mechanism for the Water Initiative. It uses development assistance to leverage other forms of finance. It brings funding directly to the local level, to municipal/local governments. It represents a shift in the approach to projects, fostering competition for co-funding based on quality of projects, building on ownership and effective contribution by partners and beneficiaries.

Ghana - L'eau, une ressource rare et précieuse.

*Ghana - Water, the rare and
precious wealth.*

Source : Commission Européenne
European Commission



JEAN-LUC REDAUD

De l'eau potable pour tous : les conditions ne sont pas encore remplies !

Jean-Luc Redaud
 ADMINISTRATEUR
 ASSOCIATION 4D
www.association4d.org



La commission du développement durable des Nations-Unies vient de réaffirmer la nécessité de réduire d'ici 10 ans la part encore considérable des populations qui ne disposent ni de l'eau potable ni de l'assainissement. Mais cet objectif ambitieux et plein de bonnes intentions se heurte à une multitude d'obstacles que les pays les moins avancés ne pourront surmonter. Cela suppose en effet un accroissement de l'aide publique à ces projets, un partenariat public-privé, de nouveaux cadres réglementaires et une volonté d'impulser une gestion équilibrée et durable des ressources en eau. Seuls quelques pays émergents pourront satisfaire à ces conditions.

La treizième session de la Commission du Développement Durable (CDD-13) des Nations-Unies, qui s'est déroulée du 11 au 22 avril 2005, vient de conclure un premier cycle de deux ans portant sur les moyens d'atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) complétés à Johannesburg relatifs aux questions "d'eau, d'assainissement et d'établissements humains". Ces objectifs prévoient notamment de réduire de moitié d'ici 2015 la part des populations n'ayant pas encore accès à un service d'eau potable et d'assainissement. Les conclusions principales de cette session (voir le site www.org.un/esa/sustdev/csd:Csd13/csd13.htm) reprennent des idées auxquelles les acteurs français sont collectivement attachés : complémentarité des secteurs de l'eau potable et de l'assainissement, priorités renforcées aux stratégies "pro-poor", importance de l'accompagnement des projets d'amélioration de la gouvernance, d'éducation et de

formation professionnelle, renforcement des mécanismes de dispositifs de suivi, etc.

De nombreux représentants des pays les plus pauvres, notamment en Afrique, ont fait observer qu'ils n'avaient pas les moyens d'atteindre ces objectifs... L'Union européenne et plusieurs pays, dont la France, se sont attachés à valoriser leur volonté d'augmenter sensiblement leurs contributions aux financements bilatéraux du secteur.

Plusieurs conventions internationales font référence au caractère "public" de l'eau notamment pour organiser des partages équilibrés de l'eau (convention de gestion des eaux transfrontalières de 1992). Pourtant, il faut bien reconnaître la difficulté à mettre en œuvre les moyens pour aller vers une gestion plus raisonnée et pour organiser un dialogue productif entre pouvoirs publics, entreprises, consommateurs et ONG.

Progresser vers une gestion durable des ressources suppose d'organiser une gestion intégrée des eaux avec une gestion équilibrée au niveau de chaque bassin versant des besoins domestiques, industriels ou agricoles dans le respect des équilibres hydro-écologiques. Il est vrai, hélas, que les capacités scientifiques et techniques, comme les dispositifs de concertations publiques (coordination interministérielle, concertation avec la société civile) demeurent embryonnaires

“ Réduire de moitié d'ici 2015 la part des populations n'ayant pas encore accès à un service d'eau potable et d'assainissement. ”

dans la plupart des pays du Sud. Il est vrai, aussi, que le milieu naturel est souvent le "parent pauvre" de cette gestion intégrée... La tendance à l'acharnement technologique (barrages, canaux, polluer-dépolluer) reste malheureusement répandue même si chacun s'accorde, dans les discours, sur la nécessité de privilégier les attitudes préventives (économiser l'eau, restreindre l'utilisation des produits chimiques ou toxiques, promouvoir l'agro-environnement, préserver les zones humides...). Tout se passe comme si, demain, il deviendra impossible de s'alimenter librement à la source ou à la fontaine.



Puits dans la région de Chinguetti, dans l'Adrar, en Mauritanie.
Wells in the Chinguetti area, Adrar, Mauritania.

© BRGM im@gé - F. Michel

“L'aide publique au développement des pays OCDE est en réduction et va d'abord aux pays émergents ayant la capacité de dégager des profits plutôt qu'aux pays les plus pauvres.”

Les problèmes d'eau agricole ont été traités rapidement lors de cette CDD en centrant les préoccupations sur la gestion par la demande ("more crop per drop"). En ville, l'eau publique peu chère est distribuée au profit prioritairement des centres urbains alors que les populations des banlieues défavorisées sont souvent condamnées, faute de service public, à l'eau coûteuse du porteur d'eau. Dans le même temps "la corvée d'eau" est encore le lot de nombreuses femmes en milieu rural tandis que les maladies hydriques liées à l'eau restent le premier fléau de l'Afrique pour cause d'absence de systèmes d'assainissement. Les extensions de services nécessitent des crédits lourds qui ne peuvent venir que de budgets publics, mais qui sont trop maigres dans les pays les moins avancés. En effet, l'aide publique au développement des pays OCDE est en réduction et va d'abord aux pays émergents ayant la capacité de dégager des profits plutôt qu'aux pays les plus pauvres. Par ailleurs, la possibilité de mobiliser des acteurs locaux (communes, usagers, artisans...) est souvent faible.

La situation des pays du Sud est complexe et loin d'être homogène. L'époque, au début des années 90, où le FMI et la Banque Mondiale plaidaient pour la libéralisation des services et les politiques de recouvrement total des coûts par la tarification comme voie d'avenir, semble révolue, après avoir fait la preuve de son impuissance à résoudre les problèmes de pauvreté. Dans les pays riches, les investissements de base n'ont pu être réalisés que par des stratégies publiques lourdes de subventions, alors que la voie du financement par la tarification n'est venue qu'ensuite afin de gérer ou conforter le dispositif. On voit donc mal comment les pays en développement pourraient faire autrement.

Il y a sans doute un partenariat public-privé à développer sous réserve que la puissance publique exerce pleinement ses responsabilités sur le contrôle des services. Et cela, en particulier, sur l'extension des équipements, les tarifs et dispositifs de solidarité pour les plus pauvres mais aussi sur une gestion contrôlée sur la base de critères de services réels rendus aux usagers et non de statuts.

L'Europe, à partir de son expérience, peut montrer que la défense d'un service public à vocation universelle à partir du cas du service domestique de l'eau n'exclut pas le recours aux compétences du secteur privé... sans devoir succomber aux règles du libéralisme.

Le droit d'accès à l'eau ne signifie pas la gratuité de l'eau pour tous, mais la mise en place par les pouvoirs publics de mesures réglementaires (contrôle des eaux distribuées,

réglementation des coupures,...) ou économiques (dispositifs de solidarités, tarifications sociales,...) assurant aux plus démunis un accès à un service d'eau potable à "un coût abordable".

Il ressort de cette CDD un texte plein de bonnes intentions mais dont on peut douter qu'il fasse progresser rapidement le sort des populations défavorisées des pays les moins avancés.

De nombreux représentants de la société civile française (entreprises, collectivités territoriales, associations professionnelles ou scientifiques,...) ont participé à ces travaux. L'association 4D, qui s'est attachée à fédérer une position commune des ONG nationales pour cette CDD, veillera à maintenir la dynamique ainsi créée. Au vu du poids des grandes compagnies d'eau en France, il serait souhaitable que les syndicats s'impliquent également dans ces réflexions.

“Le droit d'accès à l'eau ne signifie pas la gratuité de l'eau pour tous, mais la mise en place par les pouvoirs publics de mesures réglementaires ou économiques assurant aux plus démunis un accès à un service d'eau potable à “un coût abordable”.”



**La Clue de Barles, en Provence,
Alpes de Haute-Provence.**
*La Clue de Barles, in Provence,
Alpes de Haute-Provence.*

©BRGM im@gé - F. Michel

chiffres clés



© BRGM im@gé - F. Michel

En FRANCE

- > La réserve d'eau souterraine en France est d'environ **2 000 milliards de m³** ⁽¹⁾
- > On compte en France **6 500 aquifères** distincts, dont 200 d'importance régionale, 175 à nappe libre et 25 contenant une nappe captive.

La pluie moyenne sur la France est de **440 milliards de m³ / an** et la reprise par évaporation est estimée à **270 milliards de m³**.

La différence est composée de l'**écoulement total par les rivières** :

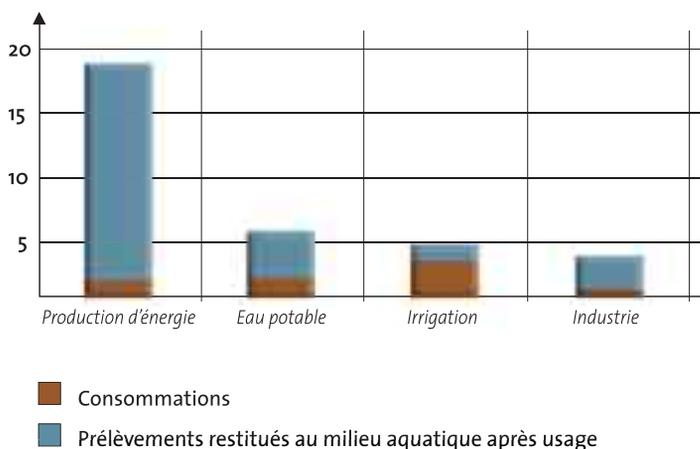
170 milliards de m³ / an

dont **100 milliards de m³** renouvellent l'eau des nappes et **70 milliards de m³** constituent l'écoulement des rivières.

Tous usages confondus, **46 %** des eaux exploitées proviennent des **nappes phréatiques** (hors usage pour l'énergie - refroidissement des centrales).

L'**usage domestique** de l'eau provient pour **60 % des nappes phréatiques**.

Répartition des volumes prélevés et consommés par usage en 2001
(France métropolitaine - en milliards de m³)



⁽¹⁾ Il s'agit des volumes d'eau théoriquement mobilisables par dénoyage de tous les aquifères libres et décompression des aquifères captifs. Pour ces derniers, il resterait encore un stock considérable mais pratiquement inaccessible.

Dans le MONDE

- > La réserve mondiale d'eau souterraine est évaluée à **10 000 000 milliards de m³**.
- > Le renouvellement total des eaux souterraines est de **5 000 ans en moyenne** et de 300 ans pour les nappes superficielles les plus vives.
- > **Les eaux fossiles les plus profondes** ou à très faible capacité de renouvellement peuvent avoir **70 000 ans**.
- > Les eaux souterraines représentent **60 %** des eaux continentales.
- > **9 pays bénéficient de 60 %** des ressources mondiales en eau : le Brésil, la Russie, la Chine, le Canada, l'Indonésie, les Etats-Unis, l'Inde, la Colombie, le Congo-Zaïre.

Chaque jour

- > Un **Américain** consomme en moyenne **700** litres d'eau par jour,
- un **Israélien**, **260** litres,
- un **Européen**, **200** litres,
- un **Palestinien**, **70** litres,
- un **Africain**, **30** litres,
- un **Haïtien**, **20** litres.
- > **250 millions d'individus** ne disposent pas du minimum vital en eau et **400 millions** vivent en situation de "stress hydrique".

Combien consomme ?

- > Un **bain** : **150 à 200** litres
- > Une **douche** : **60 à 80** litres
- > Un **lave-vaisselle** : **25 à 50** litres (vaisselle à la main : 10 à 12 litres)
- > Une **chasse d'eau** : **6 à 12** litres
- > **Lavage d'une voiture** : **200** litres environ
- > **Arrosage du jardin** : **15 à 20** litres par m²

brèves

Poster

“Les eaux minérales et les eaux de source de France”.

A partir de multiples sources d'information (BRGM, Chambre syndicale des eaux minérales, Syndicat national des eaux de sources, Conseil national des établissements thermaux), le BRGM a reporté, sur un fond géologique simplifié, les établissements thermaux et les usines d'embouteillage des eaux minérales et des eaux de source ainsi que les indices d'eaux minérales non exploitées. De plus, pour les principaux sites exploités ou non figurent les caractères physico-chimiques des eaux.



Martinique

Mieux connaître les eaux souterraines pour mieux les gérer.

La Région Martinique et le BRGM ont signé une convention destinée à mieux gérer les eaux souterraines dans l'optique définie par la Directive cadre européenne sur l'eau. Le BRGM est ainsi chargé de recueillir, valider et interpréter toutes les informations sur la quantité des ressources et de caractériser les masses d'eau (alimentation par infiltration, rôle des sources et des rivières, étude du milieu souterrain. Un système d'information géographique sera

progressivement mis en place pour favoriser la distribution et la gestion des ressources dans toute la Martinique.

BRIDGE

Le BRGM coordonne le projet européen de recherche BRIDGE destiné à construire une méthodologie commune de définition de seuils de qualité chimique des eaux souterraines. Il regroupe 28 partenaires de 17 pays et doit, en particulier, soutenir la mise en place de la future directive européenne sur les eaux souterraines.

Eugris

Un portail européen d'information sur les eaux souterraines et les sols contaminés <http://www.eugris.info>

La France, par l'intermédiaire du BRGM, fait partie des six pays animant ce portail d'informations : Danemark, Allemagne, Hongrie, Italie et Grande-Bretagne.

Les données, issues des résultats de programmes européens de recherche intéressent des domaines tels que la caractérisation des sites, leur surveillance, la protection des eaux souterraines, les pollutions diffuses, la gestion des risques, les aspects socio-économiques, les outils d'aide à la décision,...



www.eugris.info

Bengladesh

Le BRGM a été chargé par la Banque Mondiale de l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine et de l'élaboration d'un plan d'aménagement et de préservation de la ressource dans la région de Khulna, troisième ville du pays, située dans le delta du Gange. Le BRGM a réalisé 41 forages profonds pour lutter contre les « biseaux salés » (intrusion de l'eau de mer dans les eaux douces). De nouveaux forages seront réalisés dans les aquifères à quelque 600 mètres de profondeur pour sécuriser l'alimentation en eau potable des populations.



Réalisation d'un forage.

Parution

Parution de l'Annuaire hydrologique de la France 2004.

Le BRGM coordonne et réalise l'annuaire qui récapitule les situations saisonnières de l'année 2004 à travers toutes les composantes du cycle de l'eau : la pluie, le régime des rivières, la situation des nappes, la qualité des milieux aquatiques, les réserves des barrages.

Bulletin n° 69 - BRGM.

Envoyé sur simple demande à y.noel@brgm.fr.

Vient de paraître

Cartes des curiosités géologiques et carte géologique de France à 1/1 000 000



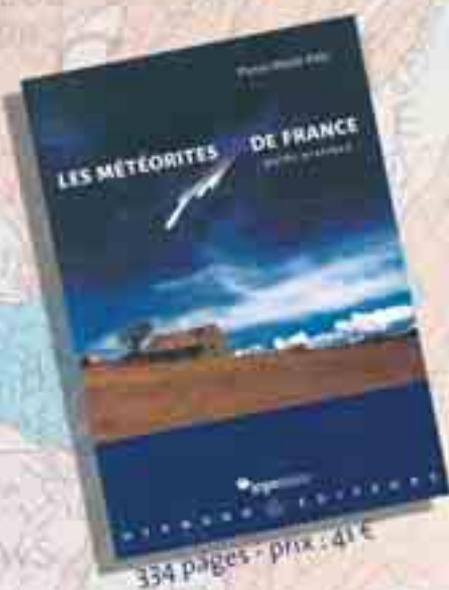
Cartes des eaux minérales et les eaux de source de France à 1/1 000 000



Prix : 9,90 €

Fournis à plat 113 x 105 cm - prix : 18 €

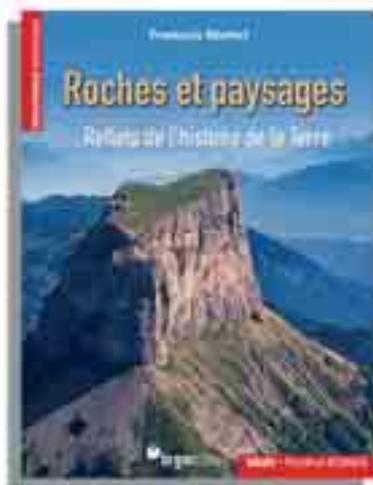
Les Éditions du BRGM proposent un choix unique de cartes géologiques, d'ouvrages, de posters et de cédéroms en sciences de la Terre pour les décideurs, la communauté scientifique et le grand public.



334 pages - prix : 41 €



44 pages - prix : 9 €



256 pages - prix : 21 €

<http://editions.brgm.fr>

 **brgm**éditions

prochain numéro ► janvier 2006

Le changement climatique



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 6009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 34 34 - Fax : (33) 2 38 64 35 18

www.brgm.fr