

# GÉOCHRONIQUE

Magazine des Géosciences

DÉCEMBRE 2009 - 13 €

## L'après-mine

### Carte géologique du monde



N° 112

# GÉOCHRONIQUE



Revue d'information d'expression française en sciences de la Terre  
sous le patronage du Comité national français de géologie.  
Coéditée par la Société géologique de France et le BRGM.



*Digue à stérile et chevalement d'une mine  
de plomb-zinc abandonnée  
dans le district historique de Madan,  
Monts du Rhodope, Bulgarie  
(photo J. Féraud)*

## Comité de direction

Rédacteur en chef : **Daniel Raymond**  
Rédacteurs adjoints : **Jean Féraud**  
**Jacqueline Lorenz**  
Directeur de la publication : **Jacques-Marie  
Bardintzeff**  
Secrétaire de rédaction : **Nicole Santarelli**  
Trésorier de la coédition : **Daniel Obert**  
Représentant du BRGM : **Frédéric Simien**  
Représentant de la SGF : **Patrick De Wever**

## Comité de rédaction

Raymonde André-Jehan, Pascal Barrier, Marie-  
Madeleine Blanc-Valleron, Bernard Bonin,  
Philippe Bouysse, Jean Gaudant, Maurice  
Jacqué, Jean Labourguigne, Philippe Lagny,  
Jacques Lambotte, Cécile Lamey-Zimmermann,  
Jean-Claude Michel, Michel Millet, Pierre Soléty,  
Catherine Viaux.

## Correspondants

Dominique Darmendrail, Jean-Paul Deroin,  
Pierre Duffaut, Pierre Laville, Yoann Lenechet,  
Pierre Nehlig, Jean Ricour, Jean-Jacques Risler,  
Jean-Claude Roux, Jean Taborin.

## Administration

Revue fondée en 1982 par  
Geneviève FAURY, Claude LORENZ  
et Claude MEGNIEN  
Siège : Maison de la Géologie  
77, rue Claude Bernard, 75005 Paris  
ISSN : 0292-8477  
CPPAP n°0114 G 88662  
Dépôt légal : juin 2009  
Feuilles de style : BL Communication  
Tirage à 2 200 exemplaires  
Impression Capitale  
91, rue du Faubourg Saint-Honoré  
75008 Paris  
Publication trimestrielle  
Prix du numéro: 13 €

## Sommaire

Numéro 112, décembre 2009

Prochaines manifestations .....	1
Actualités .....	7
Carnet .....	17
<b>Dossier .....</b>	<b>20</b>
Analyses d'ouvrages .....	58



Construction des barrages du site pilote de Tressange (mines de fer de Lorraine)  
photo Brgm

Régie publicitaire et abonnements : Société géologique de France  
77, rue Claude-Bernard, 75005 Paris - Tél. : 01 43 31 77 35 - C.C.P. : SGF Paris 173-72 N  
Le prochain numéro paraîtra en mars 2010.

La date limite d'envoi des informations (très condensées) est fixée au 1<sup>er</sup> janvier.  
Les opinions exprimées dans les articles de cette revue n'engagent pas GéoChronique.

Adresse électronique pour contacter GéoChronique : [accueil@sgfr.org](mailto:accueil@sgfr.org)

# Prochaines manifestations

## ARCHÉOLOGIE DES PAYSAGES

Amsterdam (Pays-Bas)  
26 au 28 janvier 2010

L'archéologie des paysages est la science qui étudie les traces matérielles des interactions entre les populations anciennes et l'environnement dans lequel elles ont vécu. Le premier congrès organisé sur ce sujet s'adresse aux spécialistes de l'étude des paysages, aux archéologues, aux géographes, aux géologues et aux paléo-écologistes. Six thèmes sont proposés :

- comment le paysage change-t-il : relations entre paysages naturels et paysages culturels, interprétation des paysages du passé ;
- amélioration de la compréhension des cadres temporels et chronologiques : rôles de la stratigraphie et de la géochronologie ;
- terres basses et montagnes : rôle des changements relatifs du niveau marin, érosion et sédimentation aux échelles locale et régionale ;
- traitement des données et choix des échelles de représentation ;
- nouvelles approches en prospection digitale et techniques de modélisation (GIS, utilisation des satellites) ;
- futurs développements de l'archéologie des paysages.

Une excursion d'une journée est prévue le 29 janvier.

## NITRO-EUROPE

Solothurn (Suisse)  
3 au 4 février 2010



Cette conférence est consacrée aux rapports entre l'azote et le bilan des effets de serre en Europe. Les objectifs du projet sont :

- d'établir une base de données des flux d'azote en relation avec les cycles carbone-azote des écosystèmes européens ;
- de quantifier les effets passés et présents de ces échanges sur le climat, les conditions atmosphériques, la gestion des sols ;
- de simuler les flux observés à partir des données ponctuelles ;
- de quantifier les flux carbone et azote pour les différents types de paysages européens ;
- d'évaluer les incertitudes des approches utilisées, tant en mesure qu'en modélisation.

## CALENDRIER

**Vous trouverez  
le calendrier complet  
des manifestations  
et les renseignements  
complémentaires  
les concernant  
sur le site  
[www.e-geologie.org](http://www.e-geologie.org)**

## TRANSITIONS ÉNERGÉTIQUES

University of Sussex (G.B.)  
25 et 26 février 2010



Cette conférence internationale discutera de la sécurité dans l'approvisionnement futur en énergie et des énergies de remplacement à faible consommation de carbone. Trois thèmes sont proposés :

- innovations dans les énergies peu consommatrices de carbone : rythmes de développement, effets de la récession sur les projets, cas des pays en voie de développement ;
- sécurité d'approvisionnement : défis du futur, politiques publiques ;
- choix des énergies de transition durables : rôle des pouvoirs publics, héritages du passé néolibéral, objectifs, conflits de redistribution.

## ÉCOSYSTÈMES CONSÉCUTIFS À L'EXTINCTION PERMOTRIASSIQUE

Mascot (Oman) - 20 au 26 février 2010

Cet « atelier de terrain » est la troisième réunion annuelle de l'IGCP 572 (*International Geological Correlation Program*) de l'UNESCO à laquelle sont conviés tous les géologues qui s'intéressent au Permo-Trias. Certains facteurs de la crise qui s'est alors produite sont encore d'actualité : accroissement des concentrations en dioxyde de carbone, anoxie océanique, réchauffement rapide. L'objectif est d'identifier les processus de récupération des écosystèmes après la crise, par tous les moyens à notre disposition.

L'excursion, qui occupera la majeure partie de cette réunion, permettra de visiter dans les montagnes d'Oman les unités de transition des formations permotriassiques le long de la marge gondwanienne de la Téthys.



# Prochaines manifestations

## SYSTÈMES CARBONÉS

Londres (G.B.) - 4 mars 2010



Ce colloque consacré à la science des systèmes carbonés est organisé par le groupe de géochimie de la Société géologique britannique. Sur les trois thèmes majeurs, il fera l'objet de l'intervention d'un conférencier invité et de présentations des participants :

- carbone planétaire (Pierre Cartigny, IGP, Paris) : le cycle du carbone mantellique, flux, état fixe (?), hétérogénéité ;
- paléo-carbone (Paul Pearson, Cardiff) : cycle du carbone et transition « greenhouse-icehouse » ;
- problèmes modernes du carbone (Joe Cartwright) : risques et défis de la séquestration du dioxyde de carbone en subsurface.

## STOCKAGE DU CARBONE EN MER DU NORD

Londres (G.B.) - 24 et 25 mars 2010

L'industrie de la capture et du stockage du dioxyde de carbone d'origine industrielle a un potentiel considérable de développement : deux milliards de livres et plus de 30 000 emplois vers 2030. Les capacités de stockage en mer du Nord des champs pétroliers et gaziers épuisés ou en voie d'épuisement sont estimées à 22 milliards de tonnes, soit 180 années d'émission des 20 sources principales de Grande-Bretagne. L'enjeu est donc énorme.

Mais les facteurs géologiques, les risques, les opportunités et les investissements nécessaires sont encore mal connus et doivent être approfondis. Les présentations se développeront sur trois thèmes :

- rôle du Service géologique national ;
- capacité de stockage en mer du Nord, tant britannique que néerlandaise ;
- centres d'activité de projets et d'études de stockage de gaz, tant en mer du Nord qu'à l'international.

Cette conférence internationale est organisée par le Groupe pétrolier de la Société géologique britannique.

## MODÉLISATION DES ROCHES PERMÉABLES

Edimbourg (Écosse)  
29 mars au 1<sup>er</sup> avril 2010

Cette conférence réunira les professionnels de disciplines diverses (géologie, statistique, mathématiques, ingénierie) pour confronter leurs vues sur la modélisation des roches perméables et fracturées, dans le but d'une meilleure prédiction des flux et des comportements hydromécaniques. L'accent sera porté, de façon non exclusive, sur l'éventuelle utilisation de ces réservoirs dans les projets de stockage de dioxyde de carbone.

Les principaux sujets d'investigation sont l'influence de la mécanique des roches sur les failles et les fractures, les processus de modélisation, les techniques quantitatives de collecte des données, les techniques géostatistiques, les incertitudes dans la modélisation des hétérogénéités, l'intégration des données dans des modèles d'écoulement.

Une demi-journée d'excursion permettra d'observer les grès du Dévonien supérieur de Pearse Bay, près d'Edimbourg.



## GÉOSCIENCES AU MOYEN-ORIENT

Manama (Bahrein)  
7 au 10 mars 2010

## GEO 2010

La neuvième conférence consacrée aux géosciences, surtout pétrolières, du Moyen-Orient a pris pour devise « comment faire face à la demande pétrolière dans un monde en transformation ». Tous les thèmes peuvent être abordés.

Cinq cours de mise à jour sont proposés :

- quantification des risques géologiques en conditions conventionnelles et non-conventionnelles ;

- fermetures au toit et sur faille des réservoirs clastiques et carbonatés ;

- interprétation de l'amplitude sismique (lithologie, porosité, fluides) ;

- géodynamique de l'habitat pétrolier en Arabie orientale ;

- principes et applications de l'analyse des systèmes pétroliers.

Quatre excursions prendront place, la première sur le champ d'Awali, les trois autres sur les affleurements omanais.

## RESSOURCES EN EAU DANS LES PAYS DU GOLFE

Mascat (Oman)  
22 au 25 mars 2010

Les pays du Golfe se situent dans une des régions du monde les plus pauvres en ressources en eau.



Elles sont limitées à la fois par le faible renouvellement naturel des réservoirs tant de subsurface que souterrains, mais aussi par un usage mal contrôlé, la dégradation et la salinisation de la qualité des eaux et enfin l'augmentation de la population et l'industrialisation. Ces facteurs ne peuvent que s'aggraver dans le futur. Il faut donc mettre en place un système de gestion durable qui sera le principal thème de cette neuvième conférence. Les langues de la réunion sont l'anglais et l'arabe.

Une exposition de matériels se tiendra en parallèle avec cette manifestation.

# Prochaines manifestations

## PAYSAGES

Neuchâtel (Suisse) - 6 au 11 avril 2010

Le terme de paysage est l'un des plus ambigus du vocabulaire usuel et du vocabulaire scientifique. Dans les pays anglo-saxons (landscape, landschaft et aujourd'hui cityscape), c'est le spectateur qui définit le paysage tandis que dans les pays de langue romane, c'est le contraire (paysage, paisaje, paessagio). On parle maintenant de paysages naturels, de paysages anthropisés, de paysages culturels. Autour de ses six thèmes, ce congrès des Sociétés historiques et scientifiques s'efforce d'éclaircir le problème :

- des mots pour le dire : le paysage des linguistes et l'approche sémiologique et sémantique du langage ;
- paysages perçus et paysages représentés, analyse culturelle du paysage, paysages du savant et du vernaculaire, perception du paysage des origines à l'époque moderne, paysage figuré entre réalité et imaginaire, paysage et iconographie, approche par les autres sens (olfactif, sonore) ;
- paysage identitaire et paysage patrimonial, routes historiques, paysage et politique, paysages et patrimoine, paysages et tourisme ;
- paysage vécu, paysage subi, paysage construit, leur perception au Moyen Âge, paysage et topographie, interprétation du paysage, paysages des réseaux, guerres et reconstructions ;
- le paysage et l'eau, paysages de l'eau dans l'Antiquité, étangs, lacs et eaux dormantes, rivières, paysages marins et sous-marins ;
- paysages urbains, paysages sacrés ;
- paysages anciens et actuels : reconstitution, évolution naturelle, anthropisation.

Les actes du congrès seront publiés sous forme électronique, en vente sur le site internet du Comité des travaux historiques et scientifiques (CTHS).

## PEUPELEMENTS ET ENVIRONNEMENTS JURASSIQUES

Lyon (France)  
22 au 24 avril 2010

Cette réunion spécialisée de la Société géologique de France, parrainée par le Comité français de stratigraphie, le Groupe français d'étude du Jurassique et l'Association paléontologique française, a été organisée en l'honneur de Serge Elmi, professeur à Lyon, récemment décédé. Elle a pour but de faire le point sur les relations entre peuplements et environnements du Jurassique par l'approche pluridisciplinaire de la géologie sédimentaire, de la paléoécologie, de la biostratigraphie et de la paléobiogéographie.

La journée du 24 avril sera consacrée au terrain avec l'étude de la série jurassique du Beaujolais méridional et du Mont d'Or lyonnais. Après évaluation, une partie des conférences, communications et posters sera publiée dans le Bulletin de la Société géologique de France.

## IMPACT HUMAIN SUR L'ÉROSION PAR RAVINEMENT

Lublin (Pologne) - 20 au 25 avril 2010

La formation et le développement des ravinelements sont deux des processus géomorphologiques majeurs, largement d'origine anthropique affectant les zones agricoles.

La réunion qui étudie ces phénomènes se tient tous les deux ou trois ans. Les principaux thèmes sont :

- historique de l'érosion par ravinement de par le monde ;
- intensité actuelle des processus d'érosion par ravinement ;
- impact anthropique, par utilisation des sols, sur le ravinement ;
- prévention et « remediation » (anglicisme).

Une excursion d'une journée visitera la partie occidentale du plateau du loess de Lublin, où ces phénomènes sont fréquents, tant passés qu'actuels. Une excursion de deux jours, après la conférence, étudiera le phénomène dans la région de Rostocze.



### Insertions publicitaires Géochronique

#### Tarifs 2010

1/4 de page NB	220 €HT
1/2 de page NB	330 €HT
1 page NB	660 €HT
1 page couleur interne	1 100 €HT
1 page couleur couverture	1 700 €HT

Pour une répétition de l'annonce dans le numéro qui suit la première insertion, réduction de 50%.

Les typons NB ou quadrichromie sont fournis par l'annonceur au format souhaité, 21 jours avant la parution du numéro et accompagnés de leur règlement.

Les typons peuvent être réalisés par l'imprimeur sur modèle de l'annonceur et devis préalable 45 jours avant la date de parution.

Renseignements : Société géologique de France  
77, rue Claude Bernard - 75005 Paris  
Tél. 01 43 31 77 35 - Fax 01 45 35 79 10  
Le tirage de Géochronique est de 3200 exemplaires.

# Prochaines manifestations

## GESTION INTÉGRÉE DES BASSINS FLUVIAUX

Lille (France) - 26 au 28 avril 2010

Cette réunion sur la gestion intégrée des réseaux hydrographiques dans le contexte de la directive-cadre de l'Union Européenne s'adresse aux scientifiques professionnels de l'eau (hydrogéologues, consultants, universitaires) et aux gestionnaires publics et privés concernés par ces problèmes. Le programme est le suivant :



- journée consacrée à la politique de l'eau : directive européenne et travaux déjà effectués de mise en place ;
- intégration des connaissances : écosystèmes, environnements, hasards climatiques et évolution climatique à long terme, menaces pesant sur l'eau à l'échelle du bassin ;
- interfaces entre sciences et politique de l'eau.

Des comptes-rendus seront publiés après la conférence et une exposition commerciale d'équipements se tiendra en parallèle.

## QUATERNAIRE DES HIGHLANDS ÉCOSSAIS

Inchnadamph (Écosse)  
28 avril au 3 mai 2010

Cette réunion de terrain de la *Quaternary Research Association* permettra de connaître les progrès récents de nos connaissances sur la chronologie, la dynamique et la paléocologie des masses glaciaires du Quaternaire récent :

- journée 1 : influence de la lithologie du substratum sur la formation du paysage, sédiments sub-glaciaires liés à l'écoulement, terrasses et variations du niveau marin, épaisseur du manteau glaciaire ;
- journée 2 : datation isotopique cosmogénique de la déglaciation du Dévonien supérieur, spéléothèmes, érosion et karst postglaciaires, tourbes holocènes ;
- journée 3 : moraines et ré-avancées du Dryas récent, reconstruction des glaciers et interprétation paléo-climatique ;
- journée 4 : grande rupture rocheuse, datation par chronologie  $^{14}\text{C}$ .

## MOSASAURES

Paris (France)  
18 au 22 mai 2010

Les Mosasaures sont des reptiles marins, apparentés aux lézards et aux serpents, dont l'existence se limite au Crétacé supérieur. Les plus grands pouvaient atteindre 15 m. Le premier fossile a été découvert dans la Meuse, en 1780. Le troisième colloque qui leur est consacré se tiendra au Muséum d'histoire naturelle de Paris, sous le patronage de la Société géologique de France et de l'Association paléontologique française. Les collections du Muséum, dont le spécimen type de *Mosasaurus hoffmani* et des fossiles provenant de France, des phosphates du Maroc et de la craie du Kansas, seront accessibles aux congressistes le 18 mai, jour de fermeture du musée. Une excursion pourrait prendre place le 22 mai, après la réunion.

## KARST

Malaga (Espagne)  
27 au 30 avril 2010

Le karst, produit de l'évolution climatique et hydrologique des roches carbonatées, est depuis très longtemps un objet de recherches du fait de ses abondantes ressources en eau. Plus récemment, on s'est rendu compte qu'il était aussi une source majeure d'informations sur les changements environnementaux et climatiques du passé. Le quatrième symposium international sur le karst traitera du progrès des connaissances dans ce domaine :

- hydrogéologie du karst, eau dans les zones sous-saturées, protection des ressources en eau dans le karst ;
- paysages karstiques, protection de l'héritage naturel, écosystèmes, importance de l'eau souterraine dans l'environnement ;
- ingénierie géologique en milieu karstique : grandes structures (barrages, tunnels), utilisation éventuelle pour le stockage ;
- relations entre hommes et karst, fréquentation touristique (impacts environnementaux, risques).

Le 29 avril, une excursion d'une journée visitera des sites karstiques en Espagne méridionale. Par ailleurs, des cours de mise à jour sont également proposés le 26 avril (estimation de la recharge, méthodes d'investigation des sites karstiques.)

## PALÉONTOLOGIE PROGRESSIVE

Bristol (G.B.) - 26 au 28 mai 2010

Cette réunion annuelle de l'Association des paléontologistes britanniques (PALASS) a pour objet de permettre aux doctorants et jeunes docteurs de présenter le résultat de leurs travaux dans le domaine paléontologique, sans qu'il soit nécessaire que cette recherche soit déjà totalement aboutie. Les présentations peuvent être orales ou sur panneaux. Elle est complétée par une journée de terrain sur un site fossilifère proche de l'université où se tient la réunion.

# Prochaines manifestations

## PATRIMOINE GÉOLOGIQUE MAROCAIN

Agadir (Maroc) - 6 au 8 mai 2010

Tous ceux qui ont visité le Maroc ont été témoins du pillage de son patrimoine géologique et surtout paléontologique. Avec la première réunion qui s'est tenue à Marrakech en 2006, l'Association pour la protection du patrimoine géologique marocain (APPGM) a pu mettre en place une charte pour la préservation de ce patrimoine. La réunion suivante (Meknès, 2008) a permis de discuter de l'état d'avancement des projets et d'identifier les difficultés qui entravent sa sauvegarde. La nouvelle réunion a pour objet de poursuivre le débat et de mettre en place les structures de suivi. Ses thèmes en découlent : gestion et développement durable du patrimoine géologique (géotourisme, géoparcs), inventaire des patrimoines paléontologique et préhistorique, aspects juridiques de la protection du patrimoine, rôle des associations et des musées, développement de la recherche dans le domaine de la paléontologie et de la préhistoire, géologie des sites fossilifères.

Les langues du congrès sont le français et l'anglais. Une excursion d'une journée dans le Haut-Atlas occidental complètera le programme.

## GLACE DE MER

Tromsø (Norvège) - 31 mai au 4 juin 2010

Se tenant tous les cinq ans (celui-ci est la troisième édition), le symposium sur la glace polaire est organisé par la Société glaciologique internationale. La glace de mer est une partie relativement fragile du système terrestre, susceptible de changements rapides. Les thèmes de discussion suivants sont proposés :

- la glace de mer dans un système climatique global et régional : interactions atmosphère-glace-océan, dynamique et simulation des modèles climatiques, conditions passées ;
- rôle de la glace de mer dans les écosystèmes ;
- propriétés physiques de la glace de mer ;
- bio-géochimie et physique de la glace de mer (composition, polluants, cycles du fer, du carbone et de l'oxygène, matière organique dissoute) ;
- épaisseur, dérive et distribution à grande échelle ;
- neige et glace de mer : interactions neige-atmosphère, échanges gazeux et effets sur la télédétection ;
- impacts sociaux et économiques sur les populations indigènes, le transport maritime et les usages économiques de l'Arctique dans le cadre du changement climatique ;
- état de la recherche sur la glace de mer après l'Année polaire internationale.

## EURISPET

Padoue (Italie) - Juin 2010

L'association EURISPET organise des séminaires intensifs pour les jeunes chercheurs européens en pétrologie, animés par des spécialistes de haut niveau. Quatre sessions se sont déjà tenues (Paris, Canberra, Budapest, Grenade), la sixième se tiendra à Zürich. Le séminaire de Padoue est consacré au métamorphisme de haute température et à la fusion de la croûte. Après présentation des posters des participants, les sujets suivants seront discutés : granulites et migmatites, fusion crustale (microstructure, thermodynamique, approche géochimique), contraintes expérimentales et anatexie de la croûte, magmas et volcanisme anatexiques, applications (propriétés du magma, genèse des chambres magmatiques, risque volcanique). Les derniers jours seront consacrés à une excursion de terrain dans la zone d'Ivrea et à une discussion sur les futurs développements de la pétrologie de haute température.

## BALWOIS 2010

Ohrid (Macédoine)  
25 au 29 mai 2010

Les conférences BALWOIS sont un forum consacré à l'eau : échanges d'informations sur les relations entre climat et environnement aux fins d'améliorer la qualité et les quantités d'eau disponibles et sur les politiques de l'eau actuelles des agences gouvernementales. Elles entendent aussi créer des partenariats pour résoudre les problèmes de rareté de l'eau, des crues et des sécheresses, des dégradations de l'environnement et des risques spécifiques aux régions. L'accent est porté, mais de façon non exclusive, sur les Balkans.

Les principaux sujets traités seront : climat et hydrologie, environnement et impact des activités humaines, risques liés à l'eau, gestion intégrée des ressources en eau, éco-hydrologie, méthodes de calcul et technologies.

Cette manifestation, sous le patronage des autorités macédoniennes, est soutenue par le Ministère français de l'écologie, l'Association internationale des sciences hydrologiques (IAHS) et l'ambassade de France à Skopje.

## CONGRÈS GÉOLOGIQUE SERBE

Belgrade (Serbie)  
26 au 29 mai 2010

Le congrès des géologues serbes s'inscrit dans une longue tradition, cette réunion étant conjointement organisée par la Société géologique de Serbie et l'Association des ingénieurs et techniciens géologues de Serbie. Tous les sujets relevant des géosciences y seront discutés. Deux tables rondes complèteront le programme, l'une sur l'enseignement et la popularisation de la géologie, l'autre sur les perspectives futures des géosciences.

Les langues officielles de cette réunion sont le serbe et l'anglais.

# Prochaines manifestations

## GLACES SOUTERRAINES

Obertraun (Autriche) - 5 au 11 juin 2010

Cet atelier international sur la glace des grottes propose des sessions scientifiques sur les sujets suivants :

- météorologie : les échanges de chaleur en subsurface et avec l'extérieur, liés à l'hydrologie et à la ventilation des grottes, contrôlent la formation et la conservation de la glace ;
- glaciologie : loin d'être uniformes, leurs propriétés physicochimiques, leur structure cristalline et leurs inclusions donnent des indications sur l'histoire et l'évolution des grottes glaciaires. La détermination des volumes de glace relève aussi de ce sujet ;
- paléoclimatologie : les glaces souterraines ont un potentiel important pour permettre les reconstructions paléoclimatiques et paléoenvironnementales. Cette session traitera des méthodes modernes de datation, d'analyse et d'interprétation climatiques ;
- aspects socioéconomiques et historiques.

Les meilleures communications seront publiées dans la revue Cryosphère.

## SCLÉROCHRONOLOGIE

Mayence (Allemagne) - 24 au 28 juillet 2010

La sclérochronologie est la science qui étudie les variations physiques et chimiques des tissus durs accrétoires des organismes en fonction du contexte temporel et spatial dans lequel ils se sont formés. Les figures de croissance reflètent les modalités de croissance annuelles, mensuelles, hebdomadaires, quotidiennes ou liées à la marée. Comme la dendrochronologie, elle a révolutionné notre approche dans la reconstruction des changements environnementaux et climatiques dans le temps et dans l'espace. Aujourd'hui, outre sa contribution à l'étude des climats passés, on l'applique maintenant au suivi de la pollution, aux études historiques, à l'écophysiologie, aux variations du régime alimentaire, aux effets des migrations, cette liste n'étant pas limitative.

Les quatre premiers jours de réunion traiteront des paléoclimats et des paléo-environnements, du suivi environnemental et de celui de la pollution, de la biominéralisation, de l'analyse statistique et de la modélisation. Le jeudi 29 juillet, les laboratoires spécialisés de l'université de Mayence seront ouverts aux congressistes et il se tiendra une table ronde où seront évoqués les axes futurs de la recherche, les stratégies à adopter pour mieux faire connaître la sclérochronologie, les relations avec les disciplines voisines. Des excursions sont enfin proposées pour la journée du vendredi 30 sur le bassin tertiaire de Mayence et le bassin permien.

## RST

Bordeaux (France) - 25 au 29 octobre 2010

La traditionnelle Réunion des sciences de la Terre, qui se tient sous l'égide de la Société géologique de France (SGF) et de la Fédération française de géologie (FFG) donne l'opportunité à des étudiants et à des jeunes chercheurs de présenter leurs travaux à un très large public de professionnels. On attend 600 à 800 chercheurs français et étrangers ; 600 communications et 300 posters devraient être présentés. Les 36 sessions sont regroupées en 8 thèmes :

- observation de la terre, géomorphologie, risques ;
- bassins sédimentaires, caractérisation des dépôts, processus, hydrocarbures ;
- fluides géologiques ;
- minéralogie et ressources minérales ;
- paléo-environnements, paléoclimats ;
- érosion et transport sédimentaire du continent à l'océan ;
- géodynamique, tectonique, magmatisme ;
- formation, valorisation, utilisation des géosciences, forum des métiers.

Avant congrès, des excursions sont proposées en Périgord préhistorique et dans le vignoble bordelais (blancs liquoreux). Après le congrès, il sera possible de visiter le bassin tertiaire du versant sud-pyrénéen et les sites vinicoles du Médoc bordelais.

## ARGILES

Madrid et Séville (Espagne)  
6 au 11 juin 2010

Cette réunion « trilatérale » est conjointement organisée par la *Clay Mineral Society* (CMS), la *Clay Science Society of Japan* (CSSJ) et la *Spanish Clay Society* (SEA) dans le but de promouvoir les aspects scientifiques et techniques innovants des argiles et des minéraux associés. Elle débutera par un atelier d'une journée à Madrid, consacré au développement et à l'usage de matériaux nouveaux dérivant des minéraux argileux. La seconde journée sera consacrée à un symposium sur les sépiolites et à une excursion dans le bassin du Tage (stratigraphie générale et minéralogie) avec une visite aux carrières d'argiles magnésiennes à quelques kilomètres au sud de Madrid.

Les trois journées suivantes seront centrées sur Séville, pour une excursion aux mines de Rio Tinto et la tenue de l'assemblée générale, qui couvrira les sujets suivants : structure et chimie cristallines, minéralogie et géologie, sols et sédiments, environnement, aspects biologiques et sanitaires, applications industrielles, place de l'argile dans les programmes éducatifs.

## DENDROCHRONOLOGIE

Rovaniemi (Finlande)  
13 au 18 juin 2010

Cette conférence regroupera environ quatre cents chercheurs d'une quarantaine de pays, en ces temps de changement climatique, pour répondre aux questions suivantes :

- que peuvent nous apprendre les anneaux de croissance des arbres sur la santé d'une forêt ?
- quels genres d'exigences le changement climatique impose-t-il à la gestion durable des forêts ?
- quelle est l'importance relative des oscillations climatiques récentes comparées aux variations à long terme ?
- quelles possibilités nous ouvrent les nouvelles techniques analytiques pour déceler les tendances passées, présentes et futures dans la croissance des arbres ?



## LA TROISIÈME ÉDITION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE À 1/50 000 000

Cette troisième édition de la *Carte géologique du Monde à 1/50 000 000* fait suite aux première et deuxième éditions publiées par la CCGM, respectivement en 1990 et 2000. Ce document bilingue (français-anglais) est une compilation, très synthétique étant donné la petite échelle de la Carte, dont l'objectif est essentiellement pédagogique. C'est une tentative de représentation (très) simplifiée de la géologie de notre planète dans sa globalité : continents et fonds océaniques, côte à côte.

Cette nouvelle édition, de conception entièrement rénovée par rapport à la carte publiée en 2000, prend en compte l'état des connaissances géologiques à la charnière des XX<sup>e</sup> et XXI<sup>e</sup> siècles. Elle se présente, pour la première fois, en 2 feuilles, de même format :

- la **Feuille 1 (Physiographie, Volcans, Astroblèmes)** fait ressortir le « grain » du modelé de la surface solide du globe terrestre, une fois les bassins océaniques vidés de leur contenu aqueux ;

- une **Feuille 2 (Géologie, Structure)** donne à voir les grands traits des différentes unités lithostratigraphiques et des principaux éléments structuraux qui dessinent la marqueterie actuelle de la surface de notre Terre, aboutissement de 4,56 milliards d'années de mues incessantes. Cette deuxième feuille est l'équivalent, très notablement remanié et augmenté, de la feuille unique de la deuxième édition.

Chaque feuille comprend une carte principale en projection Mercator, et une représentation spécifique (projection stéréographique polaire) pour chacune des deux aires circumpolaires. Les maquettes ayant servi à la préparation de la carte principale ont été réalisées, avant leur numérisation en mode vectoriel, à l'échelle de 1/25 000 000<sup>e</sup>. Les projections polaires s'étendent jusqu'aux parallèles 60°N et 60°S (contre 70°N et 60°S pour les éditions précédentes) et le Groenland y est désormais représenté dans sa totalité, ces projections couvrant les mêmes aires circumpolaires. Pour en améliorer la lisibilité, l'échelle a été légèrement agrandie à 1/46 000 000<sup>e</sup>.

Pour des raisons pratiques et de priorité de diffusion, cette 3<sup>e</sup> édition est d'abord publiée à l'échelle de 1/50 000 000<sup>e</sup> (pour la projection Mercator), avant de procéder ultérieurement à l'édition de la version originale (1/25 000 000<sup>e</sup>) et d'une version numérique interactive (cédérom).

Dans les éditions antérieures à 1/25 000 000<sup>e</sup>, la projection Mercator était imprimée en 2 coupures (20°W-170°W ; 170°W-20°W) ce qui permettait à chacun de réaliser l'assemblage de son choix : centrage sur l'Atlantique (ouverture d'un océan et emboîtement des masses continentales conjuguées) ou sur le Pacifique (subductions et traces de « points chauds »). L'unique coupure Mercator de cette nouvelle édition nous a obligé à fixer le mode de centrage. Afin de pallier partiellement cet inconvénient, nous avons choisi le centrage « océan Pacifique » (méridien 0° pour les bords E et W) pour la Feuille 1-Physiographie, et

le centrage « océan Atlantique » (méridien 180° pour les bords) pour la Feuille 2-Géologie, afin que le lecteur puisse visualiser les deux modes d'assemblage.

Les échelles et les projections étant identiques, on peut vérifier la superposition de la morphologie des zones sous-marines de la Feuille 1 avec les éléments géologiques de la Feuille 2, en utilisant une table lumineuse.

### FEUILLE - 1 : PHYSIOGRAPHIE, VOLCANS, ASTROBLÈMES

Publiée pour la première fois à la CCGM, cette carte (**voir troisième de couverture**) montre la totalité de la morphologie de la Terre et notamment celle, moins connue, des zones sous-marines qui représentent presque 71% de sa surface. Au dégradé des couleurs qui traduit le modelé des reliefs, on a rajouté, uniquement pour les océans, des indications matérielles de la profondeur sous la forme de fines lignes noires représentant les isobathes tous les 1 000 m. Par contre sur les terres émergées, nous n'avons gardé les isohypses équivalentes que sur les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique.

On a reporté sur cette feuille les 1 506 volcans actifs ou récents *i.e.* ayant fait éruption au cours des dernières 10 000 années, qui ne peuvent être, a priori, considérés comme définitivement éteints. Ces systèmes volcaniques sont répartis en 1 436 appareils subaériens et 70 édifices sous-marins. Chaque triangle est bordé d'un fin liseré blanc qui permet de mieux individualiser les volcans des régions très actives comme dans les arcs insulaires ou dans les arcs cordillères. Le volcanisme fissural qui caractérise l'ensemble des dorsales d'accrétion océanique active (lieu de la divergence des plaques lithosphériques) n'est pas figuré, ici, en tant que tel. Il est représenté, par l'axe des dorsales actives cartographiées sur la Feuille 2.

À terre, on a aussi reporté l'emplacement de 198 astroblèmes, ou cratères d'impact météoritique. On a distingué 2 catégories : cratères (astérisques noirs) de diamètre < 10 km ; cratères de diamètre ≥ 10 km. On y a rajouté, bien qu'il ne s'agisse pas d'un cratère d'impact proprement dit, le site de la Tunguska (Sibérie centrale), lieu de l'explosion en altitude d'un astéroïde en 1908.

Enfin, on a pointé sur cette feuille quelques informations concernant des points remarquables du relief terrestre.

### FEUILLE - 2 : GÉOLOGIE, STRUCTURE

La légende de la carte est organisée en 3 sections : zones émergées, zones sous-marines, points chauds (**voir feuillet central**).

#### ZONES ÉMERGÉES

##### Unités chronostratigraphiques

Les zones émergées (29,2 % de la surface de notre planète) correspondant dans leur immense majorité à des formations d'origine continentale (ou continentalisées, dans le

# Actualités

cas des arcs insulaires), ont été représentées en utilisant 8 très grandes *unités chronostratigraphiques* : 1 = Cénozoïque ; 2 = Mésozoïque ; 3 = Paléozoïque supérieur ; 4 = Paléozoïque inférieur ; 5 = Néoprotérozoïque ; 6 = Mésoprotérozoïque ; 7 = Paléoprotérozoïque ; 8 = Archéen. Un certain nombre de regroupements entre ces unités a été opéré quand le contexte géologique ou cartographique le nécessitait. Par rapport à l'édition précédente, nous avons, par souci de cohérence, supprimé le Trias et le Quaternaire, mais introduit les trois ères du Protérozoïque.

Au sein de ces unités temporelles, on a distingué 3 grands ensembles de *faciès lithologiques* : • *formations sédimentaires* ou de nature indifférenciée (ou difficile à définir) ; • *formations volcaniques extrusives* (V), • *formations endogènes* (P). Les 2 dernières catégories de roches sont caractérisées par un semis de points en surimposition (bleus pour les extrusives, rouges pour les endogènes). Une seule exception a été faite pour le volcanisme cénozoïque (V1) qui se distingue par une teinte uniforme d'un bleu soutenu). En effet, le volcanisme de cette ère (qui inclut celui du Quaternaire et du temps présent) est la conséquence, dans bien des cas (notamment dans le volcanisme de subduction), d'un contexte géodynamique qui perdure jusqu'à nos jours. Il était donc important qu'il soit très nettement perceptible à l'œil et que l'on puisse le mettre aisément en relation avec les volcans « actifs » de la Feuille 1. Une autre exception a été faite pour les formations les plus anciennes, archéennes, indifférenciées pour des raisons de simplification.

## Ophiolites

Par souci de simplification, nous n'avons retenu, ici, que les ophiolites d'âge mésocénozoïque

## Grandes provinces magmatiques : les trapps

À certaines périodes de l'histoire de notre planète, des pulsations éruptives de grande ampleur, mais d'une durée qui peut être inférieure à 1 million d'années, se sont produites dans les profondeurs du manteau terrestre. Ces « crises » magmatiques ont conduit à de très vastes et volumineux épanchements de basaltes aussi bien à la surface des continents, les *trapps*, que sur le plancher océanique, les *plateaux océaniques*. Ces immenses effusions volcaniques résulteraient de la remontée jusqu'à la base de la lithosphère d'un large panache constituant la tête d'un puissant *point chaud*, dans les premières phases de son fonctionnement. L'ensemble de ces manifestations en surface sont dénommées, en anglais, *Large Igneous Provinces* (abrégé en *LIP*).

Dans les précédentes éditions, les trapps étaient « noyés » dans les trop grandes tranches temporelles des unités chronostratigraphiques retenues pour la carte (Paléozoïque supérieur pour les trapps de Sibérie, ou Mésozoïque pour ceux du Deccan). Par ailleurs, un certain nombre de trapps se trouvent précisément à cheval sur les grandes coupures qui bornent ces unités (limite Paléozoïque-Mésozoïque en Sibérie ; limite K/T pour le

Deccan). Pour pallier ces deux inconvénients, nous avons choisi, pour cette nouvelle édition, d'attribuer à tous les trapps la même couleur (rouge orangé vif), avec l'indication de leur âge moyen en Ma. Aussi, ont été représentés les trapps d'*Emeishan* (Chine), de Sibérie, du *Karoo* et de Ferrar (Antarctique), du *Parana* et d'*Etendeka*, de *Rajmahal* et de *Sylhet* (Inde), du Deccan, d'*Éthiopie/Yémen*, de *Columbia River/Snake River*.

Enfin, nous avons fait figurer (tireté simple rouge) les limites (que l'on peut suivre dans l'est de l'Amérique du Nord, le NE de l'Amérique du Sud et l'ouest de l'Afrique et de l'Europe) d'une grande province magmatique d'un seul tenant. Il s'agit des trapps de la *CAMP* (de l'anglais, *Central Atlantic Magmatic Province*) qui ont été formés à partir d'un point chaud, il y a 200 Ma (limite Trias/Jurassique), peu avant que l'ouverture de l'Atlantique central ne désarticule cet ensemble. L'érosion en a fait disparaître l'empilement des coulées de lave, mais la CAMP a pu être reconstituée grâce aux sills et dykes (corps volcaniques intrusifs), à l'origine sous-jacents aux émissions de surface.

## Glaciers, inlandsis

Les glaciers d'une certaine ampleur ont été cartographiés dans l'extrême Sud des Andes, ainsi que ceux des îles de l'extrême nord canadien et eurasiatique. On leur a attribué la même teinte que celle des *calottes glaciaires* du Groenland et de l'Antarctique. Sous ces deux derniers *inlandsis*, le *contour de la cote zéro* (niveau de la mer) a été dessiné.

## Éléments structuraux

Sur les terres émergées, ne figurent que deux éléments structuraux : les grandes *failles normales* ou de *nature non précisée* et les grands *fronts de chevauchement* ceinturant notamment les grandes chaînes orogéniques.

## Le cas de l'Islande

L'Islande, qui couvre une superficie importante (103 000 km<sup>2</sup>), est une île entièrement volcanique, édifiée sur un substratum de croûte océanique modifiée par un puissant point chaud lié à l'ouverture de l'Atlantique nord. L'île est traversée par l'axe de la *dorsale médio atlantique* qui la partage en deux domaines distincts : la plaque Europe, à l'est, et la plaque Amérique du Nord, à l'ouest. Au lieu de cartographier l'île comme le reste des terres émergées (en l'occurrence en « V1 », à l'instar des éditions précédentes), nous avons choisi de la représenter comme une surface de croûte océanique où l'on distingue des basaltes plio-quaternaires, puis miocènes, de part et d'autre de l'axe d'accrétion océanique.

## ZONES SOUS-MARINES

L'océan mondial constitue 70,8 % de la surface de notre globe. Il recouvre d'une part les *marges continentales*, et d'autre part, les fonds marins dont le substratum est formé de *croûte océanique* « fabriquée » à l'axe des *dor-*

*sales d'accrétion océanique*. Le dessin de la maquette de la partie sous-marine de cette Feuille 2 a été réalisé ou contrôlé, pour certains éléments (axes des dorsales d'accrétion, failles transformantes/zones de fracture, axes des fosses de subduction, plateaux océaniques, traces de points chauds et autre reliefs « anormaux »), en superposant cette feuille à la maquette « Physiographie ».

### MARGE CONTINENTALE

#### Limite continent/océan (COB)

Sur la carte, on a représenté la limite entre croûte continentale et croûte océanique (en anglais *COB*, i.e. *Continent Ocean Boundary*) est marquée par un *trait bleu* visible le long des *marges continentales passives*, nées du rifting lors de la séparation de deux blocs continentaux qui, en s'éloignant l'un de l'autre, ont laissé la place à un océan. Dans la réalité, cette limite n'est pas toujours très nette et l'on doit plutôt parler d'une zone de transition entre une croûte continentale bien identifiable et une croûte océanique « normale » caractérisée par des anomalies magnétiques bien répertoriées.

On observera sur cette feuille, quelques « radeaux » de croûte continentale isolés au sein d'un bassin océanique. Ce sont des *microcontinents* qui résultent des vicissitudes de l'ouverture d'un océan. C'est le cas, notamment, de la plateforme des Seychelles, dans l'Océan Indien ou du microcontinent de Jan Mayen, dans l'extrême nord de l'Atlantique.

#### Arcs insulaires

Les arcs insulaires sont traités comme les continents et délimités par le même *trait bleu*. En effet, ils sont le résultat des processus magmatiques propres à la *subduction* qui ont conduit à la « *continentalisation* » de leur croûte.

#### Plateau continental

Les *plateaux continentaux* constituent la partie la plus interne des marges continentales. Ils s'étendent entre le rivage et la rupture de pente au-delà de laquelle descend le *talus continental*. La limite externe de cette terrasse se situe en moyenne vers -132 m. Pour des raisons de commodité et d'échelle de la carte, c'est *l'isobathe -200 m* qui a servi ici à délimiter le plateau continental, car cette profondeur n'est jamais très éloignée de la rupture de pente. Sur cette feuille et du point de vue de l'expression cartographique, le plateau continental n'est traité que du seul point de vue morphologique (terrasse) même si son substratum est de nature océanique, et masque toutes les autres unités cartographiques qu'il pourrait recouvrir. C'est ainsi que le plateau « continental » du delta du Niger oblitère la nature océanique de la croûte sous-jacente sur laquelle l'alluvionnement du grand fleuve africain prograde. La cartographie du plateau continental est une innovation de cette 3<sup>e</sup> édition. C'est un élément important pour la paléogéographie récente. Il permet d'apprécier le recul du niveau marin qui a eu lieu lors de la *grande régression du Würm*, dernier maximum glaciaire au cours duquel le niveau de la mer a baissé de près de 130 m.

#### Talus continental

La partie de la marge continentale située en bas de la plateforme jusqu'au contact avec la croûte océanique est appelée *talus continental*. Cela concerne aussi l'armature des arcs insulaires.

#### La marge antarctique

La marge continentale de l'Antarctide présente des caractéristiques morphologiques particulières à cause de la surcharge isostatique exercée sur la lithosphère du continent par son énorme calotte glaciaire. Plateau continental et talus continental n'ont donc pas été différenciés ici et ont été regroupés sous une même teinte, différente de celles qui ont été attribuées respectivement aux autres plateaux et talus continentaux.

#### Plateforme de glace

Une *plateforme de glace* est, pour les glaciologues, un volume de glace de l'inlandsis qui a flué bien au-delà du trait de côte. N'ont pas été prises en compte, les plateformes de glace du Groenland, ni celles des îles arctiques du Canada, trop petites pour l'échelle de la carte.

### BASSINS OCÉANIQUES

Les bassins océaniques dont le substratum basaltique est formé de croûte océanique, ont une histoire et une structure différant complètement de celles des continents. Ils occupent environ 59 % de la surface de la planète. On y distingue cinq grands types de morphostructures : • les *plaines abyssales* ; • les dorsales d'accrétion océanique ; • les grandes zones de fracture ; • les fosses de subduction ; • les reliefs océaniques « anormaux ».

#### Âge de la croûte océanique

La cartographie de l'âge de la croûte océanique a été obtenue en interpolant la position des anomalies magnétiques qui résultent de l'inversion périodique du champ magnétique terrestre, de manière à ne faire apparaître que les limites des unités chronostratigraphiques retenues : *Plio-Quaternaire* – *Miocène* – *Oligocène* – *Éocène* – *Paléocène* – *Crétacé supérieur* – *Crétacé inférieur* – *Jurassique supérieur* – *Jurassique moyen*. Enfin, ont été cartographiés en *gris* un certain nombre de secteurs océaniques où l'âge de la croûte est indéterminé.

#### Plaines abyssales

Avec un fond très plat, et tapissé de sédiments souvent épais, les plaines abyssales s'étalent de part et d'autre des dorsales d'accrétion océanique. Leur profondeur (tonalités bleues sur la physiographie de la Feuille 1) croît insensiblement de quelque 4 000 m à un peu plus de 6 000 m.

#### Dorsales d'accrétion océanique

Les *dorsales* (ou *rides*) *d'accrétion océanique* forment la plus grande chaîne de montagnes du monde avec une longueur cumulée de près de 80 000 km sinuant à travers les quatre océans. Les dorsales océaniques, larges de 1 000 à

# Actualités

3 000 km, s'élèvent de 2 500 à 3 000 m au-dessus des plaines abyssales, avec une crête qui culmine en moyenne vers 2 500 m de profondeur. Elles occupent près du tiers de la surface des fonds marins.

## Axe de dorsale d'accrétion océanique

L'axe des dorsales d'accrétion océanique actives constitue la *frontière entre deux plaques lithosphériques* divergentes. Selon que le *taux de divergence* est faible ou fort, la morphologie de la ride diffère. Avec des vitesses d'ouverture faibles (2 à 3 cm/an), comme en Atlantique, le relief est accidenté avec une vallée profonde (rift). Avec des vitesses rapides (autour de 15 cm/an), comme dans la dorsale est pacifique, la topographie est beaucoup plus adoucie, avec absence de vallée axiale profonde. Ce contraste est très perceptible sur la Feuille 1 (Physiographie).

En ce qui concerne les *bassins arrière-arc* qui s'ouvrent « derrière » un arc insulaire, un mini océan se forme et l'axe d'accrétion océanique est représenté par le *même trait rouge* que pour les océans.

Les *axes d'accrétion océanique fossile* sont représentés comme les axes actifs, mais en *tiré* (rouge), comme en mer de Tasman.

## Faille transformante, zone de fracture

Les bassins océaniques sont hachés par un réseau de longues failles (*traits noirs* sur la carte) recoupant perpendiculairement les dorsales d'accrétion océaniques. Il s'agit du duo *faille transformante* (active)-*zone de fracture* (fossile) qui atteint facilement une longueur de plusieurs milliers de kilomètres. Le jeu de quelques failles transformantes a été reporté sur la carte (22 *doubles demi-flèches noires de sens opposés*).

## Zone de subduction, fosse de subduction

Les zones de subduction, marquent la *frontière entre deux plaques lithosphériques convergentes*. Leur longueur cumulée est d'environ 55 000 km, un ordre de grandeur comparable à celui des axes d'accrétion océanique. Les *zones de subduction actives* sont caractérisées par un *trait vert avec petits triangles pleins* dont la pointe est placée du côté de la plaque chevauchante, et indiquant le sens de la subduction. Du côté concave de l'arc insulaire, le bassin arrière-arc s'est ouvert en se détachant soit d'un continent, soit d'un autre arc insulaire devenu un *arc rémanent*.

Les zones de convergence sont généralement marquées dans la morphologie sous-marine par une *fosse de subduction*. Ces dernières ne sont pas toujours visibles, car il arrive qu'elles soient entièrement comblées par un *prisme d'accrétion sédimentaire*, dont le *front de déformation* est indiqué, sur la carte, par un *symbole* similaire à celui de la subduction, mais de *couleur bleu clair avec des triangles évidés*. Dans l'espace compris entre ce front et l'axe de la fosse de subduction, on a laissé apparaître l'âge de la croûte océanique destinée à être subduite, mais masquée par le prisme.

Rares sont les endroits où l'on peut assister à une *subduction naissante*, représentée par le *figuré* de subduction active (*vert avec triangles évidés*). C'est notamment le cas au nord de l'arc des Îles de la Petite Sonde pour accommoder le blocage occasionné, au sud, par la collision avec le bloc continental australien.

On signalera un cas de *subduction fossile* (représentée par un *figuré* similaire, mais en *tiré/point de couleur violette*) représenté par la *fosse du Vitiá* qui s'étire depuis l'archipel des Salomon jusqu'à l'extrémité nord de l'arc des Tonga.

## Reliefs sous-marins « anormaux »

Il s'agit de structures d'origine volcanique dont la genèse est postérieure à la croûte océanique sur laquelle ils ont été édifiés. C'est un vaste ensemble de reliefs de toutes tailles qui affecte tous les océans et auxquels on a attribué la même *couleur d'un brun orangé* rappelant un peu, et en plus atténué, celle des trapps sur les continents. En effet, tous ces reliefs résultent d'un magmatisme, généralement puissant, provenant de l'activité d'un point chaud relativement fixe, à certaines exceptions près. On distingue : des *monts sous-marins*, reliefs individualisés, de taille relativement réduite, pouvant être nappés de sédiments ; des *plateaux océaniques* ; des *traces de point chaud*, encore parfois appelées « *rides asismiques* » parce que ce sont des « dorsales » qui ne montrent aucune sismicité, contrairement aux dorsales médio-océaniques.

Un *plateau océanique* est généralement édifié en un temps relativement bref à l'échelle des temps géologiques, lors d'une phase d'intense activité (panache) du point chaud. L'*âge moyen* de ce dernier est indiqué en *rouge*. L'âge (parfois assez approximatif) n'a été donné que pour 10 plateaux océaniques : dans l'océan indien, la *Maud Rise*, le plateau des *Kerguelen*, le plateau de *Broken Ridge* ; dans le Pacifique, la *Shatsky Rise*, la *Hess Rise*, le plateau de *Manihiki*, le plateau d'*Ontong Java*, le plateau d'*Hikurangi* ; dans l'océan Atlantique, le plateau *Caraïbe*, la *Sierra Leone Rise*.

Lorsque la « queue » d'un point chaud affecte la plaque lithosphérique sus-jacente pendant une période de temps beaucoup plus longue que lors de sa phase « panache » initiale, il imprime sur cette dernière une *trace* formée d'un alignement d'appareils volcaniques. L'âge de différents jalons marquant la progression de cette trace a été reporté pour les points chauds de : *Hawaï* (l'exemple le plus connu), *La Réunion*, *Kerguelen*, *Louisville*, *Tristan da Cunha*, et *île de Pâques*.

## Limite diffuse de plaques

Un *figuré* de *hachures grises* couvre les secteurs océaniques où la frontière transformante entre deux plaques est mal définie, diffuse, sur une bande de largeur variable, (p. ex. entre les plaques Amérique du Nord et Amérique du Sud). Mais le secteur le plus largement représenté se trouve dans le centre de l'océan indien où il traverse toute la lar-

geur de la plaque indo-australienne. Il ne s'agit pas encore d'une vraie frontière séparant une plaque Inde d'une plaque Australie, mais d'un secteur où le substratum basalte est déformé sous l'effet de contraintes compressives.

#### **Volcanisme sous-marin lié à l'ouverture de l'Atlantique Nord et de l'Atlantique Sud**

Un *hachuré rouge* indique la présence de SDRs (Seaward Dipping Reflector sequences) ou séquences de réflecteurs pentés vers l'océan, ou de *basaltes sous-marins* massifs, affleurants ou enfouis, témoignant tous d'une intense activité volcanique liée à l'ouverture de l'Atlantique Nord au Paléogène et au fonctionnement du puissant *point chaud de l'Islande*.

Dans l'Atlantique Sud, on a, plus récemment, mis en évidence des SDRs (*hachuré bleu*) sur les marges continentales conjuguées d'Argentine et de Namibie-Afrique du Sud. La présence de ces réflecteurs est à mettre en rapport avec l'ouverture de l'Atlantique Sud et la présence du point chaud de *Tristan da Cunha*.

#### **POINTS CHAUDS**

La théorie du point chaud a été formulée en 1963 par Tuzo Wilson, et a eu un énorme succès parce qu'elle a fourni une explication cohérente à la distribution d'un volcanisme spécifique, exprimé généralement hors des limites de plaques (d'où le nom de *volcanisme intraplaque*) et particulièrement dans le domaine océanique. La liste des points chauds comprenait à l'origine une vingtaine de cas, mais leur nombre a démesurément enflé jusqu'à près de 130 unités, voire beaucoup plus. Aujourd'hui, on est revenu à un nombre plus modeste, entre 40 et 50. Mais tous ne correspondent pas au modèle d'origine dont les critères de base sont notamment : l'origine profonde d'un panache mantellique, et un fonctionnement de longue durée (plusieurs dizaines de millions d'années) qui détermine la progression d'une trace volcanique en

surface. Dans ces cas non conformes au modèle, on parle alors de points chauds peu profonds, ou « faibles », ou de « lignes chaudes ». Ce dernier cas est bien illustré par l'alignement volcanique NE-SW du Cameroun où l'âge du volcanisme n'est pas distribué, suivant une progression régulière, mais sur un mode assez aléatoire. La contestation du concept de point chaud est encore forte depuis le début des années 2000, où certains chercheurs nient l'existence d'un grand nombre de « panaches » et proposent d'expliquer l'origine des LIP par des déformations liées à la seule tectonique des plaques, provoquant des déchirures de la lithosphère, favorisées par des lignes de faiblesse préexistantes comme les zones de fracture.

Quoiqu'il en soit, on a reporté sur la Feuille 2, la *position* exacte ou supposée de 45 points chauds (leur liste est donnée par l'encadré placé dans la marge inférieure de la feuille). Ils ont été répertoriés en 4 catégories, en se référant notamment à la classification de V. Courtillot et collaborateurs, (2003) : 1/ les points chauds « primaires », supposés correspondre à un panache puissant, profond, de longue durée, notés HA à HG; 2/ ceux qui pourraient être considérés comme primaires, notés Hh et Hi ; 3/ ceux qui sont moins caractéristiques, problématiques, ou contestés, notés H1 à H34 ; 4/ ceux qui seraient éteints depuis beaucoup plus de 1 Ma, mais qui auraient laissé des traces dans la morphologie sous-marine (eH1 et eH2).

PH. BOUYSSÉ

Prix : 10 € la feuille. Port en sus.

Pour commander :

Commission de la Carte Géologique du Monde (CCGM)

77, rue Claude-Bernard – 75005 Paris

Tél. 01 47 07 22 84 – Fax 01 43 36 95 18

ccgm@club-internet.fr

Web: www.ccgmm.org

#### **BLOC-NOTES**

« Noir c'est noir... » : le début de ce célèbre « tube » est une affirmation fautive ! En effet Pierre Soulages nous prouve le contraire de manière magistrale à l'occasion d'une exposition consacrée à ses œuvres au centre Pompidou. A l'occasion de son cinquantenaire, le BRGM a organisé le mardi 27 octobre une visite privée de cette exposition suivie d'un cocktail dînatoire. Les personnes invitées ont pu ainsi admirer les tableaux de l'artiste. Le chatoiement du noir, ou plutôt des noirs, sous des éclairages très étudiés, trouve des correspondances naturelles évidentes pour des géologues ; la photo des « terres noires » de la Haute-Provence qui illustre le carton d'invitation était là pour nous le rappeler.

Les visiteurs sont repartis sous le charme, munis, délicate attention du BRGM, d'un cadeau-souvenir. Merci aux organisateurs, et rendez-vous est pris pour le centenaire !

# Actualités

## EXCURSION DU GROUPE FRANÇAIS DU PALÉOZOÏQUE DANS LES MONTS SAINTE-CROIX, POLOGNE

La sortie annuelle du Groupe français du Paléozoïque s'est déroulée en Pologne du 29 juin au 3 juillet 2009. Cette excursion a été conduite par Mikołaj K. Zapalski, de l'Institut de paléobiologie de Varsovie. Le thème de ces 5 jours était la succession paléozoïque des monts Sainte-Croix, observable à travers de nombreux sites.

À Lysa Góra, le site présente de larges « champs » de blocs quartzitiques datés du Cambrien. Ces quartzites ont été façonnés durant la période glaciaire. Ce fut aussi l'occasion de visiter le Musée d'histoire naturelle local.

À Mójcza, les participants ont pu examiner un exemple ordovicien. Il correspond à une succession carbonatée et silico-clastique comprenant des niveaux condensés riches en faunes.

Dans le ravin de Prągowiec, ont été étudiés les mudstones siluriens très riches en graptolites et orthocones.

Le Dévonien a été observé au nord et au sud de la faille des monts Sainte-Croix où il présente des variations assez importantes. Le bord nord est caractérisé par des faciès mixtes (silico-clastiques et carbonatés). Ce type de sédimentation est bien représenté par les shales à brachiopodes de Grzegorzowice-Skały (Eifelien) et par les grès à spiriféridés de Bukowa Góra (Emsien supérieur/Eifelien inférieur). Au bord sud, la sédimentation est principalement carbonatée. Un aperçu de cette sédimentation a pu être observé lors de l'étude des sites de Kadzielnia, Kowala, Ostrówka et Śluchowice.

La carrière de Kadzielnia, un des sites dévoniens les plus réputés où affleurent le Frasnien et le Famennien, présente de nombreux stromatopores.

La coupe de Kowala expose une succession du Dévonien supérieur montrant un approfondissement progressif depuis la base du Frasnien, très récifale et riche en coraux tabulés jusqu'au Famennien supérieur caractérisé par des trilobites et des ammonoïdes.



Les participants devant la coupe d'Ostrówka (photo E. Pinte)

La section d'Ostrówka dans le village de Gałęzice montre également, par une séquence sédimentaire, un ensemble de phases de dépôt démontrant l'inondation de la plateforme carbonatée au Dévonien supérieur et Carbonifère inférieur. Quelques faciès permien sont également visibles.

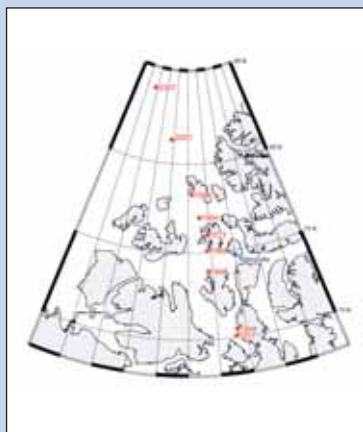
Enfin, l'affleurement de Śluchowice a permis d'observer de magnifiques plis à différentes échelles résultant de déformations de bancs frasnien au cours du Carbonifère.

Durant cette excursion, nous avons découvert aussi l'architecture et l'histoire polonaise, notamment par les visites de la cathédrale de Kielce, du château de Chęciny (13<sup>e</sup>-14<sup>e</sup> siècle) et du monastère de Święty Krzyż (11<sup>e</sup> siècle). Le groupe put également déguster quelques spécialités culinaires nationales (pierogi, barszcz, kotlet schabowy...).

Tous les participants ont grandement apprécié cette semaine tant par sa qualité scientifique, que par son organisation irréprochable et sa convivialité.

E. PINTE

## LA DÉRIVE DU PÔLE NORD MAGNÉTIQUE (SUITE)



Voyage du Pôle Nord magnétique de 1831 à 2007.  
d'après Newitt et al. (2009), modifié

Dans le numéro 82 de *Géochronique* (juin 2002), nous avons signalé les résultats spectaculaires de l'expédition polaire franco-canadienne *Poly-Arctique* partie à la recherche du pôle Nord magnétique. Les mesures effectuées en 2001 au cours de cette mission avaient en effet permis de mettre en évidence une accélération spectaculaire du déplacement du pôle vers le nord-ouest. La vitesse de déplacement, restée pendant la plus grande partie du XX<sup>e</sup> siècle de l'ordre de 10 km/an, atteignait alors 40 km/an environ.

L'expédition *Poly-Arctique* d'avril 2007 a permis de mesurer le chemin parcouru depuis 2001, malgré les difficultés logistiques provoquées par une accélération de la fonte de la banquise. Le réchauffement climatique interdira sans doute à l'avenir ce type d'expédition. Fort heureusement, les avancées scientifiques et technologiques permettent maintenant de suivre les déplacements du pôle Nord magnétique par satellite ; la position obtenue à partir de mesures sur le terrain en 2007 s'accorde en effet avec celle obtenue à partir des modèles du champ géomagnétique.

Ph. LAGNY

Source : R. Newitt, A. Chulliat et J.J. Orgeval (2009) – Location of the North magnetic Pole in April 2007. *Earth Planets Space*, vol. 61, p. 703-710.

## SEISM CARE

Le colloque SEISM CARE (SEISMic Mitigation in the CARibbean REGION) s'est tenu au Palais des congrès de Schoelcher, en Martinique, du 22 au 24 juin 2009.

Ce premier colloque SEISM CARE a été organisé par la DIREN Martinique, avec un financement sur les crédits du Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la Mer, avec la collaboration de la Préfecture, du Conseil général, de la Direction départementale de l'Équipement, du BRGM et de l'Observatoire volcanologique et sismologique de la Martinique.

Labélisé par le comité français de l'Unesco « Projet de l'année internationale de la planète Terre », SEISM CARE n'était pas un colloque scientifique mais technique qui partait d'un constat simple : les pays de la zone caraïbe sont tous soumis à un aléa sismique fort. La protection contre cet aléa amène nos voisins, une trentaine de nations, à développer des stratégies concrètes de prévention du risque. Ce colloque et les expositions qui l'accompagnaient avaient donc deux objectifs :

- connaître les actions de prévention sismique des pays voisins, évaluer leur application aux Antilles françaises et faire connaître les actions françaises ;
- amorcer des échanges techniques réguliers et des projets de coopération régionale.

Consacré donc au seul risque sismique, ce colloque était une première pour la Caraïbe. Parmi les 200 experts, « disasters managers » et responsables de la prévention sismique issus de 20 pays\* de la Caraïbe, près de 70 intervenants se sont exprimés en français, anglais ou espagnol, autour de 4 thèmes majeurs :

- l'information du grand public ;
- la connaissance de l'aléa ;
- le renforcement des bâtiments ;
- les stratégies de prévention générale et les retours d'expérience.

Destiné à un public averti (maires, officiels, responsables de la sécurité civile, experts en prévention du risque, professionnels du BTP, associations de prévention, ...), SEISM CARE a largement atteint ses objectifs, permettant enfin de connaître les actions des pays voisins et de tisser des liens utiles à des projets de coopération régionale. Ce colloque était une opportunité pour mutualiser les moyens et les outils dans le domaine de la prévention sismique.

Le grand public n'a pas été oublié. Le "village SEISM CARE" rassemblait 12 stands tenus par des organismes publics et des sociétés privées venus présenter leurs actions et produits en faveur de la prévention du risque sismique (construction, kits d'urgence, études et documentation, expositions...). La caravane de prévention du Conseil général avec son simulateur de séismes était également présente.

Enfin, pour compléter les exposés, un espace posters illustrant les études réalisées par les experts de la Caraïbe était accessible au grand public comme aux experts.

La participation au colloque a dépassé les prévisions ; elle illustre la prise de conscience des acteurs du risque sismique ainsi que le besoin de nos homologues de faire connaissance afin d'échanger leurs expériences réussies ou leurs échecs en matière de prévention sismique.

Cette rencontre internationale ayant été un succès, il est prévu par les participants plusieurs projets visant à mettre en commun les différents supports de sensibilisation imaginés dans les différents pays ; il est également envisagé d'élaborer un guide de bonnes pratiques en matière de construction dans l'arc caraïbe, en attendant une prochaine édition qui pourrait se tenir en 2011.

Dans le même souci de partage de l'information et de poursuite des échanges, et en attendant le recueil des actes en préparation, le site Internet [www.seismcare.com](http://www.seismcare.com) consacré au colloque présente désormais les podcasts\*\* des interventions et sera pérennisé.

Enfin, les médias locaux (journaux, radio et télévision) ont largement couvert le colloque par des reportages et des interviews, en particulier de nos collègues étrangers.

J.-C. AUDRU

\* *Antigua, Barbade, Colombie, Costa Rica, Cuba, Dominique, Guatemala, Haïti, Iles Vierges britanniques, Iles Caimans, Jamaïque, Mexique, Montserrat, Nicaragua, Panama, République Dominicaine, Salvador, Sainte-Lucie, Trinidad et Tobago et Vénézuëla*

\*\* *fichiers audio en accès libre sur la toile*



# Actualités

## LE CRÉTACÉ DU BASSIN LUSITANIEN (PORTUGAL) UNE EXCURSION COMMUNE DU GROUPE FRANÇAIS DU CRÉTACÉ ET DE L'ASSOCIATION DES GÉOLOGUES DU SUD-OUEST

Du 10 au 14 septembre 2009, Jacques Rey (Toulouse), aidé par Paulo Caetano (Lisbonne), Pedro Callapez et Jorge Dinis (Coimbre), a organisé et conduit une excursion commune GFC-AGSO sur le Crétacé du bassin lusitanien dans la région de Lisbonne (Portugal). Cette excursion a rassemblé 30 personnes sur de nombreuses coupes géologiques du littoral portugais.

Les 2 premiers jours, J. Rey et P. Caetano ont présenté les séquences principalement carbonatées du Crétacé inférieur des environs de Cascais, d'Ericeira et du Cap Espichel. Le troisième jour J. Dinis a conduit l'excursion sur le Crétacé inférieur fluvial de Galiota et P. Callapez sur le Crétacé supérieur de Nazaré. L'analyse séquentielle a permis la corrélation avec les grands cycles eustatiques du Crétacé et les structurations de l'Atlantique Nord.

Chaque affleurement fut l'occasion de riches échanges entre les participants, partageant la même passion de la reconstitution de quelques pages de l'histoire de notre Terre. Les aspects touristiques ne furent pas non plus oubliés et les repas furent l'occasion de découvrir les spécialités de la cuisine portugaise. Un temps particulièrement agréable est venu parfaire une organisation remarquable.

Encore merci à Jacques Rey et à ses amis portugais. La dalle aux traces de dinosaures du Cap Espichel, le pot de l'amitié sur la plage de Galiota ou les falaises de Nazaré resteront des moments forts dans l'esprit des participants.

D. GROSHENY (GFC) et F. BICHOT (AGSO)

<http://agso.brgm.fr>

<http://www.univ-brest.fr/geosciences/GFC>

## UNE NOUVELLE ÉTAPE VERS LA RECONNAISSANCE DU PATRIMOINE GÉOLOGIQUE DANS LA LOI

Pendant longtemps la loi a assimilé le patrimoine naturel au seul patrimoine biologique. La situation est en train de changer. Déjà en 2002, la loi « relative à la démocratie de proximité » incluait les richesses géologiques, minéralogiques et paléontologiques dans l'inventaire du patrimoine naturel. Aujourd'hui un nouveau pas vient d'être fait. En effet, l'amendement relatif au patrimoine géologique a été adopté par le Sénat le 8 octobre 2009 (dans l'article 47 de la "petite loi"). Dans le Code de l'environnement, le titre du livre IV « Faune et flore » devient « Patrimoine naturel ». De même, l'intitulé du titre 1<sup>er</sup> de ce livre est remplacé par « Protection du patrimoine naturel ». Dans l'intitulé de la 1<sup>ère</sup> section, le mot « biologique » est remplacé par « naturel ». Dans les articles qui suivent, les sites d'intérêt géologique sont explicitement mentionnés, ainsi que les dispositions particulières s'y rapportant. Le texte complet est disponible à l'adresse suivante [http://ameli.senat.fr/publication\\_pl/2008-2009/553.html](http://ameli.senat.fr/publication_pl/2008-2009/553.html).

Quelques extraits du projet de loi adopté par le sénat le 8 octobre 2009 :

L'article L. 411-1 du code de l'environnement a subi diverses modifications, en particulier :

« Lorsqu'un intérêt scientifique particulier ou que les nécessités de la préservation du patrimoine naturel justifient la conservation de sites d'intérêt géologique, d'habitats naturels, d'espèces animales non domestiques ou végétales non cultivées et de leurs habitats, sont interdits [...] la destruction, l'altération ou la dégradation des sites d'intérêt géologique, notamment les cavités souterraines naturelles ou artificielles, ainsi que le prélèvement, la destruction ou la dégradation de fossiles, minéraux et concrétions présents sur ces sites. » ;

IV. – L'article L. 411-2 du même code est ainsi modifié :

1° Les 1°, 2° et 3° sont ainsi rédigés : « 1° La liste limitative des habitats naturels, des espèces animales non domestiques ou végétales non cultivées, ainsi que des sites d'intérêt géologique, y compris des types de cavités souterraines, ainsi protégés ;

2° Le 7° est ainsi rédigé : « 7° Les mesures conservatoires propres à éviter l'altération, la dégradation ou la destruction des sites d'intérêt géologique mentionnés au 1° et la délivrance des autorisations exceptionnelles de prélèvement de fossiles, minéraux et concrétions à des fins scientifiques ou d'enseignement. » ;

V. – Le c du 1° de l'article L. 415-3 du même code est remplacé par un c et un d ainsi rédigés :

[...]

« d) De détruire, altérer ou dégrader des sites d'intérêt géologique, notamment les cavités souterraines naturelles ou artificielles, ainsi que de prélever, détruire ou dégrader des fossiles, minéraux et concrétions présents sur ces sites ».

Reste encore le passage à l'Assemblée nationale... Certes nous ne sommes pas au bout de la reconnaissance, mais l'évolution est encourageante. « Ce n'est qu'un début, continuons ... » entendions nous en 68 ...

P. DE WEVER



## L'AGSO EN PÉRIGORD POUR LA CLÔTURE DE L'ANNÉE DE LA PLANÈTE TERRE

« L'homme dans son environnement géologique » tel était le thème de la sortie des 17 et 18 octobre 2009 organisée par l'AGSO dans le cadre de la clôture de l'année de la Planète Terre. Jean Pierre Platel et François Poujardieu nous ont entraînés de carrières en cluzeaux, d'affleurements en cabanes. De l'histoire géologique du Crétacé et du Tertiaire nous sommes passés à l'histoire humaine des cathares et des vigneron. Jurassique supérieur, Campanien, Eocène ont fait bon ménage avec les 12, 13, 14 et 15<sup>e</sup> siècles. De l'affleurement d'hallowaysite (argile blanche fort prisée par l'industrie) à la porcelaine, le chemin était tout tracé. Les liens entre calcaires, meulières, grisons et dolmens, chapelles, églises n'était que le reflet du sens de l'observation des bâtisseurs du passé.

Enfin ne parlez pas de borie mais de cabane, tzabàno, chabana éventuellement de cajolles, biotas ou benitas à moins que vous ne préfériez caselles, gariotes, barracas ou orris pour désigner ces constructions en pierres sèches qui ont abrité des générations de gens de la terre lors de leurs travaux des champs.



Tout cela pour dire que cette sortie, loin de l'austérité de la géologie et de l'histoire pures et dures, a été menée de main de maître, alliant culture et anecdotes, sciences et humanité.

Merci François et Jean Pierre.

C. BACCHIANA

## BLOC-NOTES

Cinq nouvelles expositions sont à l'affiche, à la Cité des sciences et au Palais de la découverte sur des thèmes relevant des géosciences, et pourront être vues au moins jusqu'à la mi-2010.

– *Quatre cents ans après Galilée, le système solaire revisité* est une installation permanente. Les récentes découvertes sur le système solaire ont en effet remis en question nos certitudes et nos connaissances sur le sujet : Pluton destituée de son rang de neuvième planète après la découverte de corps plus massifs dans notre système, Huygens sur Titan, glace d'eau sur Mars, face cachée de Mercure révélée, enregistrement des pulsations du soleil en sont des exemples ;

– Dans un tout autre registre, le Palais de la Découverte présentera aussi « *La faim des dinosaures* » du 10 décembre 2009 au 2 mai 2010, consacrée à leurs habitudes alimentaires. L'accent est porté sur

le comportement alimentaire mal connu de l'*Oviraptor*, mais de nombreuses autres espèces sont aussi documentées et discutées.

– *Argiles, histoire d'avenir* est présentée au Palais de la découverte du 19 décembre 2009 au 29 août 2010. L'argile a accompagné l'évolution de l'humanité depuis son origine (statuettes paléolithiques) jusqu'à ses utilisations les plus modernes pour son habitat, ses aliments, l'écriture, l'art et la médecine. La recherche continue (lubrifiants pour les moteurs d'avions), mais force est de constater la pérennité et même le retour aux utilisations les plus traditionnelles.

– *Objectif terre : la révolution des satellites* est aussi une exposition permanente ouverte à la Cité des Sciences depuis juin dernier. Elle est consacrée à l'extraordinaire contribution qu'apportent les satellites dans la connaissance et la gestion de la planète. Elle sera également dynamique, car elle sera liée

en temps réel aux événements d'actualité.

– *Ma terre première ; pour construire demain* est une exposition temporaire du 6 octobre 2009 au 27 juin 2010, à la Cité des sciences. Elle entend dévoiler toutes les potentialités de la matière granulaire sous les angles géologique, physique, architectural et artistique. La terre crue est un matériau de construction traditionnel, mais aussi innovant, qui s'inscrit dans la thématique du développement durable. Composition de la terre, états physiques (empilement, ségrégation, arcs de force), rôle de l'eau et des forces capillaires, rôle de l'argile interstitielle sont tour à tour évoqués. Les différents types de construction en terre (adobe, bauge, pisé, torchis) sont illustrés par quelques constructions du patrimoine mondial.

Cette exposition ira ensuite à Strasbourg, Villeneuve d'Ascq, au Pont du Gard et à Lyon.

# Actualités

## 16<sup>th</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OSTRACODA (ISO 16) : BIOSTRATIGRAPHY AND APPLIED ECOLOGY

Le 16<sup>e</sup> International Symposium on Ostracoda (ISO 16), organisé à Brasilia sur le thème « Biostratigraphy and Applied Ecology » par le professeur Dermerval A do Carmo de l'université de Brasilia s'est tenu du 26 au 30 Juillet. Ce congrès était sponsorisé par l'IRGO (International Research Group on Ostracoda), PETROBRAS et la Brazilian Paleontological Society. Une centaine de spécialistes en provenance de 23 pays assistèrent à cette réunion : Allemagne, Argentine, Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Chine, Espagne, Etats-Unis, Espagne, Grande-Bretagne, Indes, Italie, Japon, Luxembourg, Pologne, Portugal, Russie, Slovaquie, Suisse, Thaïlande, Turquie

Les présentations orales et posters, au nombre de 101, dont 4 conférences, étaient réparties dans 8 sessions : Biology, Morphology and Morphogenesis (8) Biogeography and Paleobiogeography (18), Biostratigraphy (7), Freshwater Ecology and Environmental Reconstructions (17), Marine Ecology and Environmental Reconstructions (7), Paleolimnology and Paleoclimates (6), Paleoceanography and Paleoclimates (6), Systematics and Evolution (32).



Les 4 conférences invitées ont été présentées par K. Martens, Belgique (Zoogeography on non-marine ostracoda), R. Matzke-Karasz, Allemagne (Synchrotron holotomography in ostracod research – an assessment of prospects and limits), J.-P. Colin, France (Marine ostracodes at the K/T boundary : state of knowledge) et M.J. Salas, Argentine (Diversity patterns of Ordovician ostracods from Argentina).

Le prix de la meilleure prestation orale pour les étudiants (Sylvester-Bradley award) a été décerné à un de nos spécialistes francophones, Laurent Decrouy (université de Lausanne, Suisse) pour sa brillante présentation de « Controlling factors of ostracod valve geochemistry : insights from analyses of live species in Lake Geneva (Switzerland) ». Il faut néanmoins faire remarquer que bien que l'année 2009 soit l'Année de la France au Brésil, seuls 2 représentants de notre pays assistaient à cette manifestation internationale (un dont le voyage et le séjour étaient payés par le Brésil, l'autre un post-doc chômeur qui avait payé de ses propres deniers !).

Les présentations orales pourront être publiées, après acceptation, dans un numéro spécial de la revue *Hydrobiologia*.

En plus des sessions orales et des présentations de posters, les participants ont pu visiter la ville de Brasilia, capitale du Brésil, œuvre du grand architecte Oscar Niemeyer et de l'urbaniste Lucio Costa. La ville fêtera ses 50 ans en 2010. Un atelier intitulé « Procedures in micropaleontologic curatorship » a aussi été organisé par C.G. Miller du Natural History Museum de Londres.

En remplacement de Koen Martens dont le mandat expirait, Renate Matzke-Karasz a été élue nouvelle présidente de l'IRGO jusqu'au prochain congrès (ISO 17) qui aura lieu à Rome en 2013 et sera organisé par Elsa Gliozzi de l'université de Rome (Italie).

J.-P. COLIN

### BLOC-NOTES

Le CEA, qui assure déjà depuis 1981 une mission d'alerte aux forts séismes pour la France, va installer dans les mêmes locaux à Bruyères-le-Châtel (Essonne) un centre d'alerte aux tsunamis pour l'Atlantique nord-est et la Méditerranée occidentale. Le CEA, qui bénéficie dans ce domaine de l'expérience de son centre polynésien de prévention des tsunamis, aura pour partenaires le Service hydrographique et océanique de la Marine (SHOM) et le CNRS. Ce centre devra être en mesure de diffuser l'alerte au tsunami dans les 15 minutes suivant le séisme déclencheur. Il sera opérationnel en 2012.

Informations complémentaires sur <http://www.cea.fr/presse>

## JEAN-MICHEL QUENARDEL (1946-2009)

Il est des personnalités qui ne laissent jamais indifférents ; soit elles hérisent, soit on s'y attache par une longue et solide amitié. Jean-Michel Quenardel était de celles-là ; mais Jean-Michel n'est plus, il nous a quittés le 1<sup>er</sup> novembre, à 63 ans. La maladie a eu raison de la ténacité qu'il mettait à la combattre.



Après ses études à la Sorbonne et pendant son doctorat de 3<sup>e</sup> cycle de géologie structurale en Norvège soutenu en 1972, Jean-Michel est nommé assistant (en 1969) au laboratoire de Géologie structurale et appliquée dirigé par F. Ellenberger, à la faculté des sciences d'Orsay. Dans le cadre de sa thèse d'état sur les Calédonides de Laponie occidentale (Norvège du nord), soutenue en 1987, c'est lui qui coordonne et anime la RCP Norvège sous la responsabilité de F. Ellenberger et contribue à son renouvellement. Il avait réussi à y installer un esprit de groupe et une forte motivation par son travail scientifique et son charisme. C'est aussi l'occasion pour lui de commencer à encadrer des jeunes doctorants. Son travail, par une cartographie géologique minutieuse, met en évidence plusieurs nouvelles unités tectoniques calédoniennes allochtones et apporte de nouvelles données dans la connaissance pétrologique

et géochimique du Paléozoïque et des mylonites calédoniennes.

L'expérience acquise dans ce domaine lui permet de lancer une équipe sur l'étude du Paléozoïque du plateau d'Aigurande (nord-ouest du Massif central), rassemblant plusieurs doctorants et collègues. Ce projet se concrétise par de nombreuses publications et thèses ainsi que par la réalisation de 6 cartes géologiques à 1/50 000. Ces travaux, financés par de nombreux contrats (BRGM, CEA, société Dong Thrieu...), mettent notamment en évidence la tectonique tangentielle dans le nord-ouest du Massif central.

Conjointement à ses travaux de recherche, Jean-Michel a été un organisateur et un gestionnaire hors pair tant à l'échelle du laboratoire qu'à l'échelle universitaire. Il a été actif dans de nombreuses commissions parmi lesquelles le conseil scientifique et le conseil d'administration de l'université Paris-Sud, la section 36 du CNU dont il a été vice-président (1982 à 98). Il était aussi trésorier de l'association AGAP (géophysique) depuis 1993.

Il a été l'un des premiers à comprendre l'intérêt que pouvait avoir la création d'une filière professionnelle et s'est attaché, soutenu par Jean Bébien, à créer un DESS de Génie géologique à Orsay. Bien qu'ayant rencontré de nombreuses difficultés, la création de ce cursus a été et est encore un succès tant par le nombre d'étudiants qui viennent s'y inscrire que par son ouverture vers le monde du travail. Il était soucieux des débouchés professionnels pour ses étudiants et avait établi de nombreux contacts avec les entreprises. Son action au sein de l'UFG (président de 1990 à 1998) et de l'EFG (fédération des géologues européens) allait dans le même sens.

Dans le même souci d'aider à la formation professionnelle des étudiants, il s'est fortement impliqué dans la préparation aux concours de recrutement de

l'éducation nationale et au recyclage des enseignants du second degré. Il a lui-même été adjoint à la directrice de l'IUFM de Versailles et a fait partie du jury du CAPES de SVT.

En 1998, Jean-Michel Quenardel a été nommé professeur à l'université de Franche-Comté, à Besançon, juste reconnaissance de ses capacités d'organisateur, d'enseignant et de « moteur de recherche ». Il y dirigeait le master de géologie appliquée.

Le milieu associatif était pour lui très important. Très jeune, il a occupé les fonctions de secrétaire de la SGF avant d'y être conseiller. C'est à cette occasion qu'il a assuré la coordination scientifique et la gestion financière de « la Terre, notre Planète », ouvrage collectif édité par la SGF en 1980. Il avait reçu le prix Madeleine et Raymond Furon en 1994.

Avec quelques années d'avance, pendant sa présidence de l'UFG, il avait déjà proposé un rapprochement avec la SGF, sans trouver d'écho positif auprès de ses collègues.

Là où passait Jean-Michel, boute-train parfois provocateur, souvent contestataire, il marquait par son dynamisme et par un enthousiasme forcené qui entraînait même les plus réticents. Et derrière tout cela se cachaient une très grande sensibilité et une grande générosité qui se traduisaient par des gestes délicats et des attentions aussi profondes qu'inattendues. Tous ceux qui l'ont approché, collègues, étudiants, administratifs, ont su apprécier ses qualités de chercheur, d'enseignant et d'organisateur ainsi que ses grandes qualités humaines. Il a su communiquer son amour de la géologie, du terrain, sa joie de vivre, à de nombreuses générations d'étudiants qu'il a fortement marqués.

La communauté géologique, lésée par son départ prématuré, s'associe au chagrin de ses proches.

M. JULIEN et N. SANTARELLI

## Carnet

EMMANUEL GROSDIDIER (1934-2009)

Manu se destinait aux arts appliqués, au travail du verre et du vitrail. Ses responsabilités de jeune père de famille le conduisent en 1957 à accepter un poste de dessinateur à la Compagnie d'Exploration Pétrolière, alors installée à Chambourcy en région parisienne.

Sa rencontre avec Henri Jules Oertli lui ouvre l'univers des ostracodes. Ses premiers travaux portent sur le Jurassique inférieur des sondages du bassin de Paris, et les faunes du Crétacé inférieur de Champagne. En 1962, il soutient à Paris son mémoire de DES sur les ostracodes du Crétacé inférieur de la Champagne humide. Puis, dès le début des années 60, c'est lui qui défriche – souvent sur place – les séries lacustres d'âge crétacé inférieur de l'Antésalifère gabonais. En parallèle avec l'inventaire (rien n'est alors connu de ces faunes), il construit en quelques années une biozonation particulièrement robuste qui deviendra la référence régionale. Sceptique sur la notion de « marqueurs », Manu conçoit d'entrée ses biozones en termes d'évolution des associations de microfaunes, et en lien avec les environnements. A l'affût de la littérature, il ne manque pas de noter les convergences avec les rares publications des séries brésiliennes.

Dès 1966 paraît la première version (non publiée) de son Atlas des ostracodes antésalifères du Gabon et du Congo, en même temps qu'il s'at-



taque au Crétacé inférieur de la mer du Nord, puis au Crétacé supérieur du Moyen-Orient. Au début des années soixante-dix, c'est le Crétacé inférieur africain qui retient son attention. Comme toujours, il inventorie et construit simultanément des séries de référence toujours employées.

Pétrolier dans l'âme, Manu garde une approche industrielle et publie peu. Mais il est l'auteur de plus de 700 rapports dont il extrait régulièrement de quoi conserver ses contacts académiques. Il ne décrira formellement qu'une infime partie des faunes soigneusement inventoriées au cours de sa carrière. Il consacre une part de ses dernières années d'activité à organiser méthodiquement une inestimable collection des principales espèces

archivées au cours des études, plus de six mille spécimens parfaitement ordonnés pour ses successeurs.

Car c'est le souvenir que gardent de Manu ceux qui ont eu la chance de travailler avec lui : un homme ouvert aux autres, généreux et plein de sollicitude envers ses collègues juniors, cachant sous une apparence pragmatique une approche scientifique rigoureuse.

D'un humour constant, souvent délibérément grinçant et enclin à l'autodérision, toujours discret mais toujours là au bon moment, Manu a été l'âme et le mentor de notre petit groupe jusqu'à sa retraite en 1994.

Manu était très modeste et ne se montrait jamais dans les grandes « messes » (Colloques Internationaux), si bien que très peu de collègues ostracodologistes l'avaient rencontré. Par contre certains de ses travaux, en particulier ses monographies sur les ostracodes du Crétacé du Moyen Orient (Golfe Persique), le Crétacé inférieur et la partie moyenne du Crétacé du Gabon sont toujours des références très souvent utilisées et mentionnées par tous les spécialistes travaillant sur ces régions, et même de l'autre côté de l'Atlantique Sud, au Brésil.

Manu nous a quittés le 15 octobre 2009 après une courte hospitalisation. Un peu de ses cendres seront déposées à la cathédrale de Reims, au pied de l'Ange au Sourire.

J.-L. VOLAT ET J.-P. COLIN

HERVÉ PHILIP (1945-2009)

Hervé Philip nous a quittés le samedi 17 octobre 2009.

Au lendemain d'une magnifique journée d'automne passée sur le terrain avec les étudiants du Master Géorisques, Hervé Philip, professeur à l'Université Montpellier 2, est parti dans un sommeil dont il ne se réveillera pas.

Né le 10 février 1945 à Quissac dans l'Hérault, il fit ses études supérieures à l'Université des Sciences de Montpellier. En 1974, il soutint une

première thèse, sous la direction de J. Mercier à Orsay, sur la tectonique des grandes failles actives de la mer Egée. Nommé assistant au Laboratoire de Géologie Structurale de l'université Montpellier 2, il a, sous la direction de M. Mattauer, préparé une thèse d'état sur la tectonique active du pourtour méditerranéen qu'il soutint en 1983.

Tout au long de sa carrière, il participa à de nombreux programmes

internationaux dans des régions sismiques (Algérie, Arménie, Chili, Espagne, Grèce, Italie, Maroc, Mongolie, Pérou, Turquie) et il eut l'occasion de faire des observations de terrain sur de nombreux séismes (El Asnam, 1980 ; Spitak, 1988, Erzincan, 1992 ; Chili, 1995 ; Izmit, 1999).

Parmi tous ses travaux, on peut souligner ceux qui concernent le séisme d'El Asnam, devenu un cas d'école, où

pour la première fois dans le domaine méditerranéen sismologues et géologues collaboreront. Il proposa un modèle d'évolution de la chaîne du Caucase, si bien qu'il fut le géologue le mieux à même de comprendre le grand séisme de Spitak-Erevan. Il mit ensuite en place un programme de recherche sur 20 ans avec l'Arménie. Il fut un précurseur en France en paléosismologie, avec l'étude de tranchées à El Asnam et en Arménie, où il montra aussi l'intérêt de l'archéosismologie. Attiré par les grandes failles d'Asie, déjà étudiées en Chine, il eut le flair en 1990, de lancer avec J.-F. Ritz un autre chantier original et nouveau sur les grandes failles du Gobi-Altai en Mongolie.

Il collabora à la première carte de risques sismiques de la France métropolitaine réalisée par le B.R.G.M., puis à la synthèse publiée aux mémoires de la société géologique de France (Sismotectonique de la France métropolitaine, 1993).

Il est ainsi, progressivement devenu un expert reconnu de la néotectonique et des risques sismiques.

Enseignant discret, motivé et attentif, il a entraîné dans sa passion de l'étude des failles et des risques qu'elles induisent, de nombreux étudiants, français et étrangers qui ont suivi ses traces et porté ensuite sa parole et ses méthodes dans les entreprises privées et dans d'autres universités. Il a contribué avec J.-P. Petit à la création du Master Géorisques, dont il était responsable, un master qui attire de nombreuses vocations.

Ses ouvrages et publications très nombreux, en direction des spécialistes de sa discipline, la sismotectonique, lui ont permis de gagner une belle reconnaissance scientifique, enregistrée dans les « indicateurs » à la mode, mais surtout significative pour ceux qui avaient compris l'importance et la finesse de ses travaux. Tout son savoir et son expérience sont illustrés par un livre qu'il

cosigne avec J.-C. Bousquet et F. Masson, publié en 2007 aux éditions Dunod. Destiné aux étudiants de master et à tous ceux intéressés par les séismes et les risques sismiques, cet ouvrage original est le seul en langue française qui traite de tous les aspects aussi bien géologiques que sismologiques du phénomène sismique.

Toutes les personnes qui connaissaient Hervé Philip, ses élèves, ses amis, appréciaient en lui l'homme placide et discret ne recherchant pas les honneurs. On aimait aussi la force vigneronne robuste de ce passionné des failles, mais aussi des orchidées de la garrigue et, bien sûr, de la vigne familiale, qu'il cultivait avec amour à Baubiach, près de Quissac.

M. BRUNEL, J.-C. BOUSQUET,  
J.-F. RITZ, S. LALLEMAND

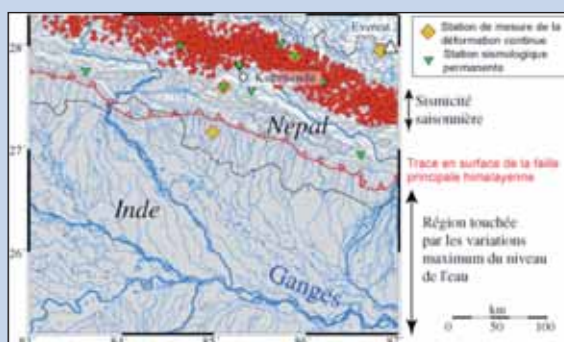


## ACTIVITÉ SÉISMIQUE SAISONNIÈRE AU FRONT DE L'HIMALAYA

Depuis longtemps déjà, des chercheurs népalais avaient observé une variation saisonnière de l'activité microsismique dans l'Himalaya, avec un pic en décembre et janvier. Une équipe franco-népalaise pilotée par le CEA (L. Bollinger) vient d'apporter les éléments permettant de confirmer ces observations. L'analyse de plus de 10 000 microsismes enregistrés de 1995 à 2001 a permis en effet de montrer que leur fréquence était de 40 % plus importante en décembre-janvier que pendant la période juillet-août.

Quelle interprétation en donner ? Sachant que la montée des eaux en bordure de l'Himalaya dans le bassin du Gange pendant la mousson peut dépasser 4 m, les chercheurs ont émis l'hypothèse que l'importante surcharge occasionnée par une telle accumulation d'eau pourrait faire ployer la plaque indienne, ce qui favoriserait l'apparition de microsismes en hiver. La source de ces petits séismes se situant en profondeur dans le plan de la faille himalayenne principale responsable des grands tremblements de terre, cette étude aidera-t-elle à découvrir les facteurs déclenchant les séismes les plus dévastateurs ?

Ph. LAGNY



Carte de la sismicité du bassin du Gange, d'après L. Bollinger, in Banque des Savoirs 2009, modifié.

Source : Banque des Savoirs, 31 août 2009,  
« Lorsque la Terre tremble au rythme des saisons »  
(<http://www.savoirs.essonne.fr>)

## Dossier

## L'après-mine

*L'après-mine est l'avenir de la mine*

*Si l'exploitation minière a en France l'ancienneté que l'on sait, l'après-mine est paradoxalement une activité très récente. C'est en effet seulement à la fin des années 90, après une série de mouvements de terrains inattendus qui ont détruit plusieurs dizaines d'habitations (Fig. 1) et traumatisé la Lorraine, que nous avons pris collectivement conscience de la nécessité de gérer durablement les conséquences techniques et environnementales de l'activité minière.*

*Auparavant, si les conséquences économiques et sociales de la fermeture des mines pouvaient mobiliser lourdement tout l'appareil d'État, on considérait en revanche, mais à tort, qu'il n'y avait pas matière à une gestion des risques miniers au delà des procédures d'arrêt des travaux par les anciens exploitants telles que prévues par le Code minier.*

*Cette prise de conscience brutale a conduit l'État à mettre en place rapidement tout un ensemble d'outils pour assurer cette gestion des risques de l'après-mine : des outils juridiques d'abord, avec notamment l'organisation du transfert de la responsabilité de la gestion des risques mais aussi de la réparation des dommages vers l'État à la fin des concessions ou à la disparition des anciens exploitants. Et puis, des outils opérationnels, avec la reconstitution des compétences minières dans les DRIRE, avec le regroupement et le développement d'une*

*capacité d'expertise au sein de GEODERIS, avec le développement de la recherche, avec enfin la constitution, par transfert des compétences et des hommes de Charbonnages de France, d'une compétence opérationnelle de gestion de l'après-mine au sein du BRGM.*

*Ce dispositif actuellement piloté par la direction générale de la prévention des risques (DGPR) du grand Ministère de l'énergie, de l'électricité, du développement durable et de la mer est aujourd'hui en état de marche. Le présent numéro permettra au lecteur d'en découvrir tous les aspects.*

**J. GOELLNER**

*Chef du service des risques technologiques  
Direction générale de la prévention des risques*



Affaissement minier à Auboué (Meurthe-et-Moselle, 1997) : maison lézardée (photo Brgm)

# 1 • Le rôle de l'État dans l'après-mine

L'exploitation des mines a connu un développement considérable en France, notamment lors des deux siècles passés.

L'État a délivré 4384 titres miniers, dont 3144 concessions permettant l'exploitation de substances minières au sens du code minier, dont des hydrocarbures. On verra plus loin que cet inventaire « officiel » doit être complété par d'autres travaux, beaucoup plus anciens mais dont les conséquences sont encore largement actuelles.

La disparition progressive des exploitations a laissé en place un nombre important de cavités souterraines qui présentent des risques potentiels pour les populations vivant en surface. À titre d'exemple, l'exploitation du bassin ferrifère lorrain a conduit à creuser environ 40 000 km de galeries, souvent très proches de la surface. Dans le bassin houiller de Saint-Étienne, dont des documents montrent que les premières traces d'exploitation remontent au 13<sup>e</sup> siècle, on estime à environ 2 000 le nombre d'ouvrages débouchant au jour (puits ou galeries).

Les affaissements miniers survenus ces dernières années dans la région Lorraine, en Meurthe-et-Moselle (Auboué en 1996 et Moutiers en 1997), en Moselle (Moyeuvre-Grande en 1998 et Roncourt en 1999), longtemps après l'arrêt définitif des travaux d'extraction, ont conduit les pouvoirs publics à mettre en place un dispositif législatif et réglementaire adapté.

La loi n° 99-245 du 30 mars 1999 relative à la responsabilité en matière de dommages consécutifs à l'exploitation minière et à la prévention des risques miniers après la fin de l'exploitation et ses décrets d'application ont introduit des modifications importantes dans le code minier. Notamment les articles 75-2 et 75-3 sur l'indemnisation et les articles 94 et 95 sur les plans de prévention des risques miniers (PPRM), permettent d'assurer la prise en charge des risques et de leurs conséquences par l'exploitant, ou s'il a disparu ou est défaillant, par l'État.

Ainsi, ont été mis en place de nouveaux moyens juridiques indispensables à une bonne gestion de l'après-mine.

Par ailleurs, une politique globale a été définie, basée sur le triptyque « anticiper, prévenir, réparer » et les moyens y afférant, notamment budgétaires, ont été mis en place.

## Anticiper

Anticiper, c'est principalement réaliser une cartographie des risques présentés par les anciennes concessions minières sur le territoire métropolitain et ne pas attendre que les incidents surviennent.

Pour ce faire, l'État a créé en 2001 un outil, GEODERIS, ayant le statut de groupement d'intérêt public (GIP) et dont les membres sont l'INERIS et le BRGM. GEODERIS est l'expert de l'administration en matière d'évaluation des risques miniers. Il assure une assistance aux services locaux de l'État pour l'analyse des risques et la détermination des mesures de mise en sécurité proposées.

Le GIP comprend aujourd'hui une trentaine d'agents.

GEODERIS a par ailleurs reçu mission d'établir une évaluation et une cartographie des risques miniers au travers d'un recensement exhaustif de tous les travaux, même très anciens, qui s'est achevé en 2009 ; 4516 sites ont été ainsi identifiés et leur évaluation est en cours. Elle va permettre de caractériser les aléas (faibles, moyens ou forts) et ainsi porter à la connaissance des communes concernées les zones où un aléa de type « mouvement de terrain » est possible, entraînant des conséquences sur l'urbanisme présent ou futur.

Enfin, GEODERIS est associé au regroupement des informations obtenues sur une base de données des sites miniers qui sera à terme mise à la disposition du public.

## Prévenir

La prévention des risques miniers commence par un examen attentif et rigoureux des dispositions de mise en

sécurité proposées dans les dossiers d'arrêt des travaux que les exploitants établissent après la fin de l'exploitation et avant d'obtenir de l'État l'acceptation de la renonciation à leur concession.

Elle continue par la mise en sécurité des sites par l'État lorsque l'exploitant a disparu ou que la concession a fait l'objet d'une renonciation acceptée. Pour faciliter son intervention, l'État a demandé au BRGM de créer en son sein un département spécialisé : le Département prévention et sécurité minière (DPSM) pour assurer les fonctions de maître d'ouvrage délégué pour la commande et le suivi des travaux de mise en sécurité. Ce département compte aujourd'hui une centaine de personnes.

Son activité est rapidement montée en puissance avec la fin anticipée de l'exploitation du charbon en Lorraine en 2004 et la mise en liquidation de Charbonnages de France (CDF) au 31 décembre 2007. L'État venant alors aux droits et obligations de l'établissement a confié au DPSM les opérations d'arrêt définitif des travaux miniers de CDF et la surveillance des installations de sécurité attachées aux différents sites.

La mise en liquidation des Mines de potasse d'Alsace (MDPA) au 31 décembre 2008 conduit à une opération similaire.

Mais l'anticipation peut aussi consister à disposer des installations destinées à prévenir ou anticiper l'apparition de désordres d'origine minière. Par exemple, des installations de surveillance microsismique peuvent être mises en place ; elles permettent de donner l'alerte dès qu'un mouvement de terrain détecté au fond fait craindre une conséquence en surface, comme un effondrement brutal.

Enfin, dans le cas de risques graves pour les personnes et lorsque les travaux de mise en sécurité sont impossibles ou trop coûteux, l'État procède à l'expropriation des biens exposés. Cela a été le cas en 2006 à Moutiers (Meurthe-et-Moselle) où 83 habitations et 6 établissements industriels ont été expropriés pour un coût total de 22 M€.

## Dossier

Dans ce cas, l'État a pris aussi à sa charge les dépenses non comprises dans l'indemnité d'expropriation, comme le coût des crédits-relai ou de relogement provisoire.

La prévention est complétée par la mise en place, à la demande des préfets, des plans de prévention des risques miniers (PPRM) qui détaillent principalement les restrictions à apporter aux plans d'urbanisme pour tenir compte des risques miniers. Il n'est pas dans l'objectif de l'État de multiplier les PPRM et on devrait en compter à terme une cinquantaine sur le territoire métropolitain.

### Réparer

Si l'exploitant a disparu ou est défaillant, l'État assure la réparation des dommages résultant de l'ancienne exploitation des mines. Ces interventions directes, qui peuvent consister à réparer des dommages aux immeubles ou aux infrastructures, sont peu fréquentes car depuis la loi n° 2003-706 du 30 juillet 2003, qui a modifié le code des assurances, le Fonds de garantie des assurances obligatoires de dommages (FGAOD) indemnise directement les victimes des dommages résultant d'une activité minière.

L'ensemble de ces mesures a permis de répondre de manière très efficace aux priorités qui s'imposaient et auxquelles l'État devait une réponse rapide.

S. MIRAUCOURT  
Ministère de l'écologie, de l'énergie,  
du développement durable  
et de la mer

## 2 • Les principaux problèmes à résoudre

La fermeture d'une mine et, à plus forte raison, d'un bassin minier laisse souvent un héritage chargé de problèmes pour les hommes, les biens, les activités, les ressources et l'environnement. Ces problèmes sont d'autant plus difficiles à gérer que leur prise de conscience par les collectivités et par les populations est tardive. Pendant toute la durée de vie de la mine ou des mines du bassin, le plein emploi est assuré aux populations qui vivent de la mine et tout se passe comme si un consensus tacite s'établissait entre tous les acteurs pour que l'exploitation ne soit pas interrompue. Les effondrements de terrain, s'il s'en produit pendant cette période « faste », sont vécus comme des catastrophes mais toute la population réclame la reprise rapide de l'extraction ; les problèmes de pollution environnementale, sans être occultés, sont « moins ressentis ».

Tout change après la fermeture. Les risques sont accrus parce que, d'abord, le départ de l'exploitant signifie (sauf obligation contraire) l'arrêt de certaines dispositions et de la maintenance de certaines installations qui assuraient la sécurité (inspections quotidiennes de sécurité, entretien du soutènement au fond, arrêt ou démantèlement des installations d'aéragage, de pompage des eaux, etc.). En outre, la crise socio-économique qui touche les emplois directs et indirects autour de la mine ou dans le bassin induit un changement radical des mentalités dans la

population ; celle-ci découvre enfin un « passif environnemental » plus ou moins étendu avec lequel, ou malgré lequel, il faut désormais vivre et, parfois, essayer de survivre, dans un contexte de chômage.

C'est pourquoi la vie d'une mine ou d'un bassin minier ne s'arrête pas au jour de sa fermeture. Certaines servitudes doivent continuer à être assurées, parfois pour toujours. Leurs incidences doivent être pensées et intégrées très précocement dans la conduite de l'exploitation du bassin.

### Les aléas d'instabilité des terrains

La cause principale d'instabilité des terrains dans les zones minières réside dans l'existence des travaux souterrains, c'est-à-dire des puits, des galeries et surtout des chambres d'exploitation car celles-ci représentent des volumes vides en général importants, surtout si elles ont été insuffisamment remblayées ou foudroyées durant l'exploitation. Par exemple, en Lorraine, les effondre-



Fig. 2-1 : Fontis récent au-dessus de vieilles chambres d'exploitation restées vides, dans une mine de fer de Lorraine : la nature ayant horreur du vide, les riverains s'empressent souvent de l'utiliser comme décharge sauvage (photo E. Equilbey, Brgm)



ments récents qui ont provoqué (heureusement sans faire de victimes) l'abandon de deux villages, sont en relation avec la lente remontée des eaux de nappes qui ont fragilisé les piliers de minerai de fer soutenant les chambres d'exploitation restées vides, entraînant une désagrégation de la roche. La présence de travaux à ciel ouvert peut aussi être une cause d'instabilité (glissement de terrain, coulée de boue...). Enfin, des désordres peuvent aussi affecter des dépôts de matériaux divers au voisinage de la mine ou de l'usine de traitement : verses ou haldes, terrils, stériles de laverie, épandage de scories, déchets, etc.

Dans l'emprise des travaux souterrains, les phénomènes redoutés vont du simple tassement à l'affaissement généralisé, en passant par des affaissements ou par des soulèvements d'ampleurs variées, effondrements localisés (fontis, c'est-à-dire lente « remontée » d'une cavité ou « cloche » jusqu'à percer en surface, Fig. 2-1), effondrements généralisés, glissements superficiels, coulées de boues, chutes de pierres, écroulements.

Un phénomène, hélas assez fréquent pour avoir attiré une attention particulière des ingénieurs en charge de l'après-mine, est aussi le débouillage de puits. Si aujourd'hui on accorde des moyens importants à l'obturation des puits de mine (remplissage complet par des blocs d'enrochement de 400 mm de calibre minimum, coulage d'un bou-

chon autoportant en béton ferrillé...) il n'en était pas de même jusque dans les années 1970. L'exploitant, pressé d'obtenir son quitus, car privé de toute recette financière depuis l'arrêt de l'extraction, commençait par déverser dans le(s) puits tous les matériaux de démolition qui n'intéressaient pas les ferrailleurs et les résidus de laverie. Souvent, ces matériaux s'éparpillaient sournoisement, quelques mois plus tard, dans les galeries du fond si on n'avait pas pensé à les murer, ou bien ils se coinçaient subrepticement à mi-profondeur du puits, au niveau du plancher d'une recette par exemple, sans qu'on s'en aperçoive. On n'attendait pas toujours que ces remblais aient fini de se tasser pour couler, par-dessus le puits, une dalle en béton, parfois à peine ferrillée, de 20 cm d'épaisseur ... et la vie reprenait. L'oubli fait son œuvre en trois ou quatre décennies. Que de lotissements, de maisons modernes et de cours d'école se sont ainsi installés (Fig. 2-2 à 2-4) sur la tête d'un ancien puits ! Or, un jour peut-être, les mardiers pourris sur lesquels les gravats s'étaient accumulés finissent pas céder sous l'action du poids et des eaux d'infiltration et c'est la catastrophe : le puits « débouille ». Même la dalle de béton peut être aspirée dans l'entonnoir d'effondrement, si elle n'a pas été déplacée auparavant, par inadvertance, par la lame d'un bulldozer qui ouvrirait une nouvelle rue...

J. FÉRAUD



Fig. 2-2 : Home, sweet home (dalle carrée sur un puits de 70 m datant de 1880 : qui s'en souvient ? (photo J. Féraud Brgm)



Fig. 2-3 : L'ombre, le frais... il ne manque que l'apéritif : dalle circulaire sur un puits de 196 m de 1880 (photo P. Vadala, Brgm)



Fig. 2-4 : On en parlait ? Il va justement être servi au bar. cf l'expression : se rincer la dalle (circulaire ici ; on sait heureusement que le puits a été bien remblayé) (photo J. Féraud, Brgm)

Tous les objets miniers présents en surface (puits, galeries, dépôts...) sont désignés par le mineur et par la loi comme des « ouvrages » car ils servent au « travail » (opera en latin) de la mine, à sa production ; à l'arrêt de celle-ci, ils ne pourront pas servir à un autre usage, d'autant que le propriétaire du sol n'aura (sauf concession de l'État) pas le droit de reprendre la production. En général, on les détruira ou, sinon, on les « neutralisera ». Par contre, les vestiaires, les ateliers d'entretien, les bureaux, les logements des mineurs... sont considérés par la loi comme des immeubles en quelque sorte « civils » qui, après l'arrêt de la

mine, peuvent être réaménagés pour un usage différent. Pour cette raison, ils ne seront en général pas détruits mais cédés au propriétaire du sol. Dans de rares cas, il arrive que celui-ci demande à conserver aussi l'entrée d'un ouvrage, par exemple une galerie qui lui servait depuis longtemps de prise d'eau ou de cave à fromages. Si l'enquête de l'administration est favorable, il y a transfert de responsabilité de cet ouvrage en direction du propriétaire du sol, qui en endosse toute la responsabilité vis-à-vis des tiers qui viendraient à s'introduire dans sa propriété. C'est notamment le cas des galeries conservées comme musée minier.

# Dossier

## Les aléas hydrologiques

Il s'agit en général de désordres hydrologiques et d'inondation ou de montée générale des eaux. On pourrait en principe parler plus généralement de « remontée » de la nappe, dans la mesure où les pompes des mines, ayant été démontées, ont cessé de la rabattre. Mais l'expérience montre que souvent le phénomène se complique. Les eaux se fraient un itinéraire tout à fait nouveau, en raison des volumes importants de vides créés par l'exploitation, des remblais ou des massifs rocheux déplacés, des zones de failles disparues, des terrains de découverte perméables ou imperméables enlevés, etc. L'origine des phénomènes réside dans les interactions multiples possibles du cycle de l'eau avec les travaux miniers (que ce soient des travaux en mine souterraine ou à ciel ouvert). Les phénomènes redoutés vont de modifications mineures du régime des émergences, jusqu'à l'inondation brutale, en passant par l'apparition de zones détrempées ou de marécages, l'inondation des sous-sols et des points bas, la modification du régime des cours d'eau.

En France, le cas de la remontée des eaux dans le bassin ferrifère lorrain a été parmi les plus exemplaires de ces phénomènes (Fig. 2.5). Le gisement est constitué d'un faisceau de couches parallèles faiblement inclinées vers l'ouest, et dont l'emprise couvre une surface presque continue de 100 x 30 km. La nappe du Dogger, sus-jacente, a été presque

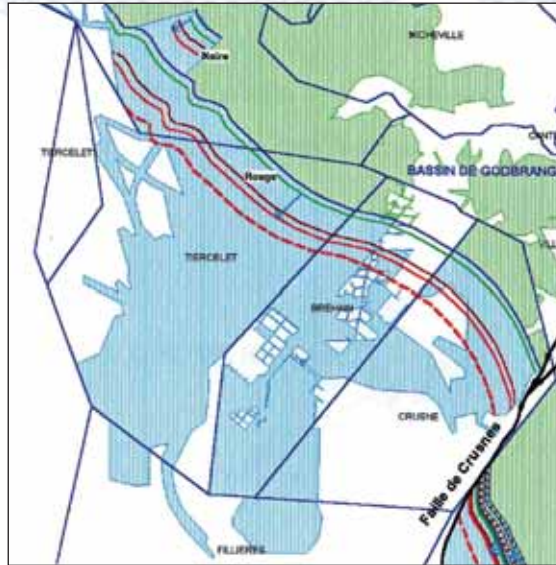


Fig. 2-5 : Extrait de la cartographie piézométrique réalisée pour la surveillance de la remontée de la nappe dans le bassin ferrifère lorrain : en bleu, niveau actuel de la nappe et, en vert, réservoir de gaz de mine (Brgm).

complètement captée, conduisant à une exhaure considérable de l'ordre de 200 à 300 millions de mètres cubes par an. L'exploitation s'est développée progressivement de l'est vers l'ouest, en direction de la vallée de la Meuse, entraînant le déplacement concomitant des points de rejet de l'exhaure. Les conséquences ont été l'augmentation du débit des affluents amont de la Moselle et le transfert du débit du bassin versant de la Moselle vers celui de la Meuse. L'ennoyage des mines, après l'arrêt de l'extraction, a provoqué une augmentation de la teneur en sulfates et un déplacement des exutoires très en aval des points de résurgence antérieurs. L'amont des cours d'eau concernés n'étant plus alimenté par les eaux d'exhaure, ces rivières ont atteint des niveaux d'étiage critiques.

L'alimentation en eau d'agglomérations autrefois uniquement tributaires de l'eau d'exhaure, comme Thionville, a été remise en question. La dégradation de la qualité des eaux a, en outre, nécessité une réorganisation de l'approvisionnement en eau potable dans les communes touchées qui ont mis en œuvre des techniques de traitement. La remontée des eaux dans les vieux travaux a provoqué la recharge des nappes sus-jacentes, en particulier celle du Dogger. Là où celle-ci est phréatique, il en a résulté des inondations de caves, comme près de Moyeuve où la nappe du Dogger est drainée par l'Orne.

Aujourd'hui, l'ensemble de ces phénomènes est peu ou prou maîtrisé en Lorraine.

J. FÉRAUD

## Les Shadocks pompaient toujours...

Dans certains cas, après l'arrêt de la mine ou du bassin, il s'avère nécessaire de maintenir les pompes en activité. On l'a vu dans les mines de charbon de Lorraine pour permettre la poursuite de l'exploitation des mines de la Sarre de l'autre côté de la frontière. On l'a vu dans le Gard, près de Saint-Jean-de-Maruejols, quand la compagnie SMAC Acieroids a décidé d'arrêter son exploitation de calcaires asphaltiques de la mine d'Avejan (concessions de Foncouverte et Mas Tauelle). Elle avait déposé en préfecture son dossier d'arrêt définitif des travaux et espérait recevoir son quitus lorsque l'administration l'a obligée à maintenir ses pompes en action (à ses frais) pour permettre la poursuite de l'exploitation par la Société Française des Asphaltes dans la concession de calcaires asphaltiques de

Rébesou, contiguë de la sienne. Ce pompage ne relève pas de la police de l'eau mais de la police des mines. L'évent du puits Alexandre servira d'exutoire quand il sera stoppé.

En complément, la compagnie doit également assurer la surveillance de la qualité des eaux exhaurées (métaux lourds et hydrocarbures) et la surveillance de la remontée des gaz. Ce ne sont pas des installations de sécurité dans la mesure où ces mesures cesseront en principe (pompage) ou seront temporaires (dégazage) après l'arrêt définitif des travaux de Rébesou. En revanche, même après cet arrêt, il faudra maintenir une surveillance des affaissements (lever topographique périodique au moyen de 21 bornes à maintenir en état et à mesurer tous les 5 ans pendant 10 ans).

## Les émissions de gaz

Pour le grand public, le gaz le plus connu et le plus redoutable que l'on puisse rencontrer dans les mines souterraines est le grisou. Il s'agit de méthane ( $\text{CH}_4$ ) qui ne se trouve en principe que dans des mines de lignite, de charbon, de schistes bitumineux... Une tonne de charbon peut (lorsque la mine est grisouteuse) produire en moyenne  $20 \text{ m}^3$  de grisou. Toutefois, on peut en trouver aussi dans des souterrains où l'on a déversé des produits organiques liquides ou pâteux (boues de station d'épuration, boues d'usines...). On pourrait exclure, en théorie, sa présence dans toute mine métallique, s'il n'y avait des précédents : par exemple, les ingénieurs des mines de la compagnie Peñarroya ont signalé du grisou dans les galeries creusées dans le Trias gréseux et conglomératique de la mine de Largentière (Ardèche), minéralisé en galène et blende. Ce gaz y était sans aucun doute lié à la présence des terrains houillers (non exploités) sous-jacents (comm. orale Gérard Verraes). On en a relevé aussi, vers 1880, dans la mine de plomb et zinc de Pontpéan (Ille-et-Vilaine), peut-être lié à des couches riches en matières organiques dans les sédiments d'un petit bassin tertiaire dont une des failles bordières suit en profondeur le tracé du filon exploité.

Les accidents qui surviennent épisodiquement dans tel ou tel bassin houiller en activité nous rappellent que, malgré tous les progrès apportés dans les équipements de détection des gaz et dans les méthodes d'extraction et d'aéragement des mines, le danger principal lié au grisou est l'explosion. Les spécialistes ont mesuré sa limite inférieure d'explosivité à environ 3 % de teneur en  $\text{CH}_4$ . Outre son explosivité, il est asphyxiant, la dose létale étant une teneur de 6 %. Un danger moins bien connu du public est son risque de diffusion dans les fissures du sol, pouvant ainsi provoquer des explosions dans les caves des maisons situées à proximité d'une exploitation, comme on l'a noté pour des carrières souterraines dans la Somme. Pour ces raisons, il est interdit de fumer à proximité du débouché au jour d'un puits de mine

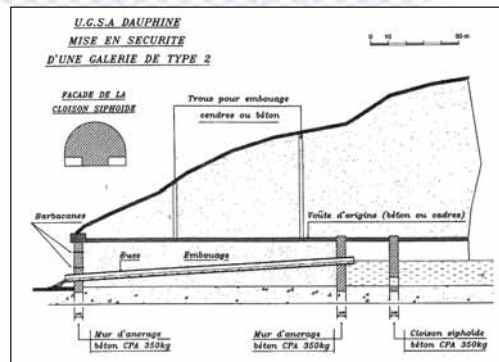


Fig. 2-6 : Coupe d'un bouchon posé sur l'entrée d'une galerie de mine de charbon muni de cloisons siphonnantes avec dispositif d'embouage (extrait du DADT d'une concession des HBCM)

de charbon. Lors de la remontée des eaux dans les bassins houillers dont l'exploitation souterraine est arrêtée, le méthane remonte lentement vers la surface. L'exploitant assure la surveillance de ce dégazage en installant sur les entrées des ouvrages miniers (galeries, puits) des bouchons de conception adaptée. Il s'agit des galeries dites siphonnantes, munies à leur sortie d'un caisson d'embouage pour canaliser la sortie du gaz et pour la surveillance de sa totale évacuation (Fig. 2-6). Lorsque la mine est entièrement noyée, le risque en surface disparaît.

Les autres gaz de mine dangereux sont le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , le monoxyde de carbone  $\text{CO}$ , les composés soufrés (le sulfure d'hydrogène  $\text{H}_2\text{S}$  et le dioxyde de soufre  $\text{SO}_2$ ), et le radon. Ce dernier n'est pas uniquement lié aux mines d'uranium mais c'est un produit naturel très répandu, par exemple dans les mines de fer où même dans des souterrains d'origine non minière, dès qu'il y a des failles ou des fissures qui facilitent sa remontée depuis les profondeurs de la croûte terrestre, même en terrains sédimentaires (cf *Géochronique* n°78, juin 2001). Il est incolore et inodore, il n'explose pas mais il irradie la peau et les poumons et peut provoquer à la longue des cancers.

Dans les mines en activité, il n'y a, en général et hormis le grisou, pas de risques liés aux gaz si elles sont bien ventilées. C'est la fonction de l'aéragement, les ingénieurs s'ingéniant (c'est leur rôle) à provoquer de salubres courants d'air en utilisant toute la tuyauterie offerte par le réseau de puits et de galeries de la mine et (au besoin) de puissants ventilateurs. Le cas est tout à fait différent dans les mines abandonnées.

Ces gaz sont à la fois dangereux en soi et dans la mesure où, en s'accumulant dans le fond des souterrains, ils y provoquent par contrecoup un appauvrissement en oxygène. On a parfois la chance de détecter à temps cet appauvrissement qui provoque un essoufflement, une augmentation du rythme cardiaque et de la fatigue. Cet air appauvri peut résulter de la surconsommation de l'oxygène par les moteurs des engins quand la mine était en activité ; dans ce cas, il s'y ajoute, comme autres contaminants, l'oxyde de carbone  $\text{CO}$  qui résulte notamment des tirs d'explosifs, des engins diesel et de l'oxydation lente ou de l'échauffement du charbon ; s'y ajoutent parfois les oxydes d'azote  $\text{NO}$  et  $\text{NO}_2$  engendrés par la détonation de certains explosifs et les moteurs diesel. Dans les gisements comportant des lentilles de sulfures de fer (pyrite, pyrrhotite, marcasite) ou d'autres métaux, souvent associées à de la matière organique (schistes noirs), intervient un autre phénomène ; les sulfures en s'oxydant peuvent dégager du  $\text{SO}_2$  et de l' $\text{H}_2\text{S}$  tout en surconsommant l'oxygène présent ; ainsi s'accumulent des poches de ce que les mineurs appellent « le mauvais air ». Dans les mines abandonnées, les spéléologues ont parfois la chance de les repérer à temps grâce à leur odeur et à la chaleur que dégage l'oxydation des sulfures.

Le gaz carbonique peut avoir une origine anthropique (respiration humaine ou décomposition de matière organiques, de vieux étais de galerie pourris, de lisier de porc déversé dans un puits de mine etc.) et une origine géologique (remontant par des fissures, comme le radon). Il provoque une euphorie, voire même du fou-rire et une augmentation du rythme cardiaque.

Gaz	Seuil d'alarme	Teneur létale
Oxygène O <sub>2</sub>	Moins de 19 %	Moins de 6 %
Grisou CH <sub>4</sub>	1 %	Explose entre 5 et 14 %
Monoxyde de carbone CO	0,005 % ou 50 ppm	0,05 %
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	1 %	10 %
Hydrogène sulfuré H <sub>2</sub> S	0,0005 % ou 5 ppm	0,1 %
Monoxyde d'azote NOX	0,0025 % ou 25 ppm	0,01 % ou 100 ppm
Dioxyde d'azote NO <sub>2</sub>	0,0003 % ou 3 ppm	0,002 % ou 20 ppm
Dioxyde de soufre SO <sub>2</sub>	0,0002 % ou 2 ppm	0,0005 % ou 5 ppm

Principaux gaz de mine : seuils d'alarme des appareils de contrôle de gaz fixés par le RGIE (règlement général des industries extractives, 1990) et doses mortelles (certaines dépendant aussi de la durée d'exposition)

De longue date, les ingénieurs des mines ont mis au point des appareils de détection dont le premier fut le canari dans sa cage ! On a pu aussi recommander d'utiliser une allumette enflammée (qui s'éteint dès qu'on la descend au niveau d'une nappe riche en gaz carbonique) mais ce n'est pas à faire dans les mines de charbon où, au contraire, le froissement d'un vêtement en tissu synthétique ou le choc de deux outils métalliques peut provoquer l'étincelle mortelle ! Il y eut ensuite la lampe Davy, la lampe de sûreté, et actuellement les poires Draeger, les détecteurs MSA, les détecteurs électroniques, et des procédures règlementaires très strictes pour le personnel, assorties de sanctions.

En surface, dans le cas des mines arrêtées, il n'y a guère de danger si ce n'est, surtout pour les mines de combustibles minéraux, le dégazage naturel en surface au fur et à mesure de la remontée des nappes (Fig. 2-7), qu'il faut surveiller (notamment grisou et radon). Dans le cas des mines d'uranium ou d'autres substances radioac-

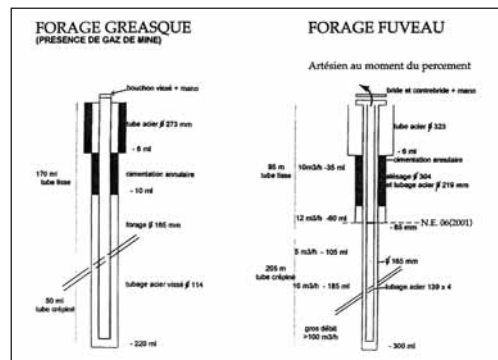


Fig. 2-7 : Dispositif d'évacuation des gaz en tête d'un forage de dégazage de mine de charbon (extrait du DADT d'une concession des HBCM)

tives, il faut continuer en permanence, même après l'arrêt, à utiliser le réseau des appareils de surveillance (installations dites de sécurité) que l'exploitant avait mis, en principe, en place pour la mesure périodique de la qualité de l'air et du niveau de radiations.

Les dangers sont tout autres, à l'échelle individuelle, pour ceux qui pénètrent dans les vieilles galeries, que ce soit pour motif professionnel ou pour la recherche des minéraux. Outre les risques d'instabilité et de noyade, les ventilateurs ne sont plus là pour renouveler l'air et des gaz toxiques ont pu s'accumuler.

Il faut également prendre des précautions lors de tous travaux de terrassement ou de génie civil dans d'anciennes haldes ou terrils de charbon, lignite et autres substances organiques, ainsi que de mines d'uranium. Ils peuvent, en effet, libérer des gaz, voire provoquer des combustions spontanées, parfois difficiles à juguler, comme on l'a vu avec l'incendie récent (Fig. 2-8) de l'ancien terril de Rochebelle, à Alès (Gard).

J. FÉRAUD



Fig. 2-8 : Terril de Rochebelle (Alès, Gard) (photo Michel Cossard)

## Les rayonnements

Les rayonnements ionisants émis, en permanence, par les radioéléments descendants de l'uranium 238, de l'uranium 235 et du thorium 232 dans les minerais radioactifs et dans leurs résidus de traitement sont un autre grand problème de l'après-mine. Ce problème se pose sur les déblais (haldes) de certaines anciennes mines d'uranium, sur les digues à stériles des anciennes usines de traitement de minerais d'uranium et sur les sites de stockage correspondants où peuvent subsister des résidus de transformation à basse teneur et notamment des fines. Les spécialistes distinguent les résidus de traitement *statique* qui se présentent, en général, en tas de plusieurs milliers de tonnes de déblais contenant des teneurs de quelques dizaines à quelques centaines de ppm d'uranium, et les résidus de traitement *dynamique* formés de sables argileux chargés de substances chimiques. Aux effets de ces tas de résidus qui sont des sources primaires de rayonnements, s'ajoute l'effet des eaux qui ont ruisselé dans la mine et sur les déblais, qui ont percolé dans les tas ou qui ont été rejetées par l'usine de traitement et constituent autant de sources secondaires de rayonnements. Elles contaminent le sol où elles s'infiltrèrent et se retrouvent dans les végétaux, pouvant ainsi contaminer les troupeaux. Le caractère insidieux des rayonnements, invisibles, prend toute sa gravité, notamment, lorsque les particules fines sont emportées au loin, par le vent, au-delà des grillages de sécurité, ou lors du réemploi imprudent de déblais de mine pour l'empierrement de chemins ou pour des terrassements.

Pour cette raison, en France, les anciennes mines d'uranium et les anciennes usines de traitement du minerai sont ceinturées de plusieurs rangées de clôtures et d'une signalisation de danger qui font partie des installations de sécurité. Leur maintenance demeure assurée bien après l'abandon de l'activité et le retrait des titres miniers. Sur les sites d'uranium ayant eu une production significative, l'exploitant a posé, en outre, des installations automatisées pour continuer la mesure de la qualité de l'air et de la radioactivité résiduelle bien après l'arrêt définitif des travaux. Ces stations de dosimétrie sont en général implantées à côté des villages ou des zones de population les plus

denses du secteur entourant le site minier. Par exemple, sur le site COGEMA de Lodève fonctionnent ainsi, en permanence, cinq stations de contrôle pour la qualité de l'air.

Le cas du radon a déjà été partiellement traité dans le dossier de *Géochronique* n°78 de juin 2001 et les rayonnements liés à l'uranium seront également traités dans le prochain numéro (dossier uranium) auxquels nous renvoyons donc le lecteur.

J. FÉRAUD

## Les pollutions minières et le cas du drainage minier acide

Les exploitations minières fournissent une part importante des matières premières et de l'énergie consommées dans le monde. Mais l'impact des mines sur l'environnement est, parfois, à la mesure des travaux titanesques entrepris pour produire ces richesses. *Géochronique* n'en a jusqu'ici traité que des aspects partiels : suivi des pollutions minières par télédétection (n°81, 2002, p. 28-31), bactéries et drainage minier acide (n°86, 2003 p. 27-31), orpaillage et mercure (n°93, 2005 p. 38), pollution par le plomb (n°102, p. 32-37).

### Les différentes pollutions imputables aux activités minières

Que les exploitations minières soient en activité, fermées ou abandonnées, elles peuvent, parfois, gravement perturber tous les milieux naturels. En effet, comme de nombreux sites industriels, les sites miniers stockent des carburants, des huiles et divers produits chimiques. Ils emploient aussi de puissantes installations électriques dont les plus anciennes peuvent comprendre des transformateurs isolés par du pyralène, l'une des appellations commerciales des fameux polychlorobiphényles (PCB). Ces produits deviennent des polluants pour l'air, le sol et l'eau en cas de déversement chronique ou d'accident. Mais les activités minières peuvent aussi être à l'origine de pollutions spécifiques associées à la nature même des matériaux extraits et, le cas échéant, à l'ampleur des travaux entrepris pour les valoriser.

Chaque année, l'industrie extractive minière, à ciel ouvert ou souterraine,

excave des milliards de mètres cubes de matériaux. Selon leur nature, ces derniers contiennent du soufre, du fluor, des métaux (fer, aluminium, cuivre, plomb, nickel, tungstène, bismuth, mercure...), des métalloïdes (arsenic, antimoine), des éléments radioactifs (uranium, radon) ou des poussières (amiante) potentiellement dangereux pour l'environnement et pour l'Homme.

Le traitement des minerais, notamment la pyrometallurgie, surtout au moyen d'équipements anciens, émet d'importantes quantités de gaz. Il s'agit de gaz à effet de serre ou générateurs de pluies acides (dioxyde de carbone, oxyde de soufre, oxyde d'azote, méthane). Ce traitement produit aussi des dépôts de métaux sur le sol de l'usine, sur les lieux de stockage des scories et hors-site, dans les sols exposés au panache des cheminées. L'extraction physico-chimique des substances recherchées au sein des minerais met en jeu d'importantes quantités de réactifs : cyanure, mercure, produits de flottation, solvants et acides. Malgré les efforts entrepris par les exploitants pour optimiser leur utilisation et leur recyclage, des traces de ces produits chimiques et de leurs dérivés se retrouvent dans les rejets et les déchets miniers.

L'épuisement des gisements riches conduit les mineurs à exploiter des minerais de plus en plus pauvres, et donc à rejeter proportionnellement de plus en plus de déchets miniers. Les quantités produites et stockées peuvent atteindre plusieurs millions de tonnes. Au Canada par exemple, on compte en moyenne 99 tonnes de déchets miniers rejetés pour 1 tonne de cuivre produite. L'industrie minière canadienne génère ainsi, à elle seule, 650 millions de tonnes de déchets miniers par an. Aux États-Unis, au début des années 2000, on estimait que plus de 1 100 km de cours d'eau de la région des Appalaches étaient affectés par des déchets miniers. Ces masses de déchets constituent en elles-mêmes une pollution. De plus, bien qu'elles soient dépourvues d'intérêt pour l'exploitant, elles n'en contiennent pas moins les nombreux polluants potentiels précités. Soumis aux intempéries, les imposants stocks de déchets miniers sont à l'origine d'envol de poussières et de formation de lixivats contenant des réactifs de traitement, des matières en suspension, des métaux, des métalloïdes, parfois des éléments radioactifs ou de l'amiante.

### La législation

Les exploitations minières ont été éloignées des préoccupations environnementales pendant longtemps. En effet, aucune législation, autre que très générale, n'imposait de précautions particulières dans la façon d'exploiter et de gérer les sites miniers. De plus, les produits issus des mines sont longtemps apparus comme des matériaux naturels inoffensifs pour l'environnement et pour l'homme. Ainsi, avant 1985, la plupart des pays d'Europe ne prenaient pas en compte les conséquences environnementales de la fermeture d'une mine. Et dans la CEE, les rejets miniers solides n'ont pas eu le statut de déchet avant 1991.

Les travaux de l'Union Européenne sur la gestion des déchets ont abouti à la directive 2006/21/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la Directive 2004/35/CE. Cette directive « prévoit des mesures, des procédures et des orientations destinées à prévenir ou à réduire autant que possible les effets néfastes sur l'environnement, en particulier sur l'eau, l'air, le sol, la faune et la flore et les paysages, ainsi que les risques pour la santé humaine résultant de la gestion des déchets des industries extractives ». Elle prescrit également les modalités de garanties financières nécessaires à la remise en état des terrains touchés par l'installation de gestion des déchets. Elle prévoit la réalisation, par les opérateurs, d'un plan de gestion des déchets incluant un état initial du terrain qui fera référence lors de la remise en état, à la fermeture de l'installation.

Les États membres devront veiller à la constitution d'un inventaire des installations de gestion des déchets, ayant des incidences graves sur l'environnement ou risquant de constituer une menace sanitaire ou environnementale sérieuse.

Cette directive est en cours de transcription en droit français.

Concernant les sites industriels et notamment les installations classées (IC), l'approche française en matière de gestion des sites et sols pollués a été révisée en février 2007. Elle souligne la nécessité des actions de prévention des pollutions. Pour les cas de sites (potentiellement) pollués, elle privilégie une gestion des risques suivant l'usage en respectant les règles de cadrage suivantes :

- Rechercher et traiter les sources de pollutions,
- Se baser sur la gestion sanitaire en place pour l'ensemble de la population française pour apprécier les risques ;
- Gérer en prenant en compte le bilan environnemental global ;
- Justifier les choix techniques retenus sur des critères explicites, argumentés et transparents.

Une réflexion sur la typologie des situations rencontrées en pratique a permis de distinguer deux grands types de situation de gestion à mettre en œuvre :

1. La démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM) : comparable à l'étude d'une photographie de l'état des milieux et des usages, il s'agit de s'assurer que l'état des milieux est compatible avec des usages présents déjà fixés.

2. Le plan de gestion qui intervient lorsque la situation permet d'agir aussi bien sur l'état du site (par des aménagements ou des mesures de dépollution) que sur les usages qui peuvent être choisis ou adaptés.

Selon le cas, ces deux démarches peuvent être mises en œuvre indépendamment l'une de l'autre, simultanément ou successivement.

Pour plus d'information concernant l'approche Nationale de gestion des sites et sols pollués, consulter le portail National « Sites-Pollués » :

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

Le problème environnemental posé par le Drainage Minier Acide (DMA) a été reconnu depuis 60 ans et fait l'objet de recherches intensives depuis les années 1960. Le DMA est devenu le problème d'environnement minier numéro 1 dans de nombreux pays. Les textes réglementaires qui font très concrètement allusion aux conséquences environnementales des eaux acides minières et à leur gestion sont essentiellement :

- la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'Eau ;
- le Code minier ;
- le décret n° 95-696 du 9 mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines ;
- la loi n° 99-245 du 30 mars 1999 relative à la responsabilité en matière de dommages consécutifs à l'exploitation minière et à la prévention des risques miniers après la fin de l'exploitation (reprise par le Code minier art. 93 et 95) ;
- le décret n° 2000-547 du 16 juin 2000 relatif à l'application des articles 94 et 95 du Code minier.

### Un phénomène naturel amplifié par les activités humaines

Les cas de pollution rapidement passés en revue ci-dessus sont préoccupants et aggravés dans le contexte des mines fermées ou abandonnées. Toutefois, le cas du Drainage Minier Acide (DMA) est souvent le plus alarmant. Il survient en présence de sulfures métalliques, l'une des familles de minéraux les plus répandues dans le monde. Ses conséquences sont désastreuses pour les exploitations comme pour l'environnement. Enfin, éradiquer définitivement un phénomène de cette nature et de cette ampleur est la plupart du temps impossible.

Les minéralogistes répertorient plus de 2000 composés inorganiques soufrés naturels. Les plus connus des sulfures métalliques sont la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), l'arsénopyrite ( $\text{FeAsS}$ ), la chalcopryrite ( $\text{CuFeS}_2$ ) et la galène ( $\text{PbS}$ ). La pyrite est le sulfure métallique le plus répandu et présente une forte teneur en soufre (Fig. 2-9). Ce minéral a longtemps constitué la matière première pour la fabrication d'acide sulfurique mais son exploitation a cessé depuis 40 ans.

Lorsque ces sulfures métalliques sont placés en présence d'eau et d'oxygène, ils s'oxydent. De l'acide sulfurique est généré et les métaux présents se solubilisent.

Ce phénomène naturel a été identifié au sein des gisements de métaux sulfurés soumis aux variations des conditions d'oxydo-réduction, sous l'influence d'une part, du battement de la nappe en sous-sol, et d'autre part des conditions météoriques et de l'érosion en surface. Il donne lieu à la migration des métaux à travers les formations géologiques encaissantes, et peut aboutir à la naissance de gisements secondaires. Lorsque la roche d'origine est très riche en sulfures, cette altération peut conduire à l'apparition en surface d'un « chapeau de fer » aussi appelé « gossan ». Dans ces formations, les minéraux primaires ayant totalement disparu, seuls subsistent des oxydes de fer, de couleur jaune et rouille caractéristique. Pour les prospecteurs miniers, les « chapeaux de fer » sont révélateurs d'une zone à explorer pour son

Minerai	Composition	Teneur en soufre (%)
Pyrite	$\text{FeS}_2$	53,4
Orpiment	$\text{As}_2\text{S}_8$	39,0
Chalcopryrite	$\text{CuFeS}_2$	35,0
Sphalérite	$\text{ZnS}$	33,0
Réalgar	$\text{AsS}$	29,9
Stannite	$\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$	29,8
Dimorphite	$\text{As}_4\text{S}_3$	24,3
Arsénopyrite	$\text{FeAsS}$	19,7
Cobaltite	$\text{CoAsS}$	19,3
Cinabre	$\text{HgS}$	13,8
Galène	$\text{PbS}$	13,4

Fig. 2-9 : Principaux minéraux sulfurés et leur teneur en soufre.

potentiel minier. Ces sites ont permis l'exploitation de métaux précieux ou semi-précieux et de métalloïdes : argent, platinoïdes, cobalt, nickel, cuivre, plomb, zinc, arsenic. Certains d'entre eux constituent les plus importants gisements d'or exploités au monde.

On conçoit aisément que les réactions d'oxydation des sulfures métalliques s'amplifient à la faveur des travaux des exploitations minières : excavation, percement de galeries, abaissement du niveau de la nappe et broyage du minerai. Le phénomène impacte les mines souterraines ou à ciel ouvert mais aussi les matériaux exposés à l'air libre (minerai, rejets

de traitement de minerai, stériles, déblais). Cette pollution est aggravée par son aptitude à s'auto-entretenir et à se propager sur le site minier. La production massive d'acide peut générer des écoulements continus chargés de métaux (Fig. 2-10) qui se déversent depuis les sites d'origine vers le réseau hydrographique le plus proche, et/ou atteignent l'aquifère. Ces écoulements sont appelés « Drainage Minier Acide » (DMA). (Voir encadré vocabulaire)

Les minerais sulfurés peuvent être le résultat de processus biologiques (réduction des sulfates) et hydrothermaux intervenus au fil des temps géologiques. Les accumulations de minéraux



Fig. 2-10 : Ancienne mine de plomb-zinc : drainage minier acide à la sortie d'une galerie, pH 2 à 3 (photographie J. Féraud, Brgm)

# Dossier

sulfurés formées sur les fonds océaniques au cours de l'activité volcanique sous-marine à différentes époques de la formation de la Terre sont parmi les plus répandues dans le monde. D'autres types de minéralisations sulfurées telles que les porphyres cuprifères ou les gîtes épithermaux, forment de gros gisements de métaux de base ou de métaux précieux, apparus à l'occasion de phénomènes hydrothermaux postérieurs à la formation des roches encaissantes. C'est pourquoi, de nombreuses exploitations implantées sur ces formations sont connues pour générer un DMA.

Le DMA est aussi connu pour apparaître dans les exploitations non métalliques présentant des disséminations sulfurées. Ainsi, il touche certains dépôts de matière organique exploités pour le charbon et les carrières de matériaux magmatiques ou métamorphiques tels que cornéennes, grès, amphibolite, dolérite, ardoise, traversées ou « imprégnées » par des venues de minéralisations sulfurées. Dans ce dernier cas il prend le nom de Drainage Carrier Acide (ou Acid Rock Drainage – ARD – aux États-Unis).

Dans les cas les plus sévères de DMA, on assiste à une production intense d'acide et à la formation de plusieurs tonnes de sels métalliques toxiques dissous par jour. La pollution des milieux aquatiques et des



Fig. 2-11 : Lagune de résidus de flottation et d'eaux acides (environ 120 millions de mètres cubes sur 300 ha) dans la vallée de la rivière Sesi (mine de Rosia Poieni, Roumanie) (photographie F. Cottard, Brgm)

aquifères par les effluents acides et métalliques de DMA constitue donc, dans le monde entier, l'un des problèmes environnementaux majeurs de l'industrie extractive (Fig. 2-11). Mais les situations les plus complexes sont rencontrées sur les sites des mines fermées ou abandonnées. En effet, que le DMA soit déclaré depuis plusieurs décennies, ou, au contraire, qu'il survienne quelques années après l'arrêt des travaux, à la faveur d'un battement de la nappe dans les galeries de la mine par exemple, il est souvent trop tard pour tenter de l'atténuer. L'indisponibilité de moyens financiers, techniques et humains sur place exclut la mise en œuvre rapide d'un traitement, lequel représente un fardeau financier pour une durée indéterminée. De plus, les mines les plus anciennes ne sont

pourvues d'aucune provision financière. Enfin, les données techniques des ouvrages et l'historique des sites miniers, qui pourraient apporter une aide à l'intervention, sont souvent égarés.

Les trois pays occidentaux les plus concernés par le drainage minier acide sont les États-Unis, le Canada et l'Australie. Aux États-Unis, 20 000 à 50 000 sites générateurs de DMA ont pollué 20 000 km de cours d'eau et 72 000 ha de lacs et de réserves d'eau douce. On estime que la restauration de ces sites pollués coûterait 35 à 70 milliards de dollars US (1996). Au Canada cette somme est estimée entre 2 et 5 milliards de dollars US. En 1996, le traitement des eaux impactées par les DMA aux États-Unis représentait 400 millions de dollars par an.

## VOCABULAIRE

L'expression « Drainage Minier Acide » est une traduction littérale de l'expression anglaise « Acid Mine Drainage » (AMD) qui désigne les eaux acides formées à l'intérieur d'une mine souterraine et qui s'en échappent par les galeries. Par extension, il englobe généralement toutes les eaux acides d'origine minière provenant de l'oxydation spontanée des minéraux sulfurés :

- les eaux produites au fond des mines à ciel ouvert.
- les eaux de percolation sur les matériaux miniers stockés à l'extérieur de la mine.

L'expression DMA désigne à la fois le mécanisme d'acidification et l'eau qu'il produit.

On rencontre aussi l'expression anglaise « Acid Rock Drainage » ou ARD. Elle désigne généralement les écoulements acides d'origine naturelle qui proviennent des roches en cours d'oxydation, par opposition aux

minerais exploités. Cependant, dans l'Ouest du Canada, l'expression ARD est couramment employée pour décrire aussi le phénomène d'origine anthropique. C'est pourquoi une troisième expression, « Acid Rock Generation » est parfois proposée pour décrire le phénomène naturel seul. Aux États-Unis, AMD a longtemps fait référence aux mines de charbon tandis qu'ARD était employé pour désigner les écoulements acides produits par les mines métalliques. Mais le terme AMD tend à devenir générique. En Europe, AMD correspond à un phénomène minier et ARD à un phénomène naturel ou survenant en carrière de pierres.

Une autre distinction est possible entre les termes AMD et ARD. Ainsi on peut réserver le terme ARD aux écoulements acides dans les tas de solides (minerais, stériles, concentrés, rejets de laverie), et le terme AMD aux écoulements provenant des galeries minières.



## Un incendie en milieu aqueux

Avant de provoquer un DMA, les minéraux sulfurés se trouvent depuis leur formation au cœur des gisements, dans des conditions d'altération lente, ou des conditions réductrices qui les préservent de toute réaction. Les importants travaux miniers placent brutalement d'énormes quantités de ces matériaux en présence d'eau et d'oxygène donc, dans des conditions d'instabilité chimique. Si la roche encaissante n'oppose pas un pouvoir tampon important, une réaction en chaîne, à la fois biologique et chimique, s'enclenche.

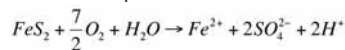
En effet, l'apparition des DMA est favorisée par la présence de micro-organismes qui tirent l'énergie nécessaire à leur croissance des réactions d'oxydo-réduction métalliques. Ces bactéries agissent comme de véritables catalyseurs des réactions chimiques qui se déroulent à la surface des minéraux et en solution.

Les espèces les plus souvent décrites sont *Acidithiobacillus thiooxidans* et *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Ces bactéries se développent préférentiellement entre 25 et 35°C. *A. thiooxidans* est la plus tolérante à l'acide (pH de croissance compris entre 0,5 et 4). Toutefois, des travaux récents, dont certains conduits au BRGM, ont identifié le rôle prépondérant d'autres espèces : *Leptospirillum sp.*, *Metallogenium sp.*, *Ferroplasma acidarmanus*, *Acidithiobacillus caldus*. Certaines bactéries comme *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* sont thermophiles et capables d'oxyder le soufre et le fer dans des solutions acides à une température comprise entre 40 et 60°C.

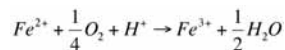
Les groupes de bactéries trouvées sur les sites sont des populations mixtes qui vivent en symbiose. Chaque espèce participe à l'acidification du milieu et, selon son affinité pour un pH défini, se développe plus particulièrement. Elle crée alors un milieu favorable à une autre espèce encore plus acidophile. Ces bactéries extrêmement résistantes ont également de grandes capacités d'adaptation à de nouvelles conditions. Certains de ces microorganismes, dont l'activité est mise à contribution lors de la valorisation de minerais

pauvres par biolixiviation, ont déjà été décrits dans les pages d'un précédent numéro de *Géochronique* (n°86, Juin 2003, pp.24-32) consacré aux bactéries.

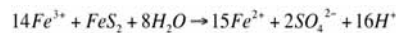
Les principales réactions chimiques qui donnent lieu à un DMA sont l'oxydation du fer et du soufre du minéral sulfuré le plus courant, la pyrite. Cette réaction se déroule en présence ou en l'absence de bactéries selon l'équation 1 :



Mais la réaction déterminante est l'oxydation du fer ferreux en fer ferrique qui est particulièrement catalysée en présence de bactéries (équation 2) :



L'importance de cette réaction (équation 2) réside dans le fait qu'elle produit du fer ferrique qui va être capable à son tour de réagir en chaîne sur la pyrite selon l'équation 3.



La réaction de l'équation 3 permet au phénomène de production de DMA de s'auto-entretenir comme le décrit le schéma du DMA (Fig. 2-12). Cette combustion de la pyrite devient alors un véritable incendie en milieu aqueux. De même que, dans l'air, le feu produit de la chaleur qui déclenche l'embrasement d'autres matériaux, l'oxydation des sulfures dans l'eau produit du fer ferrique et des bactéries qui induisent l'oxydation d'autres sulfures.

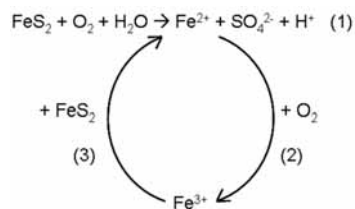
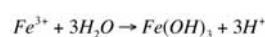
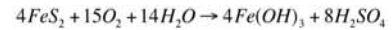


Fig. 2-12 : Schéma du phénomène de réaction de régénération du fer(II) déterminant dans la propagation du DMA.

La production de fer ferrique entraîne un autre phénomène aggravant : l'acidification par l'hydrolyse due aux ions  $\text{Fe}^{3+}$  selon la réaction suivante (équation 4) :

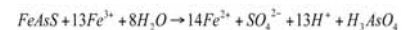


La réaction bilan qui décrit la totalité du phénomène est fournie par l'équation 5 :



L'équation 5 montre que l'oxydation de la pyrite libère une quantité considérable d'acide par rapport à la quantité de sulfure mise en jeu. Quand on sait les bactéries mentionnées ci-dessus capables de catalyser cette réaction bilan et de multiplier par 100 000 la vitesse d'oxydation, on mesure l'ampleur du phénomène.

Bien entendu, les autres minéraux sulfurés éventuellement présents, par exemple blende (Zn), galène (Pb), chalcopryrite (Cu/Fe), pyrrhotite (Fe), arsénopyrite (As/Fe), subissent des réactions similaires qui solubilisent leurs constituants métalliques ou métalloïdes. Ainsi, l'arsénopyrite est oxydée selon des voies similaires à celles de la pyrite en présence ou non de bactéries selon la réaction de l'équation 6. Bien sûr, elle subit également l'attaque oxydante de l'ion ferrique qui propage le phénomène de DMA.



## Un impact sur le milieu naturel à plusieurs dizaines de kilomètres de la mine pendant plusieurs siècles

Les écoulements acides, dont le débit peut atteindre 10 m<sup>3</sup> par seconde, se manifestent pendant quelques années ou pendant plusieurs siècles, généralement jusqu'à épuisement de la source de sulfure (Fig. 2-13). Dans de nombreux pays, les effets des eaux acides ont été décelés plusieurs dizaines de kilomètres en aval de certains sites miniers (Canada, Roumanie, Grèce). En Australie, la mine du Mont Lyell (Tasmanie) a produit du cuivre de 1893 à 1994. Consécutif à cette exploitation, un DMA transportant 2 tonnes de cuivre dissous par jour a éliminé toute vie dans la rivière du bassin versant, sur 40 km. En Espagne, certains effluents acides aux conséquences comparables, répertoriés dans la célèbre région du Rio Tinto, semblent imputables à des exploitations romaines et phéniciennes antiques.

## Dossier



Fig. 2-13 : DMA dans le Rio Margajita, République Dominicaine (photo F. Cottard, Brgm).

Les caractéristiques des eaux acides produites sur les sites miniers varient selon la nature des minéraux sulfurés présents. Les principaux métaux rencontrés dans les mines de charbon sont le fer, l'aluminium et le manganèse. Les mines métalliques contiennent une plus grande variété de métaux et métalloïdes : fer, plomb, zinc, cuivre, arsenic, antimoine et parfois du cobalt, du nickel, du strontium ou de l'uranium. L'élément lithium ainsi que le mercure sont rares et les autres métaux lourds encore moins fréquents. En présence de roches alcalines, l'acidité décroît, l'effluent s'enrichit en calcium, magnésium, sodium et potassium et s'appauvrit en métaux. En milieu calcaire par exemple, la remontée du pH provoque rapidement la précipitation de certains métaux sous forme d'hydroxydes. Le type d'exploitation, la topographie du site, la pluviométrie, l'altitude et l'alternance des saisons jouent aussi un rôle important sur l'acidité, la composition, et le débit des effluents. La fig. 2-14 présente un exemple de composition d'un effluent issu d'une mine de plomb-zinc.

Le record du DMA le plus intense est probablement détenu par la mine d'Iron Mountain en Californie (Etats-Unis). Toutes les conditions favorables à l'acidification y ont été réunies : présence de grandes quantités de pyrite ; création de multiples galeries et de chambres d'où le minerai a été extrait depuis 1860 ; effondrement de certaines chambres d'extraction ; aération et infiltration d'eau ; importante population bactérienne acidophile oxydante ; climat sec et chaud favorisant l'évaporation. L'acidité y est extrême puisque le pH des eaux de la mine n'est parfois plus mesurable sur l'échelle pH

Paramètre	Valeur	Unité
pH	2,2	-
Conductivité	48 000	μohms
Sulfate	63 000	mg.L <sup>-1</sup>
Fer total	16 250	mg.L <sup>-1</sup>
Zinc	14 560	mg.L <sup>-1</sup>
Manganèse	2 625	mg.L <sup>-1</sup>
Magnésium	1 500	mg.L <sup>-1</sup>
Aluminium	347	mg.L <sup>-1</sup>
Calcium	31,6	mg.L <sup>-1</sup>
Cadmium	22,5	mg.L <sup>-1</sup>
Cuivre	13,4	mg.L <sup>-1</sup>
Nickel	4,8	mg.L <sup>-1</sup>
Plomb	0,8	mg.L <sup>-1</sup>
Potassium	0,7	mg.L <sup>-1</sup>
Sodium	0,5	mg.L <sup>-1</sup>
Chrome	0,3	mg.L <sup>-1</sup>

Fig. 2-14 : Caractéristiques d'un DMA dans une mine de plomb et de zinc.

allant de 0 à 14. Les auteurs qui décrivent le site annoncent des valeurs négatives atteignant -3,6 tandis que la concentration totale en métaux parvient à 200 grammes par litre pour 760 grammes par litre de sulfate.

Les matériaux entreposés sur les sites miniers (stock de minerai, haldes, stériles ou fines de laverie accumulées en lagunes dans le lit des rivières) donnent souvent lieu à des eaux acides plus concentrées en métaux que les eaux issues de la mine elle-même. En effet, ces matériaux, quelquefois très concentrés en sulfures, exposés aux conditions atmosphériques, subissent une forte lixiviation car ils présentent une grande surface de contact avec l'air et l'eau.

Sur un site minier, la dégradation de la qualité de l'eau accentue la corrosion des équipements miniers ce qui par ailleurs amplifie la pollution. En dehors du site, le DMA a un impact sur la faune et la flore des cours d'eau récepteurs et sur les usages de l'eau en aval des opérations minières (alimentation en eau potable, base de loisir, pêche, irrigation). Dans les cours d'eau à l'aval

des sites miniers, on assiste à des dissolutions, précipitations et hydrolyses successives des sels dissous qui sont une source secondaire d'acidité (Fig. 2-15). Les précipités d'oxydes secondaires et d'oxyhydroxy-sulfates (jarosite, schwertmannite, copiapite, coquimbite, goethite,...), formés en période sèche dans le lit des rivières, constituent des dépôts métallifères. Au cours d'une période pluvieuse ou à l'occasion d'une inondation, ces minéraux sont susceptibles de se dissoudre et de libérer à nouveau des polluants métalliques et des sulfates.



Fig. 2-15 : Précipités minéraux (jarosite etc.) formés dans le lit d'un ruisseau impacté par un DMA (Afrique du Sud) (photographie A. Bourguignon, Brgm).

La figure 2-16 récapitule l'ensemble des réactions évoquées.

Les effets directs de l'acidité de l'eau sur les poissons incluent des perturbations des taux de croissance et de la reproduction, des dommages chroniques aux organes et aux tissus et une mortalité importante. En effet, l'acidité augmente la perméabilité des branchies des poissons, ce qui entrave gravement leur fonctionnement. Les pH faibles causent des perturbations de l'équilibre en ions chlorure et sodium du sang des animaux aquatiques ce qui, avec la perte d'oxygène dans les tissus, est la première cause de mortalité des poissons. La mortalité des poissons apparaît à partir de pH inférieurs à 5.

Les métaux dissous augmentent la toxicité de l'effluent minier acide et sont généralement des poisons du métabolisme. Ainsi, le zinc, le cadmium et le cuivre sont toxiques tout particulièrement aux faibles pH et agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues et affecter les poissons. Les importantes concentrations de métaux et de colloïdes (Fe, Al, Zn, Cu) dans les eaux, puis dans les sédiments, causent de sévères altérations des communautés d'invertébrés benthiques et la réduction ou l'élimination des populations de truites qui s'en nourrissent.

Le jeu des bioaccumulations et des bioamplifications peut aboutir à une intoxication humaine notamment chez les populations de pêcheurs. Chez les personnes intoxiquées, on trouve des métaux dans la plupart des tissus mous, surtout le foie, les reins mais aussi dans les os. Une fois absorbés, les métaux lourds sont souvent difficiles à éliminer. La demi-vie de la plupart d'entre eux dans le corps humain est longue, elle atteint 30 ans pour le cadmium. Les divers effets d'une exposition de longue durée aux métaux (Cd, Cu, Pb, Sn, Zn) sont les suivants : gastro-entérite, irritation pulmonaire, insuffisances rénale et hépatique. L'exposition aux métaux peut également provoquer des cancers.

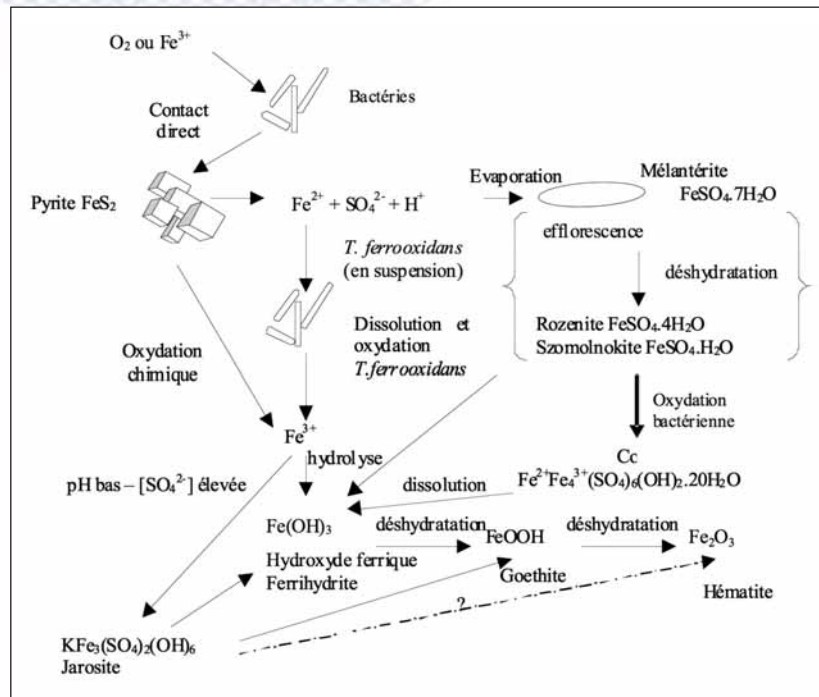


Fig. 2-16 : Schéma récapitulatif des réactions primaires et secondaires qui se déroulent au cours d'un phénomène de DMA. Adapté de Nordstrom (1982) in *Coal mine drainage prediction and pollution prevention in Pennsylvania*.

L'arsénite, As(III), est la forme d'arsenic la plus toxique pour les organismes vivants. Mais l'arsenic présent dans les eaux acides oxydantes est sous la forme d'arséniate As(V). La similitude de l'arséniate, avec le phosphate lui permet de pénétrer les chaînes métaboliques et, par exemple, d'inhiber la synthèse de l'ATP (Adénosine Tri-Phosphate), la molécule qui transporte l'énergie dans les cellules. Les eaux peuvent aussi contenir des composés organiques d'arsenic, comme le diméthyle arsenic ou la triméthyle arsine. Certains de ces composés sont liposolubles et donc bioaccumulables. Ils sont toutefois considérés comme moins toxiques que l'As(V), lui même étant moins toxique que l'As(III). Les composés arsénisés s'accumulent dans le foie. Les symptômes de l'intoxication sont une diminution de la coordination motrice, des perturbations des systèmes nerveux et respiratoire et une altération des reins.

Chez l'Homme, l'arsenic provoque des troubles cardio-vasculaires, des cancers de la peau et des tumeurs.

La pollution par les DMA induit également des facteurs polluants physico-chimiques secondaires. En effet, la dissolution des roches carbonatées soumises aux eaux acides libère du dioxyde de carbone dans l'eau et l'oxydation des métaux réduit la teneur en oxygène dans les rivières. Ces modifications perturbent la respiration de la faune et de la flore aquatiques. L'augmentation de la pression osmotique entraînée par les fortes concentrations en sels dissous métalliques, et notamment la présence de sulfates, est aussi nuisible à la vie. La précipitation des métaux, sous forme d'hydroxydes et d'oxyhydroxydes, produit des particules en suspension. Celles-ci augmentent la turbidité, gênent la respiration des poissons et enfin, lorsqu'elles se déposent, étouffent leurs œufs et la végétation.

### Et en cas d'accident ?

L'oxydation des sulfures métalliques peut aussi devenir un facteur aggravant à l'occasion d'un accident comme celui survenu en Espagne sur le site minier d'Aznalcóllar/Los Frailes à 45 km à l'ouest de Séville. Le 25 avril 1998, une digue s'est brutalement rompue à la périphérie d'une lagune contenant un résidu du traitement de pyrite. Aussitôt 4 à 5 millions de m<sup>3</sup> d'eau acide polluée et environ 1 million de m<sup>3</sup> de tailings (fines de lavage) contenant des sulfures, du fer, du zinc, du plomb, du cuivre, de l'arsenic et du cadmium se sont déversés à travers 43 km<sup>2</sup> de terrains agricoles en direction des rivières Agrio et Guadiamar. Des mesures d'urgence ont permis de limiter la contamination du

parc Naturel National Doñana qui abrite la plus grande réserve ornithologique d'Europe. Cependant, à la faveur de l'assèchement et de l'aération progressive de la couche de 1,7m de tailings déposés, l'oxydation des sulfures et la formation d'acide sulfurique se sont amplifiés. Les métaux encore présents à l'état solide se sont alors solubilisés massivement (45% du cuivre, 65% du zinc et du cadmium). Enfin les pluies ont entraîné les polluants dans le sol. Malgré les importants travaux de restauration entrepris, les eaux de l'Agrio et du Guadiamar continuaient de présenter des concentrations métalliques élevées et des pH anormalement faibles en 2003.

### La prévention du DMA et sa difficile maîtrise à la source

Au même titre que l'on prévient un incendie en évitant de mettre en présence d'une source de chaleur un combustible et un comburant, les méthodes préventives du DMA consistent à éviter la rencontre des bactéries oxydantes, des sulfures et de l'oxygène en milieu aqueux. Les mêmes méthodes sont employées pour éviter l'aggravation d'un DMA déclaré. On conçoit la difficulté que représente la maîtrise du phénomène sur un site minier en activité et de surcroît si ce site est désaffecté ou abandonné.

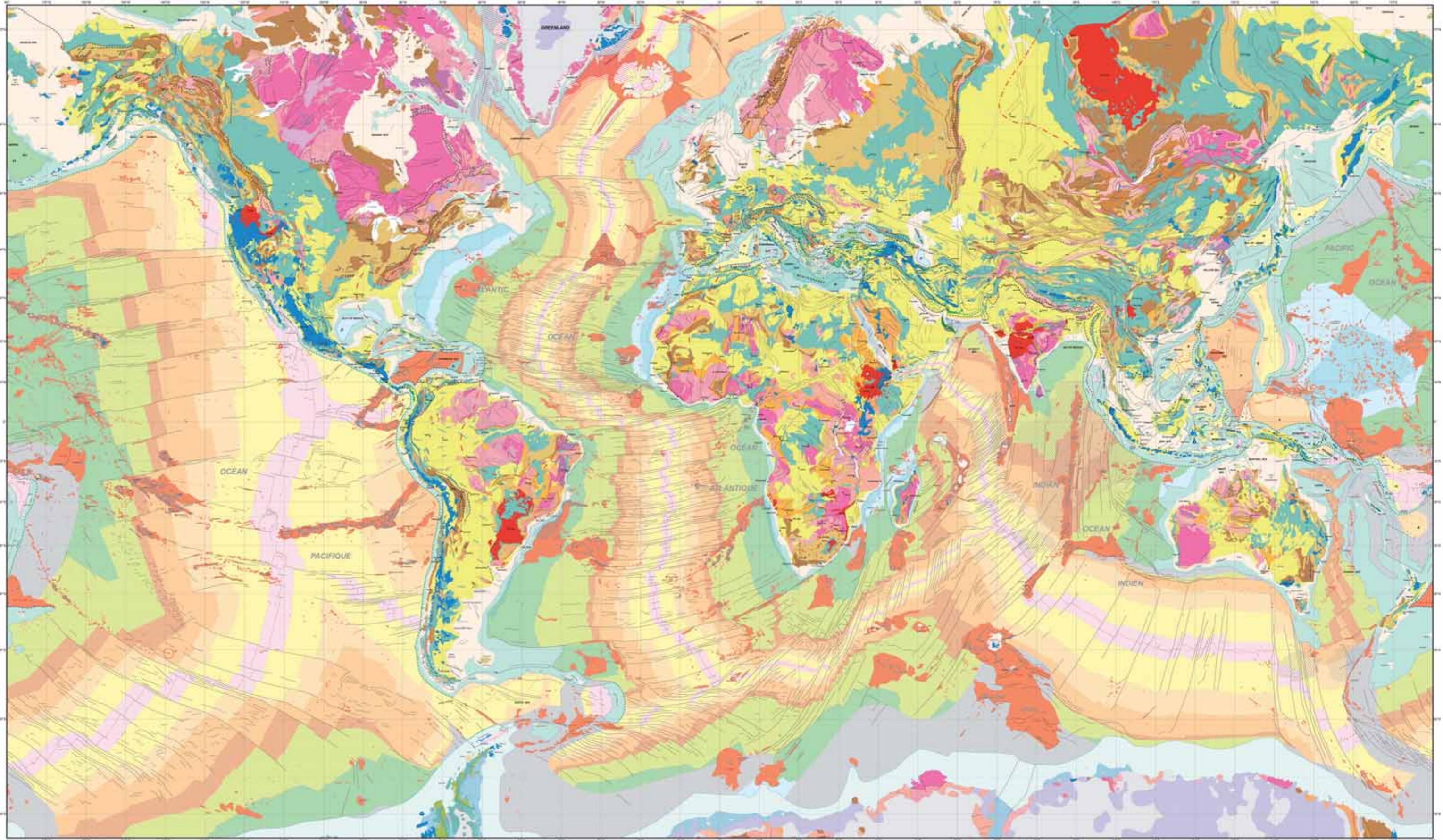
Avant l'exploitation la prévention du DMA passe par sa prédiction. Pour prédire l'apparition du drainage minier acide, l'exploitant fait appel à la modélisation ainsi qu'à des essais statiques ou dynamiques conduits en laboratoire ou sur site à plus ou moins grande échelle. Puis il met en place des actions préventives avant ou pendant l'exploitation : choix de l'emplacement des stocks de solide, mise en place de drains et retenues des eaux, application de techniques séparatives ou de confinement aux solides sulfurés. On se reportera utilement, à ce propos, aux travaux européens du JRC (Joint Research Centre, European Commission – 2004 – Reference document on Best Available Techniques – for management of tailings and waste-rock in mining activities).

Pendant ou après l'exploitation, le confinement ou le traitement des solides sont mis en œuvre. La couverture des déchets miniers par une couche de terre ou de matériaux inertes permet la réduction de la percolation. Si le taux d'oxydation des sulfures est moyennement réduit, les flux, par contre, sont atténués ce qui diminue les volumes à traiter. Cette technique a été employée sur le site australien de Rum Jungle à Batchelor (Australie, Northern Territory) mais elle n'est efficace que pendant la saison des pluies seulement. Le confinement des déblais miniers par des argiles puis par une simple couche de terre végétale n'est pas satisfaisant. L'étanchéité du système est précaire vis-à-vis de l'eau d'infiltration riche en oxygène. On a souvent constaté que les matériaux sulfurés en contact avec l'eau donnaient à nouveau lieu à des DMA après confinement. En Europe, le JRC préconise de placer une couverture sur les digues à tailings et de les ceinturer de canaux de dérivation des eaux pluviales pour restreindre l'infiltration d'eau oxygénée dans les tailings, et subséquemment en limiter l'oxydation.

Il existe d'autres types de confinement faisant appel à différents matériaux de couverture : couvertures organiques (par exemple des boues de station d'épuration) censées consommer l'oxygène et prévenir sa diffusion à l'intérieur du matériau recouvert, ou couvertures multicouches (sable, graviers, argiles, ciments, calcaire). Cette dernière méthode a été employée expérimentalement sur le site minier grec de

Kassandra dans le cadre de l'étude PRAMID entre 1992 et 1995 (voir à ce sujet le site CORDIS <http://ica.cordis.lu/search/index.cfm>). Cependant, à long terme, l'aptitude du site à produire des DMA est restée forte. **Le confinement au moyen d'une enveloppe constituée de géomembranes, elle-même entourée d'argile, est sans doute la technique la plus sûre, mais aussi la plus coûteuse.**

Une autre technique préventive ou curative consiste à mélanger les solides à divers produits. L'ajout de produits alcalins permet de contrebalancer la production acide. On utilise par exemple des cendres volantes souvent disponibles via les centrales thermiques proches des mines de charbon, du calcaire ou de la chaux sur les sites des mines métalliques. Les produits inertants empêchent, ou du moins limitent, le contact des sulfures ou du fer avec l'oxygène, l'eau et les bactéries. Le phosphate de fer par exemple, réagit avec le fer avant qu'il n'interagisse avec la pyrite, l'oxyde de manganèse évite l'oxydation de la pyrite. Les produits inhibiteurs tuent ou empêchent la croissance des bactéries. Les déchets miniers subissent parfois un épandage ou un mélange de produits inhibiteurs tels que le lauryle sulfate de sodium, l'alkyl benzène sulfonate, l'acide benzoïque ou l'acide sorbique. Pourtant, on considère que ces produits ne sont utilisables qu'en complément d'une action plus vaste ou bien provisoirement avant la mise en place d'une solution définitive. En effet, l'un



des inconvénients des bactéricides est leur efficacité limitée dans le temps : quelques mois. On peut aussi s'interroger sur les effets secondaires possibles de ces réactifs sur d'autres formes de vie en aval du site minier. D'ailleurs, certains de ces produits sont désormais interdits.

Après l'exploitation, l'eau est l'une des couvertures les plus sûres pour éviter le contact entre l'oxygène et la roche sulfurée. Dans certains cas, à la fin de l'exploitation du site minier, l'ennoiement contrôlé de la mine permet d'isoler l'ancien gisement de l'oxygène de l'air. Cette technique de confinement ne consiste pas à simplement laisser remonter la nappe phréatique, ce qui peut, au contraire, provoquer le DMA. Elle fait appel à des outils de modélisation des exutoires qui permettent de canaliser l'eau dans le labyrinthe minier pour atteindre la cote la plus élevée possible. L'opération requiert de nombreuses précautions comme la limitation des vides, l'accélération du remplissage du site par des eaux dépourvues d'oxygène dissous et le serrage (fermeture) des cheminées débouchant au jour.

Dans des conditions climatiques favorables, les mines à ciel ouvert et les résidus miniers peuvent aussi faire l'objet d'un confinement sous eau. Leur recouvrement par la surface d'un lac artificiel, ou naturel dans le cas des résidus, permet une importante réduction de la disponibilité de l'oxygène. Il constitue un très bon moyen pour protéger les sulfures de l'oxydation. En effet, le milieu sédimentaire réducteur qui s'y crée, grâce à l'activité biologique des bactéries sulfato-réductrices et des plantes, évite l'oxydation des matériaux sulfurés. Cette technique a été utilisée sur le site de Mine Equity Silver près de Houston en Colombie Britannique (Canada). Une masse de 42 millions de tonnes de tailings y est ainsi maintenue sous l'eau. Toutefois, l'implantation des lacs est limitée par la configuration du site (hydrologie, topographie). De plus, une libération lente des métaux dans l'eau reste possible. Des concentrations supérieures aux teneurs acceptées peuvent être atteintes et entraîner l'obligation d'un traitement de l'eau issue des retenues.

Enfin, dans quelques cas de contextes technico-économiques particuliers, les déchets miniers produits par une ancienne exploitation minière peuvent devenir la matière première d'une nouvelle production. Si les déchets sont producteurs de DMA, celui-ci s'atténue ou disparaît avec eux. La méthode la plus appropriée pour ce type d'opération sur des solides pauvres en métaux et riches en sulfures est la biolixiviation contrôlée des solides en terril ou en réacteur. L'usine de Kasese (Ouganda) (<http://www.kccl.co.ug>) décrite dans un précédent *Géochronique*, est à ce titre exemplaire (*Géochronique* n°86 – Juin 2003 – pp. 24-30 – « Dossier bactéries et industrie »). Cette usine unique au monde, construite sur le site d'une ancienne mine de cuivre, a permis depuis 1998 d'exploiter 1,1 million de tonnes de pyrite cobaltifère dont les percolats acides impactaient le Parc National « Queen Elizabeth » (Fig. 2-17).

#### Le traitement des eaux : seule alternative

Comme on l'a vu, les méthodes préventives des DMA ne servent généralement qu'à retarder l'acidification ou en limiter l'ampleur. Mais une fois déclaré, le DMA est très difficile à contrôler et à stopper. C'est pourquoi, l'unique recours consiste souvent à traiter les effluents acides avant leur déversement dans le milieu naturel. Le traitement des effluents acides a pour but l'élévation de la valeur du pH, l'élimination des métaux en solution et leur isolement dans un milieu où ils seront inoffensifs pour les êtres vivants. Les méthodes employées font appel, souvent de façon combinée, à l'oxydation ou au contraire à la réduction des métaux et à leur fixation dans des matrices inertes. Les traitements peuvent être « actifs » ou « passifs ».

Les traitements « actifs » font appel à des équipements lourds, à l'apport de réactifs et nécessitent un suivi constant. La technique considérée comme la plus fiable repose sur une station de traitement qui neutralise les eaux acides en les mélangeant à un réactif chimique alcalin



Fig. 2-17 : Ecoulement d'eau acides et de particules solides contenant des métaux depuis les stocks de pyrite cobaltifère vers le Parc National « Queen Elizabeth », Kasese, Ouganda. (photographie Brgm).

(calcite, chaux, chaux vive, soude caustique, oxyde de magnésium). A long terme, ces stations de traitement sont coûteuses en matière première et produisent d'imposants volumes de boues dont le stockage peut devenir problématique pour des raisons de superficie disponible et de stabilité chimique. Les améliorations apportées à la technique consistent à enrichir le milieu en oxygène et dioxyde de carbone par injection d'air comprimé ou de ces gaz, à ajouter des réactifs oxydants ou divers additifs pour obtenir une meilleure précipitation des métaux, une diminution du volume des boues et parfois leur valorisation. Une station de ce type fonctionne sur l'ancien site minier de Chessy-les-Mines (Fig. 2-18).



Fig. 2-18 : Station de traitement à la chaux des eaux acides de l'ancien site minier de Chessy-les-Mines (Rhône) (photographie J.-F. Brunet, Brgm).

## Dossier

Un autre type de traitement actif fait appel à la précipitation des métaux en milieu réducteur par ajout de sulfure de sodium, de calcium, d'hydrogène sulfuré ou en présence de bactéries sulfato-réductrices (BSR). Dans ces conditions, les métaux retrouvent l'état réduit qu'ils avaient dans la roche d'origine. Le fer, par exemple, précipite sous un cortège de formes minérales sulfurées précurseur de la pyrite. Cette méthode particulièrement efficace, mais plus coûteuse que le traitement à la chaux, présente plusieurs avantages importants. Les précipités obtenus sont de faible volume, d'une grande stabilité s'ils sont conservés en milieu réducteur et les métaux contenus peuvent facilement faire l'objet d'une valorisation. Bien entendu, il existe d'autres techniques et l'éventail des procédés du traitement de l'eau est largement déployé pour traiter le DMA : complexation par du phosphate, échange d'ions sur résine ou argile, extraction par solvant, inertage physico-chimique en matrice de silice, électrolyse ou électrocoagulation, électrodialyse, osmose inverse, distillation, adsorption sur charbon actif...

Les traitements passifs ont été développés à partir du début des années 1980 pour le traitement des DMA des mines de charbon. Les applications aux mines métalliques sont restées limitées jusqu'en 1995. Aujourd'hui, ces traitements s'inscrivent dans une logique récente dite de « Green Remediation ». En effet, ces aménagements favorisent les réactions physiques, chimiques et biologiques qui se produisent naturellement dans les cours d'eau, les marécages et les sols : neutralisation de l'acidité et piégeage des métaux en présence de roches alcalines, métabolisation et sorption par les micro-organismes et la flore. Ils sont particulièrement préconisés sur les sites où l'exploitation a cessé car ils permettent de minimiser les frais de construction et surtout de maintenance. Toutefois, leur coût varie largement selon les conditions géographiques, topographiques du site, les caractéristiques de l'effluent à traiter et les concentrations de sortie à respecter. Les performances des traitements passifs obéissent aux varia-

tions de température, de débit et de composition de l'effluent acide à traiter. Les traitements passifs des DMA les plus nombreux sont les zones humides aérobies et anaérobies, les drains de calcaires anoxiques et les procédés de biosorption. La combinaison de plusieurs méthodes de traitement successives est souvent nécessaire. Si elle complique les installations, elle permet aussi d'adapter et d'optimiser les procédés aux différents cas rencontrés.

Le traitement passif le plus simple est sans doute le canal de calcaire ouvert (en anglais Open Limestone Channel (OLC) ou Open Limestone Drain (OLD)). L'effluent acide s'écoule par gravité dans un canal à l'air libre rempli de petits blocs de calcaire. Le drain est incliné à la faveur d'une déclivité naturelle pour provoquer une aération de l'effluent et favoriser son oxydation. Le calcaire réagit sous l'effet de l'acide sulfurique de l'effluent, le pH augmente et les métaux précipitent. Les blocs de calcaire s'enrobent progressivement de précipités et perdent donc de leur efficacité, mais l'acidité et les concentrations en métaux peuvent malgré tout être réduites de 25 à 50 %. Une fois le drain franchi, l'effluent chargé de précipités rejoint un bassin de décantation.

Dans un drain calcaire anoxique (en anglais Passive Anoxic Limestone Drain (PALID) et Anoxic Limestone Drain (ALD)) l'effluent acide s'écoule dans une tranchée refermée contenant un gravier grossier de calcaire. L'absence d'oxygène minimise la précipitation des hydroxydes ce qui évite le colmatage du drain. La calcite se dissout et le pH augmente. Le fer, qui reste sous la forme de fer ferreux, ne précipite pas tant que le pH est inférieur à 6. A la sortie du drain, l'aération soudaine de l'effluent conduit à la précipitation des hydroxydes. Un traitement préalable en conditions réductrices est préférable dans les nombreux cas où l'effluent entrant est riche en oxygène dissous, en fer(III) et en aluminium.

Le lit de calcaire fluidisé (ou Diversion Well en anglais) est un procédé dérivé du traitement des pluies acides. Un cylindre métallique ou en béton est rempli de calcaire, dont la granulométrie est proche de celle du

sable. Un tube est verticalement dans le cylindre et y introduit l'effluent à quelques centimètres du fond. Le lit de calcaire est fluidisé par le flux acide lui-même qui agite les particules de calcaire, ce qui évite leur enrobage par les précipités d'hydroxydes de fer. Ces hydroxydes sont alors chassés hors du cylindre vers un bassin de décantation situé en aval, ce qui permet de les recueillir.

Un autre type de traitement passif consiste à utiliser des zones humides (wetland). Aux États-Unis, plus d'un millier de zones humides artificielles ont été créées. Les plantes qui prospèrent sur les sols et les sédiments saturés d'eau ont développé des conditions réductrices dans leur rhizosphère. L'effet combiné des bactéries et des plantes dégrade, fixe ou précipite les polluants. Les zones humides sont particulièrement peu coûteuses et demandent peu d'entretien. Les zones humides aérobies (marécages) et anaérobies (tourbières) diffèrent par les conditions d'oxygénation et des réactions chimiques et biologiques qui y règnent. Les ALD sont souvent combinés à une zone humide aérobie pour relever le pH et diminuer les concentrations en fer et manganèse.

D'autres techniques combinent, à des degrés divers, les réactions survenant au cours du traitement par le calcaire et par les zones humides. On citera ainsi le réacteur à flux vertical (Vertical Flow Reactor (VFR)), le bioréacteur canadien breveté ARUM®, Acid Reduction Using Microbiology qui favorise le développement de bactéries sulfato-réductrices, les biofilms de micro-algues fixés sur divers supports, le procédé Pyrolusite® de formation biologique d'oxyde de manganèse, la phytoremédiation, la biosorption sur biomasse,...

Enfin pour le traitement des eaux souterraines, la technologie des barrières perméables réactives (BPR) évite le pompage des flux souterrains et leur traitement en surface. Elle consiste généralement à excaver une partie du terrain en constituant une tranchée perpendiculaire au sens de déplacement de l'eau à traiter. La tranchée remplie d'un matériau réactif représente une barrière interposée entre la panache de pollution souter-

raïne et la nappe non contaminée. Elle est perméable à l'eau mais fixe les polluants qui la rencontrent en entraînant leur précipitation ou leur sorption. Les BPR peuvent être constituées d'un réactif (fer zéro valent, oxyde de fer, oxyde de titane, chaux, apatite, tourbe, zéolite, charbon actif, laitier de haut fourneau...) ou d'un mélange de matériaux (par exemple : carbone organique/silice/chaux, kaolin/sable recouvert d'oxyde de fer). D'autre part, les BPR biologiques (ou biobarrières réactives) sontensemencées par une population bactérienne. Un substrat organique déposé dans la tranchée favorise la croissance des bactéries sulfato-réductrices (BSR) et donc la précipitation des métaux sous forme de sulfures. Les substrats employés sont des copeaux de bois, de la paille, du fumier, de la luzerne, etc. Les BPR ont fait leurs preuves à petite échelle sur le terrain en permettant l'élimination de Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb.

Dans bien des cas, la solution la plus appropriée est en fait une combinaison de plusieurs techniques. Une réflexion au cas par cas et une mise au point méthodologique sont nécessaires pour chaque site minier concerné. Ces démarches préparatoires doivent inclure un diagnostic complet (tests, monitoring...), une analyse du risque, une étude de faisabilité du programme de remédiation et/ou de prévention, un dimensionnement précis des installations et la prévision d'un réseau de surveillance du milieu en aval des traitements.

J.F. BRUNET

Plus d'informations :  
<http://www.brgm.fr/DMA>  
<http://biomine.brgm.fr>  
<http://bioshale.brgm.fr>

## Les autres aléas

### Embrasement spontané d'anciens terrils

Les terrils de lignite ou de charbon, avant 1981, n'étaient considérés par le code minier ni comme des ouvrages ni comme des dépendances minières. En général lors de l'arrêt définitif des travaux ils ont été vendus (à des particuliers, aux communes, à



Fig. 2-19 : Installations de sécurité autour du terril en combustion de Rochebelle (Alès, Gard) : clôture de sécurité et signalisation (photo M. Cossard).

des offices comme celui des Forêts, etc.). Certains ont été réaménagés. Il existe aussi des terrils qui ont été édifiés après 1981. Ceux-là (à moins que le terrain ait été vendu entre-temps) relèvent du code minier, comme le terril de Couriot à Saint-Etienne. D'autres comme celui de Bramefam à Gardanne (fait de pierres de mine et de cendres de centrale thermique) sont des « installations classées ».

Les événements récents (été 2004) ont amené à réviser la réglementation les concernant, afin de mieux définir les responsabilités et de faciliter leur surveillance et, le cas échéant, leur traitement.

L'échauffement et l'auto-combustion de certains terrils d'Alès, propriété de la Direction de l'agriculture et des forêts (terril de Rochebelle et terril du Mont Ricato) ont nécessité (après l'intervention des pompiers) la pose aux frais de l'État de tout un dispositif de surveillance comprenant clôtures, forages de pompage d'eau dans la mine voisine, système d'adduction d'eau jusqu'au terril, tuyauterie et lances d'arrosage pendant toute la durée de l'incendie de Rochebelle (pour le refroidissement du terril), ainsi que détecteurs par infrarouges de nouvelles zones d'échauffement, pose de panneaux de danger et maintenance de cet ensemble pour une durée indéterminée (Fig. 2-19).

Désormais, certains terrils doivent donc disposer de dispositifs de suivi. Le dossier d'arrêt des travaux stipule expressément la surveillance de ces terrils une fois par an. Il est demandé que les inspecteurs s'assurent que les terrils respectent le « guide terrils » de Charbonnages de France, qui indique les premières mesures simples à mettre en œuvre et précise le cas où il faut faire appel à des spécialistes (INERIS en particulier). L'inspection doit vérifier le bon contrôle des échauffements internes au droit des secteurs déjà traités, l'absence d'apparition de nouveaux points chauds en surface, et aussi surveiller les risques d'atteinte à l'équilibre du terril (activité de moto-cross sauvage, emprunts de matériaux ou terrassements, prévention des incendies de broussailles).

### Chambres souterraines en combustion et subsidence

On observe un phénomène de « combustion souterraine-affaissement » de chambres d'exploitation dans le bassin de Saint-Etienne-Ouest, dans la concession de quartier Gaillard, autour du Puits des Rosiers. Afin de continuer à le gérer après l'arrêt des travaux, un réseau de 12 sondages a été mis en place



## Dossier

par les Houillères de Bassin du Centre et du Midi (HBCM). Il permet d'assurer la surveillance de l'évolution du phénomène. Chaque sondage est équipé de moyens de mesure du phénomène d'échauffement et de points de repère pour nivellement. D'autres repères de nivellement complètent ce réseau. Les mesures de surveillance concernées par l'art. 93 du code minier comprennent une mesure semestrielle de température par thermocouple de l'ensemble des sondages, une mesure semestrielle de nivellement, 4 journées par an de suivi global par un ingénieur qui rend compte par un rapport annuel à la DRIRE. Le coût annuel de cette surveillance a été estimé par l'administration à 7 500 euros. Les HBCM ont dû verser à l'État une soule de 75 000 euros pour le couvrir pendant 10 ans.

J. FÉRAUD

### Le réaménagement

Jusqu'à la fin des années 60, les sites miniers arrêtés étaient, en France, laissés dans un état complet d'abandon. Les seules mesures ordonnées par l'administration des Mines concernaient la sécurité des personnes : poser une dalle sur les puits, barricader les entrées de galeries, tendre des lignes de fil de fer barbelé autour des fosses résultant de la remontée des chantiers d'abatage au jour. Cela tenait d'abord à l'habitude mais aussi à la très longue durée pour laquelle, en général, les concessions minières étaient accordées, beaucoup étant même de durée illimitée. Deux destinées différentes s'offraient alors à la mine arrêtée. Dans l'option « heureuse », quelques années à peine après l'abandon des travaux, un nouveau pétitionnaire se présentait et tentait sa chance. Il importait donc qu'il trouve l'outil de travail intact. Dans l'option malheureuse, le concessionnaire en place cessait définitivement d'exploiter cette mine devenue non rentable. S'il n'avait plus de capitaux, il était dans l'incapacité de remettre le terrain en état ; la mine devenait une friche industrielle et, le jour où la concession expirait enfin, l'administration ne trouvait plus

aucun héritier solvable pour remettre le site en état, au grand désespoir du propriétaire du sol. S'il s'agissait d'une compagnie possédant de nombreuses concessions du même métal, elle reportait ses capitaux sur une autre de ses concessions plus lucratives mais elle n'entendait pas pour autant qu'un concurrent vienne tenter sa chance derrière elle et casser le marché. Elle ne renonçait donc surtout pas à sa concession. Les grandes compagnies conservaient ainsi dans leurs mains, durant des décennies, un immense domaine minier inactif où, seules, une ou deux mines à la fois vendaient leur production sur un marché relativement capif en France.

À partir des années 70, l'administration des Mines a mis un terme au règne des concessions illimitées. Les nouveaux titres miniers accordés l'ont été pour des durées plus raisonnables, de 30 ans maximum en général. En outre, en 1971, la notion de remise en état a été prise en compte pour les carrières et les autres « installations classées ». Les mines ne font pas partie de ces installations mais les usines de traitement du minerai (laveries) le sont en général. La remise en état s'est alors imposée dans les esprits pour l'ensemble des activités extractives arrêtées. Les titulaires de concessions minières inactives ont été sommés de reprendre l'extraction ou de renoncer

à leur concession et de quitter les lieux. Ils étaient alors en général encore solvables et l'administration avait, dès lors, toute latitude pour leur faire appliquer la rigueur de la loi ; sur un domaine qui était, en 1993, de l'ordre d'un millier de concessions minières encore valides, seules 168 se sont révélées orphelines ou assimilées et ont dû faire l'objet, les années suivantes, de travaux de mis en sécurité aux frais du pays. Certes, quelques industriels, faisant la sourde oreille, ont pu échapper à leurs obligations de remise en état, notamment dans le cadre de permis d'exploitation (de durée très courte, cinq ans renouvelables trois fois) expirés depuis longtemps : ils ne sont plus là pour que l'administration les poursuive. Néanmoins, la grande majorité de la profession minière s'est exécutée. Ce faisant, elle a regagné, dans une opinion publique devenue, depuis 1980, de plus en plus méfiante à l'égard des industriels, l'image d'une profession responsable qui procure les substances indispensables à la vie du citoyen et à l'économie du pays tout en observant des règles de plus en plus sévères pour le respect de l'environnement. **Aujourd'hui, les remises en état des anciennes mines d'uranium du Limousin ou de fluorine du Tarn (Fig. 2-20) tiennent compte des dernières normes en vigueur.**



Fig. 2-20 : Réaménagement ancien de la partie nord de la mine de fluorine à ciel ouvert du Moulinat (St-Jean-de-Jeanne, Tarn) (photo P. Bretin 2001, SOGEREM/ALCAN).

La circulaire n° 96-52 du 2 juillet 1996 fait la différence entre remise en état et réaménagement. Elle précise notamment que « la remise en état ne doit pas être confondue avec le réaménagement qui peut, certes, en constituer le prolongement mais qui est une opération distincte ayant pour effet de valoriser les lieux par la création d'équipements ou d'infrastructures et de leur donner une affectation nouvelle souvent différente de l'affectation originelle (ex. : base de loisirs) ». « L'aménagement suppose l'intervention d'autres acteurs ». Le réaménagement est, en fait, la transformation de la vocation initiale du site ; ce changement de vocation impose de savoir comment cette modification s'intègre dans l'environnement physique aussi bien que socio-économique. Il n'incombe pas, légalement, à l'exploitant. La remise en état, oui.

Qui doit agir ? En premier, l'exploitant du site, mais sous le contrôle de l'État. En région, les administrations ainsi concernées sont surtout les DRIRE et DIREN (réunies désormais dans les DREAL), les DRAC, et *pro parte*, les DDASS et DRASS, DDAF et DRAF, DSV ou services vétérinaires de la DDAF ; ces organismes transmettent leur avis au préfet. En cas de faillite de la compagnie minière, c'est le mandataire judiciaire qui a ces obligations. Le maire a un rôle important dans la mesure où il a le pouvoir de police en matière de sécurité et de salubrité publiques. Le propriétaire du terrain et (dans le cas où la mine était aussi le propriétaire du sol) l'acheteur ou le revendeur du terrain sont également concernés. Les actes notariés doivent notamment contenir une information précise sur la nature minière d'origine du terrain négocié et sur les servitudes ou risques qui peuvent s'y trouver attachés et préciser pour quelle durée.

Dans le cas où la compagnie minière ou ses héritiers ont disparu ou s'avèrent insolubles, la puissance publique se substitue à leurs obligations. L'ADEME peut être ainsi maître d'ouvrage sur les sites miniers pollués, classés orphelins ou à responsables défaillants. Elle s'efforce aussi de créer des dispositifs incitatifs en développement.

Dépolluer un site nécessite de disposer de sa maîtrise foncière. Les propriétaires des parcelles de terrain à

réhabiliter, s'ils ne sont pas la compagnie qui exploitait le site, n'ont en général pas les capacités financières ni techniques pour les traiter. Les collectivités territoriales (principalement le département et la région), mais aussi les Conservatoires des paysages et les Parcs naturels régionaux, peuvent alors intervenir comme bailleurs de fonds, acquérir les sites abandonnés, pour les réhabiliter en tant que maître d'ouvrage, puis les conserver. Ponctuellement, les Agences de l'eau, la DATAR et les établissements publics fonciers, sous certaines conditions, peuvent être des bailleurs de fonds pour la réhabilitation d'un site minier.

Les techniques mises en œuvre sur le terrain sont de plus en plus sophistiquées, si bien que la remise en état des mines, en particulier celles à ciel ouvert, est devenue une profession à part entière, avec une importante composante de recherche scientifique. « Reboucher le trou » n'en est pas la partie la plus facile, car souvent il faut « composer ». Certaines excavations sont si vastes et si profondes, certaines falaises de minerai ont été tellement arasées, qu'avec la meilleure volonté il est impossible de reconstituer le paysage à l'identique (Fig. 2-21). Tout l'art du professionnel est alors de reconstituer un paysage harmonieux, sécurisé et conforme au terroir.



Fig. 2-21 : Quand la remise en état est difficile : ancienne mine de plomb de l'Argentella (Corse), photo A. Gauthier.

Le traitement des effluents est une importante partie de la remise en état, en particulier la neutralisation des drainages miniers acides (se reporter à ce chapitre dans le présent dossier). Lors du comblement des mines à ciel ouvert (MCO) il ne s'agit pas seulement de déverser des remblais mais de prévoir leur stabilité, leur drainage et la qualité des eaux qui en ressortiront à la longue (Fig. 2-22). Le cas échéant, des confinements sont réalisés au moyen de membranes plastiques ou de géomembranes minérales.



Fig. 2-22 : Non, tous les effluents ne sont pas rouges ! Ici, eau de mine chargée de sulfates de cuivre à la sortie d'une ancienne mine de cuivre, photo A. Dommanget et J. Féraud.

# Dossier

Dans les mines modernes, c'est désormais dès la période d'exploitation que l'exploitant commence à prévoir la remise en état et à planifier ses travaux miniers en conséquence (Fig. 2-23). Lors du décapage des morts terrains et du minerai, la terre végétale est collectée soigneusement et stockée en vue de sa réutilisation, car c'est de la qualité du sol reconstitué que dépend la revégétalisation du site. Les verses de déblais sont drainées, stabilisées, mises en place en couches successives, de façon à favoriser la recolonisation végétale ultérieure. La vitesse des camions sur les pistes est limitée de façon à atténuer la quantité de poussières soulevées qui pourraient nuire à la flore environnante, et un arrosage régulier les stabilise. La priorité est donnée, suivant le caractère original du site, à la mise en valeur agricole (pâtures ou cultures) des parcelles remises en état, à la création de zones boisées, ou au développement de surfaces mixtes, comportant espèces ligneuses et arbustives en cohabitation avec des espèces herbacées, reconstituant au mieux le paysage traditionnel. La terre végétale est restituée sur les surfaces se prêtant le mieux, par leur pente ou la nature du sous-sol, à une revégétalisation rapide. On procède à un régalaie sans tassement, un hersage, épierrage et des apports d'amendements de différentes qualités. Un ensemencement systématique est appliqué à toutes les surfaces disponibles, y compris les plus hostiles (exemple : gradins non remblayés).



Fig. 2-23 : Comblement « marchant » (= au fur et à mesure) et revégétalisation des gradins supérieurs de la mine de fluorine à ciel ouvert de Montroc (Tarn) et sa laverie à droite (photo P. Bretin 2001, SOGEREM/ALCAN).

On recourt de plus en plus à un ensemencement par projection hydraulique sur les parois, à partir de camions (*hydroseeding*). La méthode consiste à projeter à haute pression, au moyen d'une lance dirigée manuellement, un mélange fluide sur les surfaces à ensemercer. Ce fluide comporte un mélange de semences, des engrais et amendements, et des additifs conditionneurs et fixateurs. Ces derniers ont pour objet, en l'absence d'argile dans le substratum, de coller et fixer les graines de façon durable sur le substratum, d'apporter,

fixer et relarguer de façon progressive des sels minéraux (calcium, fer) et oligo-éléments, et d'apporter une capacité de rétention d'eau. Les substances les plus efficaces sont des colloïdes à base de cellulose, issue de pâte cellulosique de sapin, et d'alginate de sodium. Cette méthode permet, en fonction du résultat désiré, de faire varier les quantités de fluides projetées. Le réservoir du mélange est monté sur un camion 6x4 tous terrains qui peut accéder au plus près des zones à traiter. La portée de la lance est d'une vingtaine de mètres.

## Acronymes à retenir

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ;  
 DATAR : Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale, aujourd'hui remplacée par la Délégation interministérielle à l'aménagement et à la compétitivité des territoires (DIACT) ;  
 DDAF : Direction départementale de l'agriculture et de la forêt ;  
 DDAS : Direction départementale de l'action sanitaire et sociale ;  
 DIREN : Direction régionale de l'environnement ; toutes deux remplacées depuis 2009 par les  
 DRAC : Direction régionale des affaires culturelles ; c'est en général son Service régional de l'archéologie (SRA) qui intervient, quoique le sauvetage d'un chevalement minier de la destruction relève plutôt de sa Conservation régionale des monuments historiques (CRMH) ;  
 DRASS : Direction régionale de l'action sanitaire et sociale ;  
 DREAL : Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement ;  
 DRIRE : Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement ;  
 DSV : Direction des services vétérinaires.

Le réaménagement, c'est le stade ultérieur. Il est facultatif car il nécessite l'intervention d'un « aménageur ». Il y a des réaménagements heureux et d'autres qui le sont moins. Ceux en musée minier sont parmi les plus onéreux, tandis que ceux en terrain de moto-cross sont à la portée de la plupart des budgets municipaux ou privés. Comme pour les anciennes carrières de matériaux, le réaménagement en plan d'eau d'une mine à ciel ouvert est très fréquent. Beaucoup de communes, considérant que, malgré la remise en état des terrains, le paysage reste marqué par le passé industriel du site, y favorisent l'installation de nouvelles entreprises industrielles : ateliers de constructions mécaniques, scieries, centres de traitement de déchets du B.T.P., carrière de fabrication de granulats concassés utilisant les fronts de taille de l'ancienne mine... Ces installations ne relèvent plus de la police des mines et du code minier mais de la législation des installations classées et du code de l'environnement.

### Les impacts sociétaux

Les impacts de l'arrêt d'un bassin minier sur la société sont nombreux et durables. L'existence de désordres créant une situation de crise (effondrements miniers, pollutions) est un facteur aggravant. C'est pourquoi les pouvoirs publics se mobilisent de plus en plus pour comprendre les mécanismes et trouver des solutions.

### Impacts économiques

Le premier impact à frapper le mineur et sa famille est la perte de revenu. Dans le contexte des « Trente Glorieuses », la fermeture d'une mine n'était pas rédhibitoire pour le salarié car, dans la plupart des cas, il pouvait retrouver un emploi de mineur dans une mine voisine ou, au pire, dans une autre mine de métropole, ce qui l'obligeait à un déménagement pour lui et sa famille. Ainsi, bon nombre de mineurs de charbon se reconvertissaient dans une exploitation de fluorine ou d'uranium et vice versa. Avec la fermeture en cascade de toutes les mines françaises, ces possibilités se sont éteintes, à moins de s'expatrier ce qui, à un âge avancé, n'est pas facile (et de toute manière, la crise de 2008-2009 s'est accompagnée d'innombrables fermetures de mines dans le monde entier).

À l'intérieur d'un même bassin minier, les possibilités de reconversion dans des domaines plus ou moins éloignés des métiers miniers sont elles mêmes vite saturées et, selon l'âge, il sera impossible de trouver un nouvel emploi dans le bassin. Une grande partie de la population est contrainte à l'exode.

La réaction en chaîne frappe alors tous les pans de l'économie locale : baisse de la demande de main d'œuvre plus ou moins qualifiée, baisse de la demande de fournitures. Contraints par le manque à gagner, le médecin et le dentiste émigrent vers la ville voisine ou vers d'autres régions moins frappées. La

diminution de la rentabilité entraîne la disparition rapide des infrastructures civiles et du tissu économique dans le bassin : fermeture de lignes de transport en commun, de stations services, d'épiceries, de services tertiaires... Le potentiel de la population locale à investir sur place diminue. Le contrecoup peut même aller jusqu'à la baisse de la rémunération des dépôts d'épargne (sans parler des employés rémunérés en partie en actions de l'ancienne mine).

Dans le domaine immobilier, la valeur du mètre carré s'effondre, que ce soit celle du domicile ou celle du terrain, sans parler du cas où celui-ci s'avère « miné » par des signes d'instabilité.

### Impacts sociaux

La perte du travail signifie celle des avantages de la sécurité sociale. Les syndicats de mineurs se disloquent. L'accès des enfants à l'éducation se complique car l'école de la mine a été supprimée et, du coup, le car de ramassage scolaire aussi. Il faut aller à la ville voisine ou bien mettre les enfants en internat, ce qui a un coût. Les jeunes étant partis ailleurs chercher du travail, la population vieillit inexorablement.

Dans le domaine de la santé, des facteurs de risques peuvent se révéler, associés à la proximité des anciens bassins de décantation ou de résidus miniers insécurisés ou d'anciennes installations métallurgiques.

J. FÉRAUD

**Titre du journal Le Monde, 02.08.2004 :** « À Fontoy, ils ont un an pour quitter leurs maisons »

**Fontoy (Moselle) de notre envoyée spéciale** - À Fontoy, la solution a pris la forme de l'expropriation. Située au plus bas de la future zone d'ennoyage, la commune sera la première à être touchée par la remontée des eaux. L'État a donc fait valoir le principe de précaution en vertu de l'article 95 du code minier, qui prévoit que *« en cas de risque minier menaçant gravement la sécurité des personnes, les biens exposés à ce risque peuvent être expropriés par l'Etat (...) lorsque les moyens de sauvegarde et de protection des populations s'avèrent plus coûteux »*.

# Dossier

## 3 • La réglementation, les acteurs, les responsables

### Mines, carrières

En France et dans de nombreux autres pays historiquement inspirés par le modèle français, la loi fait la distinction entre deux types de substances minérales : les mines et les carrières. En fait, il ne s'agit pas du lieu où on les exploite, mais de la nature de la substance exploitée (le mot *mine* étant pris dans le sens de *gîte* qu'il avait sous Napoléon 1<sup>er</sup>). Le Code minier dispose ainsi, dans ses articles 2 et 3, que sont considérés comme mines les gîtes connus pour contenir de la houille, du lignite ou d'autres combustibles fossiles (la tourbe exceptée), des bitumes, des hydrocarbures liquides ou gazeux, du graphite, du diamant ; des sels de Na, K (et donc les gîtes de sel et de potasse), des sulfates autres que les sulfates alcalino-terreux (ceci exclut donc le gypse et la barytine) ; Al (et donc les bauxites), F (et donc le spathfluor), Fe, Cu, Pb, Zn, Li, Au, U, S (les gîtes de soufre), As, Sb, Hg, P (et donc les gîtes de phosphates), et en général tous les gîtes de métaux ; du gaz carbonique. À cette énumération s'ajoutent les gisements géothermiques. Il peut y être ajouté un jour (par décrets en Conseil d'État) des substances n'ayant pas jusqu'alors d'utilisation dans l'économie.

Le Code minier considère comme carrières les gîtes non mentionnés aux articles 2 et 3 (c'est-à-dire, on le voit, les gîtes de granulats, sable, pierre à bâtir, gypse, argiles diverses, diatomite, perlite, chaux, barytine, kaolin, pierres pour ciment). Historiquement, sous Napoléon 1<sup>er</sup>, les autorités ont voulu y ranger des substances d'intérêt local qui ne nécessitaient pas, de la part de l'État, l'aide protectrice accordée aux mines. On pouvait laisser leur exploitation à la portée de petits exploitants plus ou moins artisanaux, alors que la concession d'une mine, substance jugée plus stratégique (comme le fer ou les combustibles minéraux) ne s'accordait qu'à des compagnies ou des notables présentant du répondeant. Le mode d'exploitation (souterrain ou à ciel ouvert) n'a pas d'importance dans ce classement.

Il y a des mines de plomb à ciel ouvert (mais on ne dira pas pour autant « carrière de plomb ») et des carrières de marbre souterraines. Certaines mines souterraines ont d'abord été attaquées à ciel ouvert (en mine à ciel ouvert ou MCO) ou en découverte (expressions que l'on préfère à celle de « en carrière »). En France, on parlera d'une mine à ciel ouvert de fluorine mais d'une carrière souterraine de barytine. Toutefois, certains pays étrangers ne rangent pas la fluorine et la bauxite dans les substances concessibles car ils ne leur reconnaissent pas le besoin d'une sorte de « sanctuarisation » en tant que substance stratégique pour l'industrie de l'aluminium, contrairement à la France depuis 1960.

L'ensemble des mesures législatives et réglementaires françaises relatives à l'extraction minérale se décline de façon différente entre ces deux ensembles de gîtes. C'est la distinction classique entre Code minier et installations classées.

### Exploitations régies par le code minier

La législation française assimile les mines définies ci-dessus à une propriété de l'État ; c'est à l'État qu'appartient la faculté de l'attribuer à une personne ou à une société, pour exploitation, en raison de l'intérêt que ces ressources représentent pour le développement économique et industriel du pays. L'exploitation d'une mine fait ainsi l'objet de l'institution (et à la fin, du retrait) d'un titre minier octroyé par l'État, qui peut être un permis (de recherche ou d'exploitation) ou une concession de durée et de périmètre fixés.

La conduite des opérations et la gestion des ouvrages tels que puits, galeries, installations de pompage des eaux de mine etc. y est réglementée par le Code minier et en particulier par le Règlement général des industries extractives (RGIE).

Par contre, l'exploitation d'une carrière est réglementée de façon plus complexe, puisque par les articles du Titre VI du code minier

mais aussi les lois de 1976 et 1977 définissant les dispositions relatives aux installations classées pour la protection de l'environnement : lois dites ICPE (mais depuis plusieurs années, seul subsiste, dans le vocabulaire officiel, le sigle IC et l'appellation *installations classées*) et enfin, depuis 2000, par le Code de l'environnement. Ce nouveau Code, créé par ordonnance en 2000 et complété en 2005 et en 2007, abroge et remplace tous les décrets antérieurs.

La réglementation qui s'applique aux ateliers de traitement, usines et fonderies, se scinde pareillement entre deux catégories : la plupart des installations de concassage, broyage, lavage et concentration du minerai opérée par des méthodes physiques simples (gravimétrie) sont répertoriées par le Code minier comme faisant partie intégrante des installations autorisées en vertu du titre minier. Elles sont régies par le Code minier. Néanmoins, certaines installations, comme une partie (historiquement pas la totalité mais seulement les plus récentes) des usines de traitement du minerai par flottation (utilisant des techniques qui mettent en jeu des substances polluantes), les usines de lixiviation et les fonderies, sont répertoriées comme installations classées. Elles sont donc régies comme les carrières.

Dans la plupart des bassins miniers en activité, les deux types d'installations coexistaient et ce sont donc deux types distincts de réglementation qui, jusqu'à récemment, les régissaient : certaines relevaient historiquement du Code minier et les autres des installations classées. Par exemple, la digue à stériles de la mine de plomb-zinc de Metaleurop aux Malines (Gard) relevait des IC tandis que celle de la mine de plomb-zinc de Metaleurop à Largentière (Ardèche) relevait du Code minier. Quand ces diverses installations cessaient d'être actives pour basculer dans l'après-mine, leur suivi était différent. Le Code de l'environnement a mis un terme à cette situation peu pratique en l'emportant sur les deux autres régimes.

### Relations entre propriétaires du sol et du sous-sol

Les relations entre l'exploitant (concessionnaire du sous-sol) et les propriétaires du sol sont régies par plusieurs lois. En vertu du code civil, le propriétaire de la surface emporte la propriété du dessus et du dessous (alinéa 1<sup>er</sup> art. 552 du code civil) ; il peut faire tous les travaux, toutes les constructions et toutes les fouilles en dessous et jouir des produits qu'ils peuvent fournir, à l'exception... des produits relatifs aux mines. En ce qui concerne les mines, en vertu du code minier, l'État, en effet, en reste toujours le propriétaire. L'exploitant, pendant toute la durée où il est titulaire du titre minier, dispose, dans le périmètre octroyé, de trois privilèges en dehors du droit commun à l'égard des tiers (propriétaires de surface), lui permettant d'utiliser les propriétés foncières nécessaires à son activité : un droit d'occupation des sols (art. 71 code minier) ; un droit à des servitudes de passage (art. 72-2 du code minier) ; un droit d'expropriation (art. 73 code minier) ; l'expropriation peut être demandée tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du périmètre minier. Dans une carrière, au contraire, le propriétaire du sol est aussi propriétaire du sous-sol et peut en disposer librement dans le respect de la réglementation et, en particulier, le louer à un exploitant (fortage).

### Les dispositions pour l'après-mine

Le Code minier, avant 1999, prévoyait des mesures pour prévenir ou réduire les dommages d'une mine et agir sur l'exploitant pendant les phases de recherches et d'exploitation (art. 84). Toutefois, aucun de ses articles ne traitait de l'après-mine : réglementation, obligations, responsabilités, financement...

La loi n° 99-245 du 30 mars 1999 a changé tout cela, en précisant les responsabilités en matière de dommages consécutifs à l'exploitation minière et à la prévention des risques miniers après la fin de l'exploitation. Cette loi est directement liée à l'accélération rapide de l'arrêt de l'activité extractive en France et à

quelques accidents (Lorraine). Avec 9 articles fondamentaux, elle a introduit l'après-mine dans le code minier.

Elle a institué une liste des intérêts qui sont à préserver : assurer la sécurité et la salubrité publiques ; préserver les caractéristiques essentielles du milieu, les sites naturels remarquables ; garantir la consolidation des édifices publics ou privés, des voies de communication ; préserver les intérêts agricoles, les monuments historiques et l'archéologie ; assurer la protection de la ressource en eau. Elle a défini les nouvelles responsabilités de l'exploitant : « *L'explorateur ou l'exploitant, ou à défaut le titulaire du titre minier, est responsable des dommages causés par son activité. Il peut toutefois s'exonérer de sa responsabilité en apportant la preuve d'une cause étrangère. Cette responsabilité n'est pas limitée au périmètre du titre minier ni à la durée de validité du titre. En cas de disparition ou de défaillance du responsable, l'État est garant de la réparation des dommages mentionnés au premier alinéa ; il est subrogé dans les droits de la victime à l'encontre du responsable.* »

Elle a institué l'obligation de publicité dans les transactions immobilières : « *L'acheteur doit être informé de l'existence d'une exploitation minière, des dangers et inconvénients* ». La mise en pratique de cette prescription s'avère lente mais progressive.

Elle a défini le cas de sinistre minier : « *Un sinistre minier se définit comme un affaissement ou un accident minier soudain, ne trouvant pas son origine dans des causes naturelles et provoquant la ruine d'un ou plusieurs immeubles bâtis ou y occasionnant des dommages dont la réparation équivaut à une reconstruction totale ou partielle. Cet affaissement ou cet accident est constaté par le représentant de l'État, qui prononce à cet effet l'état de sinistre minier. Elle a précisé les conditions de réparation des dommages : l'indemnisation des dommages consiste en la remise en l'état de l'immeuble sinistré ou bien permet à son propriétaire de recouvrer un immeuble équivalent.* »

Elle définit les conditions de l'arrêt définitif des travaux miniers et la prévention des risques qui doit être exercée.

### Arrêt des travaux et retrait du titre

L'exploitant s'acquitte d'une procédure de *déclaration* d'arrêt des travaux avec remise à l'administration d'un *dossier d'arrêt définitif des travaux* (DADT) qui a pour objectif de faire valider les mesures effectives qu'il se propose de mettre en œuvre pour obturer la mine et prévenir ou faire cesser tout désordre. C'est à ce niveau que, si les intérêts patrimoniaux (archéologie, sites classés, faune, habitat...) le justifient, des études d'inventaire scientifique et de sauvetage par des experts peuvent être prescrites par la DIREN ou la DRAC et réalisées aux frais de l'exploitant. C'est à ce stade aussi que, si des entités jugées crédibles et solvables le sollicitent (et si l'opération recueille les autorisations nécessaires en matière notamment de sécurité), peut intervenir pour certains ouvrages miniers un *transfert de responsabilité* en leur faveur. Il permettra, par exemple, la préservation de l'accès à une galerie (sous la responsabilité de ces entités) pour étudier la faune protégée (exemple de la directive européenne Natura 2000) ou la création d'un musée du patrimoine minier. Ces entités ont l'obligation de justifier qu'elles pourront, à la cessation de leur activité ou en cas de faillite, assurer à leur frais la sécurisation totale et définitive des ouvrages transférés.

Un premier arrêté préfectoral (appelé *premier donné acte*) prend acte des propositions de l'exploitant et de son arrêt des travaux, et prescrit, en cas de besoin, des mesures modifiant ou complétant celles prévues dans la déclaration. Une fois toutes ces mesures exécutées, l'administration en constate la réalité par un *mémoire descriptif* et un *procès verbal de récolement*. Elle en donne acte à l'exploitant par un second arrêté préfectoral (*second donné acte*) qui valide l'arrêt définitif des travaux miniers. Cet arrêté met fin à la police des mines. À partir de ce moment (et sauf si un nouveau désordre venait à survenir), c'est la police communale de droit commun qui s'exerce à nouveau sur le site. L'exploitant sollicite alors de l'État, en remettant un *dossier de renonciation*, que celui-ci accepte sa *renonciation* au titre minier dont il bénéficiait.

# Dossier

Auparavant, il est tenu de transmettre aux collectivités les *installations hydrauliques* qui peuvent concerner l'assainissement, la distribution et la gestion de l'eau. Même obligation pour les *installations de sécurité* (clôtures, ouvrages de surveillance de la stabilité des cavités, des bassins de décantation des stériles miniers, des galeries ou conduites de drainage des eaux de ruissellement, etc.) mais assortie du versement d'une somme (*soulte*) correspondant au budget de leur fonctionnement pendant 10 ans. Il subsiste alors sur le site une certaine police des mines dite « police résiduelle ».

Le stade suivant est celui où la renonciation est acceptée et où, aucun pétitionnaire ne s'étant présenté pour reprendre la concession, l'État en prononce le *retrait*, concrétisé par un arrêté ministériel.

La loi prévoit le transfert à l'État des responsabilités ensuite. « *La fin de la validité du titre minier emporte transfert à l'État de la surveillance et de la prévention de ces risques, sous réserve que les déclarations prévues à l'article 91 aient été faites et qu'il ait été donné acte des mesures réalisées* ». À ce moment, le code minier cesse de s'appliquer. Le propriétaire du foncier reprend tous ses droits (et responsabilités).

## Les PPRM

Il est institué des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) pour éclairer les acteurs du réaménagement du site : L'État élabore et met en œuvre des PPRM dans les conditions prévues par la loi de 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs. Ces plans emportent les mêmes effets que les plans de prévention des risques naturels prévisibles. Ces dispositions figurent aujourd'hui au Code de l'Environnement. Le PPRM est un document réalisé par l'État qui régleme l'utilisation des sols et de l'eau en fonction des usages et en fonction des risques miniers auxquels ils sont soumis. Les phénomènes pris en compte sont : affaissements, effondrements, fontis, inondations, émanations de gaz dangereux, pollutions

des sols ou des eaux, émissions de rayonnements ionisants.

La loi définit aussi une procédure d'expropriation : En cas de risque minier menaçant gravement la sécurité des personnes, les biens exposés à ce risque peuvent être expropriés par l'État, dans les conditions prévues par le code de l'expropriation pour cause d'utilité publique, lorsque les moyens de sauvegarde et de protection des populations s'avèrent plus coûteux que l'expropriation.

Enfin, la loi crée un organisme de prévention et de surveillance des risques miniers qui recueille et conserve, sous sa responsabilité, les documents mentionnés à l'article 91 du code minier (c'est à dire les études accompagnant la DADT). Cette fonction a été par la suite dévolue au BRGM.

## Les acteurs

Les acteurs de l'après-mine sont, d'abord, les populations qui sont confrontées aux problèmes en direct et les collectivités territoriales qui les administrent. Elles se sont regroupées dans des associations, par exemple l'association des communes minières (ACOM) et, pour le bassin houiller du Nord-Pas de Calais, la Mission Bassin minier. Celle-ci a été créée en 2000 et est financée par le Contrat de Plan État-Région.

Pour quelque temps encore, on compte aussi parmi les acteurs les exploitants, industriels privés, par exemple MDPA, COGEMA/AREVA, Metaleurop qui a hérité en 1988 des titres miniers de la SMM Peñarroya et qui elle-même est devenue en 2007 la société Recylex, la compagnie Ex LORMINE, ALCAN/Rio Tinto qui désormais gère les anciennes mines de fluorine de SOGEREM et de la SECME, mais la responsabilité de toutes ces sociétés tend vers son échéance légale, d'autant que certaines disparaissent définitivement de la scène, comme Charbonnages de France (CDF) vient de le faire.

L'État régaliien est le grand acteur de l'après-mine car il survit à toutes les crises et, comme certains persistent, il présente l'avantage d'être toujours retrouvable et solvable. Il intervient à la fois par ses services centraux du Ministère de l'écologie,

de l'énergie, du développement durable et de la mer et par ses services déconcentrés (DRIRE devenues les DREAL), lesquels ont été renforcés dans les régions à forte composante minière.

Les uns et les autres reçoivent le soutien scientifique et technique des établissements publics BRGM et INERIS, dans le cadre de leur mission de service public et de recherche. En outre, depuis 2001, ces deux organismes ont créé le GEODERIS, structure d'expertise technique en appui à l'administration, dotée du statut de groupement d'intérêt public (GIP) dont la direction nationale est basée à Metz avec deux agences interrégionales à Alès et Caen. La mission des 30 agents de GEODERIS porte en particulier sur le recueil et la gestion de l'information minière, l'inventaire des sites et titres miniers, l'évaluation et la cartographie des risques, l'analyse des DADT qui sont soumis à l'administration et la détermination des mesures de sécurité appropriées. Dès 1999, une autre structure, d'appui scientifique elle, a été créée en Lorraine, au moment des premiers désordres survenus, avec l'appui des pouvoirs publics locaux, nationaux et européens : le GISOS (groupement d'intérêt scientifique sur l'impact et la sécurité des ouvrages souterrains). Basé à Nancy, il regroupe une cinquantaine de chercheurs d'origines diverses : BRGM, INERIS, LAEGO (Laboratoire environnement, géomécanique et ouvrages, commun à l'École des Mines et à l'École de géologie de Nancy et relevant de l'Institut national polytechnique de Lorraine), et Mines Paris Tech (École des Mines de Paris). Différents spécialistes issus de grands organismes de recherche français et européens participent également à ses travaux, au sein de son conseil scientifique.

Au sein du BRGM, une structure d'appui opérationnel a été créée en outre en 2006, le DPSM (Département de prévention et de sécurité minière). L'effectif, constitué au départ autour du noyau des personnels issus de CDF, est en 2009 de 112 agents. Le DPSM a les principales missions suivantes :

- travaux de mise en sécurité en qualité de maître d'ouvrage délégué ;
- interventions suite à une mesure d'expropriation ;

- surveillance d'ouvrages de sites miniers, au titre du Code minier ou du Code de l'environnement ;
- participation à la gestion du système d'information après-mine, en particulier la gestion des archives techniques intermédiaires minières et le concours au renseignement minier.

Ses principaux objectifs sont la garantie de la sécurité des biens et des personnes dans les anciennes zones minières et le maintien de compétences techniques minières. Pour les assurer, il dispose d'une direction nationale basée à Orléans et de 4 unités territoriales après-mine (UTAM) :

- l'UTAM Nord implantée à Billy-Montigny (62) pour les régions Champagne-Ardenne, Nord-Pas-de-Calais, Picardie ;

- l'UTAM Est basée à Freyming-Merlebach (57) pour les régions Alsace, Franche-Comté, Lorraine ;

- l'UTAM Centre Ouest basée à Orléans (45) pour les régions Auvergne, Bourgogne, Bretagne, Centre, Ile-de-France, Limousin, Basse-Normandie, Haute-Normandie, Pays de la Loire, Poitou-Charentes ;

- l'UTAM Sud implantée à Gardanne (13) pour les régions Aquitaine, Corse, Languedoc-Roussillon, Midi-Pyrénées, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Rhône-Alpes.

L'Union Européenne intervient également à travers, notamment, ses fonds pour les infrastructures, aide à l'emploi, FEDER, FRAII etc. et de grands projets pour la revitalisation de l'économie (elle finance par

exemple, en partie, la Mission bassin minier Nord-Pas de Calais).

### Qui fait quoi aujourd'hui ?

L'État finance, administre et contrôle. Les industriels se retirent. GEODERIS est le spécialiste de l'administration et le maître d'œuvre des études. Les établissements publics (co)financent la recherche et sont les prestataires de GEODERIS. Le DPSM inspecte les installations de sécurité, les installations de traitement des eaux, et traite les désordres à la demande de la DRIRE.

J. FÉRAUD

## 4 • Gestion des risques et réaménagement

### La gestion des risques d'effondrement minier

Faite jusque dans les années 1990 au coup par coup et dans l'urgence, la gestion des risques de désordres miniers a subi une mutation complète après les effondrements des mines de fer de Lorraine qui ont servi de déclencheur. Elle est désormais conduite posément, suivant différentes étapes : actions diverses visant à connaître l'existence des sites ou à mieux les connaître ; évaluations et traitements de sites ; suivi de certaines installations de sécurité ou de traitement des effluents qui ont été laissées à dessein sur le terrain ; études informatives débouchant sur une cartographie puis une évaluation des aléas

### Connaissance des sites

Traitement de fond contre l'amnésie collective, ces actions regroupent : la constitution de bases de données ; la réalisation d'inventaires et l'alimentation des bases de données à partir des données d'archives et de reconnaissance sur le terrain ; la recherche,



Fig. 3-1 : Vue partielle de la salle de conservation des archives techniques et plans des concessions minières arrêtées, à l'UTAM Sud du DPSM de Gardanne (photo Brgm).

la conservation (Fig. 3-1), le redressement et le géoréférencement des anciens plans. Ces deux dernières opérations, délicates, sont indispensables pour arriver à une bonne superposition entre la géométrie du réseau souterrain figurant sur les plans anciens et la disposition actuelle de la voirie, des habitations et des vestiges de têtes de puits en surface ; elle est essentielle dans le cas où certains des anciens puits sont aujourd'hui masqués. Enfin, ces données, jusqu'ici d'accès réservé seulement aux administrations, sont progressivement mises à la disposition de l'ensemble des acteurs de l'après-mine.

### Evaluation et traitements

Ces actions regroupent toutes les actions d'évaluation, de diagnostic et de recommandation pour des mises en sécurité sur les anciens sites miniers.

Les plus courantes consistent, après la compilation des archives et de la bibliographie, à aller sur le terrain faire un inventaire des ouvrages et des désordres, complété par une enquête en mairie et auprès de la population. L'ingénieur fait alors des recommandations, il porte les urgences à la connaissance des responsables et, s'il en a reçu



# Dossier

le mandat, il établit le cahier des charges des travaux sécuritaires à réaliser par eux. Ces travaux lourds comportent une panoplie d'actions qui vont de la simple obturation des ouvrages (puits et galeries) débouchant au jour (Fig. 3-2 et 3-3), à la réalisation, en cas de besoin, de forages de quelques dizaines de mètres de profondeur pour injecter du béton dans les anciennes cavités. Une attention particulière est portée désormais à la surveillance des travaux et à la visite de récolement car la qualité d'exécution compte pour beaucoup dans la durabilité des traitements, comme on l'a vu plus haut pour les puits qui débourent sans crier gare.



Fig. 3-3 : L'ouverture du haut laisse passer les chauves-souris (faune protégée) et celle du bas la petite faune rampante ou l'eau. Ce type de bouchon en béton armé, large d'un mètre, est la bête noire du collectionneur de minéraux (Peisey, photo Féraud).

Parmi les actions plus lourdes, il y a, d'abord, selon l'urgence, la reconnaissance détaillée d'anciens sites miniers par exploration spéléologique. Les actions les plus sophistiquées sont également plus coûteuses car elles utilisent la géophysique et même des forages avec caméra vidéo et télémétrie laser ; elles visent à retrouver les anciens ouvrages souterrains (puits, galeries) et à en éta-



Fig. 3-2 : Ouvrage de la ligne Maginot des Alpes ? Non, bouchon en béton armé sur une des entrées de galerie de l'ancienne mine de plomb argentifère de Peisey (concession du Piscieu, commune de Peisey-Nancroix, Savoie) (photo J. Féraud).

blir le diagnostic par observations directes et indirectes. On peut ainsi identifier par sondages profonds des bancs repères utiles à l'appréciation du comportement des terrains, comme ce fut le cas en Lorraine, dans le but de caractériser l'état des niveaux exploités (dépilage total, partiel ou non) par des mesures géophysiques. Par exemple, les investigations géophysiques expérimentales à partir des méthodes dites du rectangle de résistivité et du panneau de résistivité montrent un potentiel intéressant pour lever les inconnues dans le cas d'exploitation de sel par dissolution.

Moins fréquent pour le moment, l'établissement de diagnostics environnementaux est appelé à se développer. Dans un premier temps, la Directive européenne n° 2006/21 du 15 mars 2006 (appelée, en abrégé, DDIE) se met en place, concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive. Elle impose en particulier un inventaire de tous les sites anciens ou récents d'ici le 1<sup>er</sup> mai 2012.

## Suivi des installations

Après la mise en sécurité des ouvrages, la gestion d'une ancienne concession minière ou d'un bassin

minier comporte suivant les articles 91 à 93 du Code minier le « suivi » de différentes « installations » qui ont été laissées par le dernier exploitant. Ce sont tous les équipements fixes qui, lors de l'arrêt des travaux, ont été jugés nécessaires à la surveillance et à la prévention des risques, ainsi que les installations hydrauliques nécessaires pour l'assainissement et la distribution de l'eau, pour la maîtrise des eaux pluviales, de ruissellement et souterraines. L'exploitant a été tenu de les mettre en place et il les a transmis à l'État avec une soule pour les faire fonctionner pendant dix ans. L'État les reprendra à son compte ensuite.

Les équipements fixes comprennent d'abord les buses d'écoulement des eaux qui ont été posées, lors de la mise en place du bouchon en béton, à la sortie des galeries importantes qui constituent des émergences de la nappe lors de la remontée (elles ne doivent pas être obturées, sinon le réseau peut se mettre en charge et la galerie débouurer soudainement un jour). Sur l'ensemble du site minier, il importe aussi de maintenir en état de fonctionnement les conduites et canaux de collecte et de dérivation des eaux de ruissellement. Dans le cas d'une mine équipée d'une laverie

de traitement du minerai, on a parfois intérêt à conserver en état le réseau de forages piézométriques qui permettra de continuer à surveiller l'imbibition des fines de laverie derrière la digue à stérile et leur stabilité. Sont également inclus dans ces équipements fixes, les dispositifs de mesure des gaz si la mine en produit, les dispositifs de pompage, les dispositifs de surveillance thermographique dans le cas de terrils de charbon. Le cas des mines d'uranium est particulier, avec le besoin de maintenir, même après l'arrêt de la mine, le dispositif de surveillance de la qualité de l'air, celui de surveillance dosimétrique de la radioactivité, du radon, etc. Si une station météo et des pluviomètres existent, il sera nécessaire de les maintenir en état car les risques de pollution de l'air peuvent être accrus selon les conditions météo. On veillera aussi, précaution élémentaire, à l'entretien des clôtures et du dispositif de signalisation (remplacer les panneaux de danger s'ils sont volés ou rouillés). Dans le cas où des risques d'instabilité sont déjà connus, sont mis en place des dispositifs de surveillance sismique, des réseaux de surveillance topométrique pour diagnostiquer à l'avance les affaissements. Les terrils, en particulier, sont parfois équipés d'instruments de mesure et de balises pour permettre de surveiller leur stabilité et leur température. Il ne faut pas oublier d'assurer, s'il le faut, la maintenance de l'accès routier au site. Cela va de la simple piste pour les pompiers jusqu'à l'entretien de certains des anciens accès par puits, comme à Gardanne, l'accès aux pompes de sécurité qui se trouvent dans ces puits, et à la galerie de la Mer (Fig. 3-4) qui sert d'évacuation naturelle des eaux du bassin.

Les installations dites hydrauliques comprennent les bassins de décantation à la sortie des galeries ou de la laverie, la station de traitement des eaux s'il en faut une (pour le traitement des eaux d'exhaure obtenues par pompage ou des émergences naturelles de la nappe qui baigne les travaux miniers souterrains), ou les bassins de traitement, s'il y en a, pour la neutralisation du pH acide, la floculation du fer etc.

### Développements méthodologiques

Outre les investigations géophysiques à caractère méthodologique évoquées précédemment, les développements en France ont surtout porté, d'abord, sur la compréhension des phénomènes de type affaissement du point de vue de la mécanique des roches. Avec l'apparition des premiers sinistres liés à la remontée des eaux après l'arrêt des pompages, on s'est penché aussi sur la modélisation des conséquences hydrogéologiques de la remontée de la nappe dans les chambres souterraines et leur mesure. La sortie au jour d'eaux à pH acide chargées en métaux lourds a motivé des études pour mieux comprendre, modéliser, mesurer et traiter les phénomènes hydro(bio)géochemiques notamment l'impact des eaux d'exhaure (pompage) ou d'émergence (écoulement naturel : drainage minier acide en particulier. L'arrêt simultané des grands bassins miniers dans toute l'Europe de l'Ouest s'est accompagné, chez nous comme chez nos voisins, d'un examen de la réglementation nationale au regard des textes

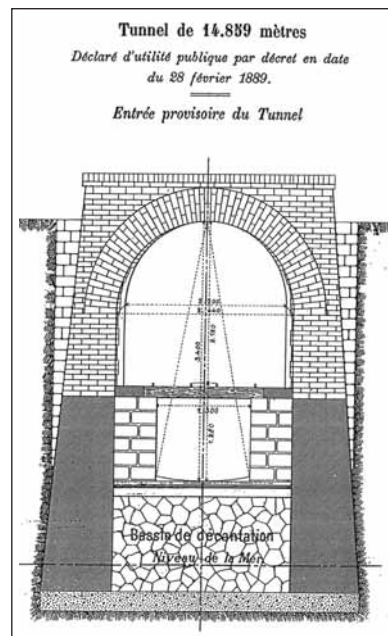


Fig. 3-4 : Portail d'entrée de la galerie de la mer, l'installation de sécurité sûrement la plus emblématique de France, qui sert à l'évacuation des eaux des mines de lignite de Gardanne, sur le quai du port de Marseille (plan d'époque).

européens. C'est un domaine sensible et en constante mutation. On a aussi approfondi la connaissance des résidus miniers de tous types (stériles, haldes, tailings...), la caractérisation de leur dangerosité et la recherche de leurs possibilités de recyclage ou de traitement. Il en a découlé l'établissement de cartes d'aléa « pollution des eaux et des sols » dans le cadre de PPRM (Plans de Prévention des Risques Miniers). Enfin, un axe transversal a été développé, appliqué à la gestion des conséquences de l'après-mine. Il inclut la connaissance des impacts sur le milieu naturel et humain (les hommes, leurs aménagements, les fonctions sociales...), les procédures de prévention et les termes de réhabilitation ou de réaménagement.

### Études informatives, cartographie et évaluation des aléas

Les actions à caractère préventif se développent depuis quelques années aussi, sous la pression urbanistique notamment. En France, on a ainsi réalisé (GEODERIS) une première sélection de sites miniers anciens où la présence de vides souterrains sous des infrastructures (routes, voie ferrées) ou des groupements d'habitations (hameaux, villages, villes) fait envisager un risque accru (opérations de « scanning » de phase 1 et de phase 2). Au stade suivant, on développe à présent, en particulier à la demande des communes minières, la mise en place d'opérations dites « phases informatives ». Ces phases permettent l'établissement des cartes d'aléas par les spécialistes. Elles sont le préalable (éventuellement) aux PPRM.

Les phases informatives sont des études qui comprennent une étude sur le terrain avec recensement des désordres historiques ou actuels ; une cartographie des zones de travaux miniers en mettant l'accent sur le repérage des anciens chantiers les plus dangereux a priori pour la stabilité de la surface, c'est-à-dire exploitées par la méthode des chambres et piliers sans foudroyage ni remblayage, surtout s'ils sont à moins de 50 m de profondeur ; une évaluation des aléas et leur zonographie.

# Dossier

Les rapports de ces études sont consultés par un nombre croissant de communes minières en vue d'actualiser leur Plan Local d'Urbanisme (PLU, Fig. 3-5). Ils sont réalisés par GEODÉRIS avec le concours du BRGM et de l'INERIS. La première partie du rapport est appelée « rapport de phase informative » car elle est factuelle. La seconde est appelée « étude des aléas » (Fig. 3-6) et elle comporte une part d'interprétation des données informatives, surtout délicate lorsque les archives sur le site minier sont rares voire inexistantes. Il en ressort l'importance capitale de la recherche des archives et des plans miniers, et le bon calage de ces plans :

Cette recherche est très poussée. Elle se fait d'abord auprès des archives communales, départementales, nationales et notariales, dans les archives des compagnies minières ; procès verbaux de visite périodique des ingénieurs des mines, conservés dans les DRIRE ; rapports des accidents ; témoignages ; coupures de presse ; archives du Conseil



Fig. 3-5 : Extrait du PLU d'une commune minière délimitant, en zones à urbanisation réglementée, une bande NE-SW correspondant à un filon vertical exploité et un polygone central correspondant à une couche horizontale exploitée à moins de 50 m de profondeur.



Fig. 3-6 : Extrait d'une cartographie d'aléas de mouvements de terrain réalisée à l'aplomb d'une couche horizontale de minerai exploitée à moins de 50 m de profondeur ; les couleurs indiquent (en surface) deux degrés d'intensité de l'aléa d'effondrement localisé, dont l'origine serait des galeries (éléments linéaires) et des puits (éléments circulaires) ; doc. Brgm-GEODERIS.

Général des Mines ; archives des associations historiques ou naturalistes, des amicales de mineurs, etc. Il en ressort encore plus l'importance du catalogage et de la protection de ces archives pour la gestion des sites miniers arrêtés.

Le PPRM est prescrit par le préfet. Le service instructeur est la Direction départementale de l'équipement. Il s'agit d'une démarche d'expertise. Il n'est pas appliqué systématiquement à tous les sites miniers français mais à ceux qui sont désignés par l'administration en tant que de besoin. Il s'applique à un périmètre, un site, une concession ou un bassin minier. Une fois établi, il est soumis à la consultation des collectivités et des services administratifs concernés pendant deux mois, puis à une enquête publique. Il est alors approuvé et les servitudes correspondantes sont intégrées dans les documents d'aménagement et d'urbanisme : Schéma de Cohérence Territoriale (SCOT) et PLU. Ce processus de gestation implique de la concertation avec les élus et les citoyens. Le PPRM en apparaît d'autant comme l'instrument d'une action globale, cohérente avec la législation et pris en compte dans les documents qui guident le réaménagement des espaces post-miniers.

Dans le détail, outre un certain nombre de données informatives, il présente une série de documents graphiques où est tracé un zonage des secteurs exposés à des risques et de ceux qui n'y sont pas directement exposés mais où l'utilisation du sol pourrait provoquer ou aggraver les risques. Il visualise des zones de dispositions réglementaires homogènes. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions. Les plans de zonage et le règlement sont interdépendants et organisés pour faciliter la compréhension et l'usage du plan de prévention. Ils sont suffisamment précis de façon à être compris et applicables en termes de droit des sols.

Lorsque l'urgence le justifie, le préfet de département peut, après consultation des maires concernés, rendre les dispositions immédiatement opposables à toute personne publique ou privée par une décision rendue publique. Ces dispositions cessent d'être opposables si elles ne sont pas reprises dans le plan approuvé ou si le plan n'est pas approuvé dans un délai de trois ans.

J. FÉRAUD

## Sécurité et patrimoine

À la demande des minéralogistes professionnels et amateurs et des archéologues miniers, plusieurs élus et associations en France déplorent, depuis 1995, que le bétonnage ou le foudroyage des entrées de mines a complètement stérilisé la découverte de nouvelles espèces minérales dans les mines abandonnées, qui avait fait le renom de nos scientifiques et de notre technologie de microanalyse dans les années 60 à 80. À l'exception de rares et rapides fouilles de sauvetage, notre patrimoine archéologique souterrain, fragile et non renouvelable, ne tardera pas à disparaître sous l'effondrement inexorable des galeries, derrière les bouchons posés. Or, on déplore statistiquement *un* accident mortel en mine (d'amateur de minéraux ou de cueilleur de champignons) tous les 10 ans. C'est toujours trop ... mais c'est peu, par rapport aux accidents de la route ou de la montagne. Néanmoins, la famille qui a perdu un être aimé, même s'il a été un minéralogiste imprudent, aimerait que cela n'arrive plus jamais à personne. L'État prend donc la mesure de l'intérêt public et applique les règles de sécurité que les élus ont votées pour le bien de tous.

Certains, toutefois, de s'écrier : « pourquoi alors ne pas interdire la voiture, clôturer le Mont-Blanc et bétonner l'entrée des gouffres où tant de spéléologues se font épisodiquement secourir à grands frais ? » mais il s'agit d'un dialogue de sourds. Si l'on n'empêche pas le public

de faire toutes sortes d'imprudences en randonnée, dans les falaises ou dans les gouffres, c'est parce que la montagne, au contraire des mines, a été façonnée par la Nature ... qui n'est ni solvable, ni retrouvable. En revanche, dès que la loi flèche un responsable éventuel (un fonctionnaire ou un maire par exemple), les compagnies d'assurances savent très bien le poursuivre en responsabilité civile, et les familles de la victime, au pénal si du sang a été versé.

Les décharges volontaires de responsabilité signées par la victime n'y changent rien. Même si beaucoup d'adeptes de la spéléologie minière ont acquis une compétence quasi professionnelle, la mine n'est pas leur *métier*. Ils n'ont pas reçu une formation à ses dangers validée par un diplôme officiel. Leur assureur préférera rechercher les « sachants » (solvables) qui ont commis la faute professionnelle de laisser la galerie ouverte, plutôt que de payer les frais et la pension d'invalidité lui-même à son assuré. Pour que les lois changent, il faudrait que les règles des assurances, le principe de précaution et du risque zéro et ... les mentalités de nos propres compatriotes évoluent, ou que les adeptes de la minéralogie soient plus nombreux et certains (peu car ils se disciplinent grâce aux associations) moins imprudents et plus respectueux des propriétés privées. C'est lent mais on progresse...

J. FÉRAUD

### Le réaménagement des espaces, des infrastructures et du tissu économique et social : l'exemple du Nord-Pas de Calais

À l'orée des années 2000, en dépit de 30 ans d'intervention publique des collectivités, de l'État et de l'Union européenne, le bassin minier Nord-Pas de Calais cumule encore un passif qui freine son redéveloppement : un chômage élevé et persistant, une espérance de vie inférieure à la moyenne nationale notamment par une surmortalité due aux cancers, aux maladies de l'appareil respiratoire et à l'alcoolisme, un paysage marqué par les friches industrielles, des sites posant des problèmes de sécurité publique et de remise en état.

Il est pourtant, en France, l'ancien bassin minier le plus en avance à l'égard du réaménagement des espaces, des infrastructures et du tissu économique et social.

Dans le Nord, en effet, les pouvoirs publics et les collectivités ont anticipé ces priorités et ce, avant l'arrêt de la dernière mine en activité en décembre 1990. Ces priorités concernent l'urbanisme, la réorganisation de l'environnement, le redéploiement et le développement économique et la maîtrise des problèmes de santé publique. En Europe, l'expérience de la « Mission bassin minier Nord-Pas de Calais » (MBM) à cet égard peut être prise pour exemple.

Créée le 15 décembre 1998 par décision du CIADT (Comité interministériel pour l'aménagement et le développement du territoire), la Mission est une structure d'ingénierie partenariale, rassemblant l'État, le Conseil régional Nord-Pas de Calais, les deux Conseils généraux et l'Association des communes minières du Nord-Pas de Calais. Ses missions ont été cadrées initialement dans le volet territorial de l'après-mine du Contrat de Plan État-Région 2000-2006 : ce sont l'urbanisme et l'habitat minier, la trame verte, les grands

projets de développement, la santé, le patrimoine minier dans le cadre de la candidature du bassin minier au Patrimoine mondial de l'UNESCO (portée par l'association « BMU »), les séquelles minières, les programmes européens (INTERREG, RESCUE) et la Conférence permanente du Bassin minier.

À l'aube du Contrat de Projet 2007-2013, la MBM est pérennisée et développe de nouveaux chantiers, avec l'observation socio-économique, la coopération avec la métropole lilloise, les transports et l'urbanisme durable.

### Les chantiers emblématiques de l'après-mine

#### L'urbanisme

Dès les années 70, les acteurs ont été confrontés à la nécessité d'aménager de manière cohérente et concertée le territoire minier. Les objectifs à atteindre sont le décloisonnement du bassin et son ouverture sur les territoires qui lui sont proches, l'amélioration de son image et de

# Dossier

son attractivité, le renforcement des villes et des centres urbains, l'arrêt de l'appauvrissement de certains arrondissements, la modernisation et la diversification de l'offre de logement et le traitement d'un maximum de séquelles physiques de l'extraction charbonnière.

Depuis les années 70 et 80, le paysage urbain de plusieurs communes s'est profondément transformé. Le nombre de cités minières mises aux normes (en matière d'assainissement notamment) et de logements réhabilités a fortement progressé. De grands espaces verts et de loisirs ont été aménagés, par le biais des politiques « GIRZOM » (née en 1972), RECHAR (Programme d'Intérêt Communautaire), "friches", Pact urbain et "périmètres sensibles". Le volet "après-mine" du Contrat de Plan État-Région 2000-2006 a été complété par la mise en place des grands projets de ville (GPV) et des opérations de renouvellement urbain (ORU). Ces dispositifs ont été relayés par l'ANRU.

La politique « GIRZOM » et l'attachement des maires à ce parc de logement à vocation sociale a permis de préserver une grande partie des cités (encore plus de 70 000 logements) et de maintenir le parc dans le domaine public. Cependant, la rénovation reste avant tout une affaire de mise aux normes technique des logements. La réflexion se concentre sur la mise en place du réseau d'assainissement qui permettra de raccorder les logements et d'adjoindre, au corps principal, des WC et des salles de bains. Or, l'avenir des cités minières interroge sur la qualité du cadre de vie, l'attractivité résidentielle, la mixité sociale, le réchauffement climatique et la préservation de la qualité patrimoniale. Le parc minier constitue un outil de développement économique, social et environnemental pour l'ensemble d'un territoire.

L'ensemble de ces enjeux, nécessitant une vision globale et croisée, a constitué la feuille de route de la Mission bassin minier. Dans le cadre de la candidature du bassin minier au patrimoine mondial de l'UNESCO, dès 2003, la MBM a introduit une dimension nouvelle : en effet, jusque très récemment, la valeur patrimoniale de l'habitat minier avait été rarement mise en

avant lors des projets de rénovation, hormis quelques opérations exemplaires ayant pris en compte la dimension patrimoniale des cités minières. Or, des experts européens ont unanimement pointé l'habitat minier comme étant l'un des plus forts atouts de la candidature, par sa valeur exceptionnelle, son authenticité et son intégrité.

Une grande partie du travail mené par la Mission bassin minier depuis 2003 a permis d'engager un nouveau dialogue avec les bailleurs qui intègrent progressivement la dimension patrimoniale dans leurs plans de stratégie.

Dans ce cadre, ont été menés :

- des opérations d'assistance technique aux maîtres d'ouvrage locaux pour introduire des techniques alternatives de gestion des eaux de pluie, vecteur d'une qualification forte des aménagements, dans une vingtaine de cités depuis 2001 ;
- un inventaire qualifié des 563 cités minières de 2003 à 2006, qui a identifié 40 cités exceptionnelles, 169 cités remarquables et 354 cités témoins ;
- une série de monographies sur 17 cités minières remarquables et exceptionnelles de 2008 à 2009 ;
- le croisement de l'approche patrimoniale avec les données sociales issues de l'observatoire socio-économique de la Mission, afin de déterminer les enjeux de gestion et d'évolution du parc, en 2008-2009 ;
- une première programmation financière, en 2009 ;
- les premières réflexions sur des « cités-pilotes » (Taffin, Bruno, Provinces), en 2009.

## **L'environnement : la Trame verte et bleue du bassin minier**

Plus de 200 ans d'industrialisation minière ont fortement bouleversé les territoires de la région en laissant des empreintes profondes dans le paysage. Longtemps contre-exemple du développement durable, l'ancien bassin minier de la région s'y inscrit aujourd'hui avec détermination.

L'exploitation minière n'avait pas fait totalement disparaître les activités agricoles et les zones boisées. Depuis le milieu des années soixante-dix, une ambitieuse politique d'aménagement d'espaces verts a été

menée un peu partout dans le bassin. Les « bases de loisirs » de Wingles, de Montigny-en-Gohelle, de Condé-sur-l'Escaut, la gare d'eau de Denain, les parcs de la Glissoire, de la Clarence, de la Lawe et de la Loisine ont d'abord été réalisés sur crédits GIRZOM. Puis de grandes friches, d'anciennes fosses, des terils, ont été traités par l'Etablissement public foncier à Harnes, Oignies, Condé-sur-l'Escaut, Raismes, Lallaing, Evin-Malmaison ou Libercourt. Les départements ont cherché à préserver des espaces naturels précieux (comme le teril de Pinchonvalles à Avion) ou à créer des équipements de loisirs (centre d'Ohlain et centre d'Amaury à Hergnies). Des communes sont allées plus loin que la simple requalification de friches, en imaginant des usages récréatifs inédits (pistes de ski artificielles de Loisinord à Nœux-les-Mines, plage de Rieulay, jardins aquatiques de Raismes).

En 2000, pour accélérer cette reconquête, l'engagement des partenaires du Contrat de Plan État-Région 2000-2006 s'est traduit dans la politique dite de « Trame verte », permettant d'offrir à la population locale des possibilités de détente et de découverte de la nature – tout en protégeant la faune et la flore – et de contrer (autant que faire se peut) les pollutions des sols, de l'air et de l'eau.

Un premier schéma de la Trame verte a été initié et réalisé par la Mission bassin minier et ses partenaires (2000-2003). Depuis 2003, la Trame verte du bassin minier laisse une place plus importante à l'écosystème aquatique et devient la Trame verte et bleue dont la mise en œuvre se poursuit depuis, dans le cadre du Contrat de Projet 2007-2013.

La Trame verte et bleue s'inscrit comme une exigence de développement durable par la protection et la valorisation des espaces naturels et des espaces dégradés dans un triple souci de valorisation écologique et paysagère, de pédagogie environnementale et de développement des loisirs.

À l'appui de la mise en œuvre de celle-ci, la Mission bassin minier a proposé un **réseau d'itinéraires dédiés aux « modes doux »**. Aujourd'hui un descriptif précis des itinéraires existe

notamment sous la forme de fiches-projets pour 25 circuits identifiés. Ces circuits se mettent progressivement en place. Les études de faisabilité technique et les travaux sont lancés ou programmés par les intercommunalités en leur qualité de maîtres d'ouvrage. Trois de ces boucles (boucle des Trois Cavaliers, chemin des Galibots) sont aménagées ou en cours d'aménagement sur les territoires de la communauté de Lens-Liévin, la communauté d'agglomération d'Hénin-Carvin, la communauté d'agglomération du Douaisis et la communauté de communes de Coeur d'Ostrevent. Ces circuits ont servi de base à la conception de l'itinéraire de Grandes Randonnées de Pays® du bassin minier, (projet récemment labellisé par la Fédération française de Randonnée pédestre) dont le Topoguide® sera édité en juin 2010, et à l'itinéraire « Véloroutes Voies Vertes ». Cette politique s'inscrit dans un cadre européen (projet REVER), national (CIADT de 1998), et régional (schéma régional) et a pour objectif de créer un réseau d'itinéraires à moyenne-longue distance dédiés aux usagers non motorisés.

Enfin, la Trame verte et bleue repose sur **des pôles de loisirs de pleine nature** (existants ou à créer) structurants pour le territoire. Ces pôles sont ou pourraient être le siège d'une activité de loisirs de pleine nature de dimension communautaire voire régionale. Ils ont pour ambition de contribuer à l'attractivité du territoire et d'être exemplaires dans leur aménagement et leur fonctionnement au regard des enjeux environnementaux. **Le grand projet du parc des Îles de Drocourt (ancienne cokerie), grand parc urbain de 160 hectares**, est l'un de ces

pôles en cours d'aménagement (Fig. 3-6 a et 3-6 b).

Le parc s'articule autour d'une trame de petites îles, mosaïques de milieux interpénétrés où cohabitent à la fois jardins thématiques, grands espaces ouverts (prairies), zones humides, ainsi que des liaisons inter-quartiers et des fonctions d'accueil abritées (espace d'accueil, de sensibilisation, de restauration...).

#### **Le redéveloppement : les grands projets**

Il s'agit de concevoir ou de promouvoir de grands équipements tirant parti de la réalité physique du bassin, de son passé économique ou participant de son actuel développement. Ces équipements peuvent être de nature patrimoniale, ludique ou utilitaire.

L'objectif est de conforter le bassin minier dans son environnement régional à travers une démarche de développement équilibré de son territoire, au sein de l'Aire métropolitaine de Lille (AML) dont il est acteur à part entière. De grands projets doivent contribuer à renouveler l'image du bassin aux plans régional, national ou international et asseoir sa nouvelle vocation économique et sociale, à l'exemple de l'implantation du Louvre à Lens en 2012.

En 2000, plusieurs grands sites étaient à la recherche d'un devenir. C'est le cas de l'ancienne fosse 9/9 bis d'Oignies, d'où fut remontée la dernière berline de charbon du Nord-Pas de Calais le 21 décembre 1990. En 2002, le site est acquis par la Communauté d'agglomération d'Hénin-Carvin et requalifié par l'Établissement public foncier Nord-Pas de Calais de 2003 à 2006.

Parallèlement, la Mission bassin minier accompagne la communauté d'agglomération d'Hénin-Carvin, maître d'ouvrage stratégique, qui ambitionne de faire de ce site exceptionnel de mémoire un levier de développement au bénéfice du territoire ainsi qu'une vitrine d'excellence de la région Nord-Pas de Calais. Elle assure l'assistance à maîtrise d'ouvrage pour la conduite d'un marché de définition du projet de requalification en 2004 : l'équipe grenobloise Hérault et Arnod est retenue comme maître d'œuvre.

La priorité est de désenclaver le site, voisin de la plateforme multimodale de Dourges DELTA 3, ouverte en 2004 : la connexion au réseau autoroutier (A1-A21) est réalisée en 2007. Le projet de reconversion et de réhabilitation du site s'articule autour de trois piliers :

#### **Pilier culturel**

Profitant d'un terreau favorable grâce à la tradition des fanfares et des harmonies, et paradoxalement, pour rattraper un certain retard dans le domaine de l'enseignement de la musique, le programme prévoit le développement d'une chaîne des pratiques musicales. Il se concrétisera autour de la sensibilisation (galerie sonore, parcours, expérimentation liée aux sons), de l'éducation musicale (classes de musique), de la qualification de l'enseignement (centre de formation de musique), de la pratique et de la création (studios d'enregistrement, salle de répétition...). Enfin, le Métaphone est une salle de spectacle conçue comme un véritable instrument de musique (le bâtiment sera habillé d'une peau sonore), permettant de boucler la chaîne avec un volet ambiteux consacré à la diffusion.



Fig. 3-6 a : Avant



Fig. 3-6 b : Après

# Dossier

## Pilier patrimonial

Pour être complémentaire du Centre historique minier (CMH) de Lewarde, le projet de valorisation patrimoniale développera un parcours d'interprétation centré sur le thème de « la mine, aménagement du territoire ». Cette approche mobilisera tous les sens afin de faire comprendre à quel point cette empreinte a été forte, tant en surface qu'en sous-sol. Spécifique au bassin minier, elle sera le lien indélébile entre passé et avenir.

## Pilier économique

Un programme de développement économique s'orientera quant à lui autour de trois axes distincts. Les activités logistiques à haute valeur ajoutée trouveront des bureaux flam-bants neufs sur « Euratechnologies Business Parc », zone située entre la plateforme Delta 3 et la fosse 9/9 bis. Le tourisme d'affaires profi-

tera de conditions d'accueil attractives (hôtel, hébergement, restauration, salles de séminaire...). Enfin, les conditions d'installation sur le carreau de fosse seront optimisées, offrant 3 000 à 6 000 m<sup>2</sup> de bureaux ouverts à tous types d'activités.

## Et demain ?

Les quatre grands sites emblématiques de la mémoire minière du Nord-Pas de Calais (base 11/19 à Loos-en-Gohelle, 9/9 bis à Oignies, le Centre historique minier de Lewarde - grand musée de la mine - et le site de Wallers-Arenberg), les cités minières, les chevalements, les anciennes fosses, les terrils, les étangs d'affaissement, les "cavaliers" et petits musées de la mine... forment un tissu patrimonial à la fois bâti, naturel, minéral et culturel qui s'étend sur l'ensemble du territoire, un véritable « paysage culturel évolutif »,

socle de la candidature du bassin minier au Patrimoine mondial « UNESCO ».

L'ensemble des chantiers de la MBM contribuent à une meilleure connaissance de ce patrimoine, à la construction d'outils partagés pour préserver, aménager, gérer et valoriser ce bien. Elle est donc bien placée pour être la structure technique proposée pour la future gestion du label « Patrimoine mondial ».

L'année 2009 a marqué une accélération du processus, dans la perspective du dépôt par l'État français de la candidature du bassin minier auprès de l'UNESCO en janvier 2010.

C. BERTRAM

Directrice d'études Programmation et partenariats  
Mission bassin minier Nord-Pas de Calais

## Glossaire

SRADT : schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire.

SCOT : schéma de cohérence territoriale.

FEDER : fonds européen de développement régional.

VRD : voiries et réseaux divers.

GIRZOM : groupe interministériel pour la restructuration des zones minières

ORU : opérations de renouvellement urbain.

GPV : grands projets de ville

RECHAR : reconversion économique des bassins charbonniers

PIC : programme d'intérêt communautaire

GIRZOM : groupe interministériel pour la restructuration des zones minières

ANRU : agence nationale pour la rénovation urbaine

SACOMI : société d'aménagement des communes minières

DREAL : direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

SDAP : service départemental de l'architecture et du patrimoine

CAUE : conseil d'architecture, d'urbanisme et d'environnement

SRI : service régional de l'inventaire

REVER : projet réseau vert européen

## La valorisation du patrimoine

Le patrimoine minier jouit d'un intérêt permanent, tant de la part des milieux scientifiques et universitaires que du grand public, des médias, des collectivités territoriales et des pouvoirs publics. Les « fleurs de mine », ces cristaux naturels de différents minerais, nous fascinent tous. Les musées et autres centres de connaissance et d'éducation se multiplient. C'est sans doute, d'abord, parce que les anciennes mines permettent au public de visualiser, comme les mines et carrières en activité, l'importance pour chaque civilisation, au fil des siècles, de l'industrie minière, essentielle pour les activités humaines



Fig. 3-7 : L'ancien bâtiment de la direction des mines de plomb de Pontpéan (Ille-et-Vilaine) inscrit à l'inventaire des monuments historiques : le classement facilite (en principe) la restauration mais le danger de chute de pierres subsiste (photo Féraud).

(Fig. 3-7), et d'évoquer les techniques ingénieuses inventées par l'homme pour extraire et fabriquer le métal (Fig. 3-8).

Toutefois, dans les années 70, succédant aux musées « capharnaüm » où seul le spécialiste et l'enseignant retrou-



Fig. 3-8 : Il est miraculeux de trouver sur le carreau d'une ancienne mine des matériels épargnés par les ferrailleurs : joie de l'archéologue et de l'amateur de patrimoine, cette ancienne laverie de plomb (mine de La Finosa, Ghisoni, Corse) est néanmoins une friche industrielle, source potentielle de pollution ou d'accident pour le promeneur novice et elle devra (sauf si un repreneur en prend la responsabilité) être détruite (photo J. Féraud).

vaient le fil conducteur, une nouvelle génération de musées est apparue. Suivant la mode des parcs américains, on a créé des « espaces de découverte » où le visiteur se laisse « entraîner par une histoire » que le scénographe lui raconte et lui fait partager. Dans les années 90, les espaces dédiés plus spécifiquement au patrimoine industriel ont encore franchi une nouvelle évolution : dans les objectifs qui s'imposent à ces espaces (qui restent en partie des lieux de mémoire), il n'est plus question de préserver l'ensemble des témoins désuets du passé mais plutôt de concevoir une nouvelle manière de vivre avec des racines solides dans le passé. La valorisation patrimoniale des anciens bassins miniers n'est donc plus seulement un exercice "conservatoire", mais un acte de citoyenneté, un acte social fondant la solidarité des hommes. Il ne s'agit plus seulement de protéger, étudier et conserver le patrimoine géologique, mais aussi d'inculquer aux jeunes le goût pour les métiers scientifiques et techniques et le respect de l'environnement. En outre, cet exercice doit créer ou recréer un lien entre générations, entre petits groupes, entre communautés. Globalement, il doit avoir une dimension pédagogique forte en direction des enfants, les adultes de demain (Fig. 3-9).

Par l'entretien de la mémoire des sites, de leur signification historique, économique et humaine, ces « musées » rappellent aux visiteurs leurs racines. Par leur approche éducative et ludique, ils contribuent à la gestion des territoires, notamment d'un point de vue touristique. Ils retiennent aussi certains liens, qu'ils soient sociétaux, environnementaux ou terri-

toriaux, entre les générations, notamment dans les grands bassins miniers arrêtés où un effort de reconversion important a été effectué. Comme le soulignait le magazine *Géosciences* dans son numéro 7/8 de mars 2008, l'ancienne mine, la « mine d'autrefois », est devenue, par ses multiples déclinaisons, une « mine de toujours », un lieu d'excursion dominicale, de visite culturelle, de recherche scientifique, de passion, voire de sport physique (spéléologie, randonnée) et un élément d'aménagement du territoire.

Le Centre historique et minier de Lewarde dans le Nord-Pas de Calais, les Géo-Parcs que l'on peut visiter en Espagne (Géoparc du mercure sur l'ancienne mine d'Almaden), en Slovénie (mine de mercure d'Ildria), en Sardaigne (toute une série de sites miniers réaménagés aux quatre coins de l'île et gérés en réseau) et au Portugal, réalisés avec

la collaboration d'INTERREG et de l'UNESCO, sont exemplaires à cet égard.

En France, pour l'argent et le plomb, plusieurs musées miniers sont remarquables (cf. *Géochronique* n°102, 2007, p. 41). Pour le cuivre, celui de Cap Garonne (Var) établi dans un site splendide dominant la mer, vaut le voyage. Citons encore ceux du charbon à Gréasque (Bouches-du-Rhône), le carreau Wendel (Moselle), Faymoreau (Vendée), la mine témoin d'Alès (Gard) et Cagnac les Mines (Tarn) ; ceux de mines métalliques à Chaillac (Indre), le Grand filon des Hurtières (Savoie), Wolframines à Échassières (Allier), le musée de l'or de Jumilhac-le-Grand (Dordogne) et la Route du fer du Canigou (Pyrénées-Orientales). Il n'est hélas pas possible de les citer tous ici. Cela ne justifierait-il pas tout un dossier de *Géochronique* ?

J. FÉRAUD et F. TEREYGEOL



Fig. 3-9 : Affluence de touristes à la mine d'argent des rois francs, à Melle (Deux-Sèvres) pour écouter attentivement les explications de l'archéologue minier, explorer les souterrains et voir la coulée du métal (photo J. Féraud).



# Dossier

## La recherche

En matière de recherche sur l'après-mine, la France est en avance par rapport aux autres pays européens, notamment en ayant rassemblé et structuré dans une même entité, le GISOS\*, les différentes disciplines nécessaires. Les travaux de recherche du GISOS sont largement orientés par la demande administrative et sociétale et par la demande exprimée par GEODERIS et le DPSM, avec une part importante consacrée à la recherche fondamentale afin d'accéder à la compréhension des phénomènes en jeu.

Le GISOS est basé en région Lorraine mais il a un rayonnement national à travers les organismes qui le constituent et à travers des liens avec les équipes qui travaillent sur les mêmes thèmes (universités de Bordeaux, de Lille, de Limoges). Le GISOS a tissé un réseau de contacts au niveau international, en particulier à travers l'organisation des colloques Post-Mining 2005 et 2008, auxquels ont participé des scientifiques d'une vingtaine de pays. Le colloque de 2008 a été organisé avec l'IMWA (International Mine Water Association). Par ailleurs, le GISOS a des relations internationales à travers des actions propres aux organismes qui le constituent (acteurs de l'International Society of Rock Mechanics, de Eurogeosurveys, etc...).

Le programme de recherche du GISOS sur l'après-mine s'articule autour des quatre questions majeures suivantes :

- quelle est la stabilité à long terme des travaux souterrains, et quelles sont les conséquences en surface ?
- quel est l'impact des mines abandonnées sur l'eau souterraine et de surface, et sur les émanations de gaz ?
- comment détecter, reconnaître et suivre l'évolution des vides miniers ?
- comment gérer les risques liés à l'abandon des mines ?

Ces quatre questions se déclinent de différentes façons selon les particularités de chaque gisement (mine de fer, mine de charbon, mine de sel, mine métallique, carrière souterraine) et de leur mode d'exploitation (chambres et piliers, longue taille, dissolution...). Pour répondre à ces



Fig. 3-10 : Epreuve de roche équipée de capteurs acoustiques (étude en laboratoire du comportement mécanique des roches du bassin ferrifère lorrain)  
photo ENSG / LAEGO.

questions, le GISOS réalise des observations de terrain sur les sites miniers abandonnés ou en exploitation, des recherches expérimentales en laboratoire (Fig. 3-10) et des travaux de modélisation numérique. L'objectif du GISOS est de réaliser des recherches fondamentales et appliquées, de manière à ce que les résultats puissent être utiles à la collectivité. De 2000 à 2007, le GISOS s'est focalisé sur les mines de fer et les mines de sel, pour répondre à la demande exprimée par la société lorraine et les administrations. À partir de 2008, le GISOS a étendu son champ d'action au bassin houiller lorrain.

Dans le cadre de son programme de recherche, le GISOS procède depuis dix ans à de nombreuses observations et expériences, dans

des mines abandonnées ou en activité. Parmi celles-ci, on retiendra deux opérations phares :

Le site pilote souterrain de Tressange, de 2001 à 2003, a eu pour but de caractériser et de comprendre les phénomènes qui déterminent le devenir des mines de fer ennoyées. En continuité directe avec ce site pilote, le GISOS a mis en place en 2005 un dispositif d'observation complémentaire pour suivre l'ennoyage de la mine. Les mesures de déformations des galeries (Fig. 3-11), le suivi micro-sismique et micro-gravimétrique, le suivi de la composition de l'eau et des gaz ont permis d'observer l'effet de l'ennoyage sur la stabilité des terrains, sur l'évolution de la qualité de l'eau du réservoir (Fig. 3-12) et sur la variabilité des émanations de gaz. Les mesures



Fig. 3-11 : Mise en place de cannes de convergence (pilote de Tressange, mines de fer de Lorraine)  
photo Brgm.

\* [www.gisos.org](http://www.gisos.org)



Fig. 3-12 : Mesure de la qualité de l'eau autour du remblayage d'une cavité minière (mine de fer de Tiercelet, Lorraine), photo Brgm.



Fig. 3-13 : Effondrement provoqué d'une cavité de dissolution dans le sel en Lorraine (concession Solvay), photo Solvay.

micro-sismiques et de la composition de l'eau et des gaz, se poursuivent actuellement.

L'observation de 2005 à 2009, dans un gisement de sel, de l'évolution d'une cavité de dissolution jusqu'à l'effondrement provoqué (concession de Cerville-Buissoncourt, de Solvay). Le GISOS a mis en place un dispositif complet (Fig. 3-13 à 3-15) de mesures géophysiques (micro-sismique, sismique LB, hydroacoustique, micro-gravimétrie, électrique active), de mesures hydrologiques (pression, conductivité, température, composition chimique), de mesures de déformation des terrains (extensomètres, tachéomètre, GPS différentiel). L'objectif était double, d'une part observer et caractériser les phénomènes avant et pendant l'effondrement, et d'autre part, identifier les précurseurs afin d'améliorer la prévision de l'aléa lié aux cavités instables.

Le bassin houiller lorrain, en phase d'ennoyage depuis 2006, est désormais un nouveau site d'observation pour le GISOS. Les conditions particulières (profondeur jusqu'à 1250 m, mines grisouteuses) nécessitent l'utilisation d'un matériel de mesure spécifique. Les premières mesures de la composition des émanations de gaz et des profils de conductivité-température de l'eau dans les puits profonds ont été réalisés en 2009 et seront poursuivis dans les années qui viennent.

R. FABRIOL



Fig. 3-14 : Station d'acquisition de données géophysiques pour le suivi de l'effondrement provoqué d'une cavité de dissolution dans le sel en Lorraine (concession Solvay), photo Brgm.

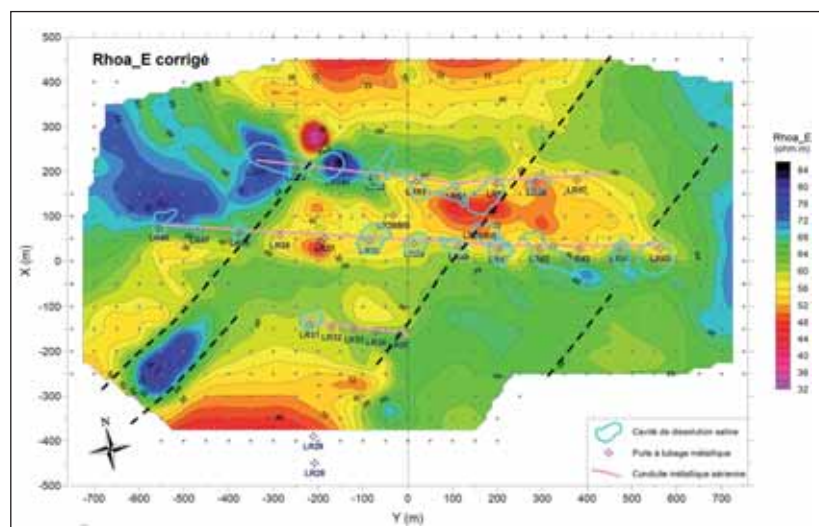


Fig. 3-15 : Carte de résistivité électrique pour la reconnaissance de cavités dans un gisement de sel exploité par dissolution (document Brgm).

# Dossier

## Conclusion

L'activité minière en métropole qui, jusqu'à ces dernières décennies, était très importante, est devenue marginale, comme chez nos voisins européens. En effet, on ne dénombre plus dans l'hexagone que 4 sites de travaux miniers souterrains en activité : Varangéville (Meurthe-et-Moselle) pour le sel, Rébesou (Gard) pour les calcaires asphaltiques, Orbagnoux (Ain) pour le bitume et Villeveyrac (Hérault) pour la bauxite. Les signaux d'une éventuelle reprise liés à quelques gisements de charbon (Bertholène, Lucenay) sont pour le moment restés sans lendemain. Cette situation de « fin de cycle » et de raréfaction d'un métier, celui de mineur, contraste avec la brutale montée en puissance des besoins que l'on a enregistrée dans le domaine entièrement nouveau auquel on a donné le nom d'après-mine.

En l'espace de quinze ans, ce domaine a pris une importance considérable et les pouvoirs publics en ont pris toute la mesure. Aujourd'hui, comme on l'a vu dans ce dossier, les missions indispensables pour le gérer efficacement et pour prodiguer aux collectivités les appuis nécessaires sont définies, financées, organisées et assurées. Elles commencent par la documentation, c'est-à-dire la connaissance, la mise en forme et l'archivage du patrimoine avec la réalisation d'inventaires aussi exhaustifs que possible, de bases de données et de SIG associés, y compris en 3D sur certaines zones.

Elles comprennent ensuite le diagnostic et la cartographie prévisionnelle, c'est-à-dire l'identification, le diagnostic et la hiérarchisation des risques (quels qu'ils soient : sécurité des personnes, effondrements, pollutions, débordements, etc.) avec la réalisation de « scannings » régionaux, puis d'études de sites sélectionnés et de cartographie d'aléas (aléas de mouvements de terrain, aléas environnementaux...). Elles englobent aussi la définition et la mise en œuvre de procédures (carto-

graphie réglementaire, PPRM) et de travaux de prévention, de protection, de réhabilitation ou de surveillance.

Elles assurent enfin l'information des populations et la gestion des crises.

Outre les risques d'instabilité du sol, la prévention, l'inventaire et la neutralisation des pollutions sont parmi les axes majeurs des actions en cours. La mine, autrefois source de puissance pour les monarques, de richesse pour les exploitants et d'emploi pour les populations, est aujourd'hui, parfois, une source de nuisances voire de sinistres et de maladies graves. Elle est donc souvent l'objet de la vindicte de tous.

Il vient à l'esprit, d'abord, le cas des grands bassins miniers (charbon, fer), ainsi que celui des friches industrielles qu'ils ont souvent laissées. Dans l'ancien bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais, de 1750 à 1990, ont été creusés environ 600 puits de mine jusqu'à 1000 m de profondeur, et près de 100 000 km de galeries pour produire environ 2,4 milliards de tonnes de charbon dont l'extraction a créé un volume de vides miniers résiduels estimé à environ 700 millions de m<sup>3</sup>. En Lorraine, plus d'un milliard de tonnes de minerai ont été extraites du bassin ferrifère, nécessitant le creusement de plus de 40 000 km de galeries et créant des vides souterrains d'un volume global de l'ordre de 500 millions de m<sup>3</sup>. Ces quelques chiffres soulignent l'importance et l'ampleur des travaux réalisés dans les grands bassins miniers français et permettent de comprendre pourquoi l'impact de ces travaux sur l'environnement a pu être considérable pendant l'exploitation : affaissements ou effondrements de la surface, modification de la circulation des eaux superficielles et souterraines, émanations de gaz de mine en surface. De plus, les installations de surface pour l'extraction et le traitement du minerai ont généralement eu un impact paysager et environnemental très important.

S'impose ensuite à l'esprit le cas de toutes les autres mines, de sel, de potasse, de différents métaux non ferreux, d'uranium etc. Leur nombre n'est pas négligeable et leur gestion pose d'autres problèmes que les grands bassins, notamment de pollution.

Seule note positive, dans plusieurs régions, il a été possible de reconvertir certains sites dans le tourisme géologique.

On aimerait clore ce dossier sensible, portant sur un des problèmes actuellement les plus graves des géosciences, sur cette perspective sereine et prometteuse, et ce afin de donner aux jeunes générations, du métier que nous aimons (de géologue minier, de directeur de mine, d'ingénieur, de porion ou de mineur), l'image positive qu'il mérite.

J. FÉRAUD et J. LAMBOTTE



Ce dossier a été réalisé grâce à la collaboration de nombreux responsables et experts de l'après-mine :

- au Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Jérôme Goellner, chef du service des risques technologiques à la Direction générale de la prévention des risques ; Serge Miraucourt, Adjoint au Chef de bureau du sol et du sous-sol à la Direction générale de la prévention des risques ;
- à la Mission bassin minier Nord-Pas de Calais, Catherine Bertram, directrice d'études Programmation et partenariats ;
- au BRGM, Jean-Luc Foucher, directeur du DPSM ; Michel Metz et Marc Saunier, directeurs successifs de l'UTAM-Centre ouest ; Jean-François Brunet, ingénieur géologue au Service Environnement et Procédés Innovants du BRGM ainsi que Dominique Darmendrail, Patrice Piantone, Francis Cottard ; Dominique Artignan, Édouard Équilbey, Anne Bourguignon, Stéphane Chevrel, Patrick Vadala du Service Ressources minérales ; Aude Nachbaur du Service Risques naturels et sécurité du stockage du CO<sub>2</sub> ;
- Robert Fabriol, président du GISOS ;
- Florian Téreygeol, archéologue minier au CNRS, ancien président de la Société archéologique française d'étude des mines et de la métallurgie.

De nombreuses informations ont été en outre recueillies, à la faveur d'expertises diverses, auprès de nos amis ingénieurs de GEODERIS à Alès, Metz et Caen et auprès des ingénieurs de plusieurs DRIRE, sur le terrain. Il n'est hélas pas possible de les citer tous individuellement.

Ce dossier a enfin bénéficié, comme tous les dossiers de *Géochronique*, du travail de relecture anonyme, ingrat mais systématique de nombreux membres, bénévoles, de la rédaction de *Géochronique*. Que tous soient chaleureusement remerciés.

Il a été coordonné par Jean Féraud, ingénieur géologue au Service Ressources minérales du Brgm et Jacques Lambotte, ancien chef du Bureau Sous-sol à la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières.

Pour en savoir plus : sites internet des organismes, et

Collection les Enjeux des Géosciences, collaboration Brgm-CdF-Mines Paris Tech-Fedem, en vente aux Editions du Brgm au prix de 12 Euros ttc.

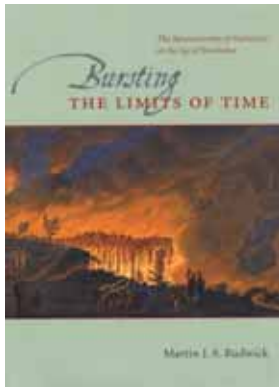


# Analyses d'ouvrages

## BURSTING THE LIMITS OF TIME THE RECONSTRUCTION OF GEOHISTORY IN THE AGE OF REVOLUTION

M. Rudwick

The University of Chicago Press, Chicago, 2005, 1 vol. rel., 18x26 cm, 708 p., ill., 48 \$ (broché 35 \$)



Saluons, certes avec retard, la publication récente d'un livre très important de Martin Rudwick, récent lauréat du prix Wegmann de la Société géologique de France, auquel l'auteur a déjà donné une suite intitulée *Worlds before Adam*. Il ne fait aucun doute que ces deux livres laisseront une empreinte durable dans l'historiographie de la géologie. Le premier d'entre eux intitulé, *Bursting the limits of*

*Time*, constitue une contribution majeure à l'étude de la naissance de ce que l'auteur appelle la « géohistoire ». Notons ici que ce titre est emprunté à Cuvier qui avait écrit en 1812, dans l'introduction de son *Discours préliminaire* : « N'y aurait-il pas quelque gloire pour l'homme à savoir franchir les limites du temps... ? ». Cet ouvrage conduit en effet le lecteur pas à pas de 1776 à 1823, c'est-à-dire depuis le premier usage du mot « géologie » par Jean-André de Luc (1778) dans son sens actuel, jusqu'à ce que l'étude de la grotte de Kirkdale fournisse à William Buckland, un demi-siècle plus tard, un argument pour faire du Déluge biblique un événement historique. On notera que la démarche de l'auteur est remarquablement graduelle, comme le souligne l'enchaînement

chronologique des titres, par tranches de quelques années. Ce cadencement très serré apporte une grande précision à l'étude de l'évolution des idées.

Ce livre est une mine inépuisable d'informations pour quiconque désire connaître par le menu les modalités du développement de la « géohistoire », ancêtre de la stratigraphie. Le texte est complété par une abondante bibliographie. Enfin, l'illustration est d'une qualité exemplaire. Autant de raisons de lire ce livre.

Notre seul regret tient à la position de l'auteur qui, à plusieurs reprises, soutient que la Bible a pu favorablement guider les travaux des savants. Cependant rien n'égale une totale liberté de penser ! Sans doute une liberté relative existait-elle en Grande-Bretagne où l'Église anglicane était proba-

blement plus libérale que l'Église catholique ne l'était sur le continent. Mais on voit mal comment la mythologie judéo-chrétienne aurait pu guider positivement les savants qui tentaient alors de déchiffrer l'histoire de notre planète. Et c'est oublier qu'en France, l'*Histoire naturelle de la France méridionale* de Soulavie fut censurée en 1780 par l'Académie qui exigea, pour lui accorder son privilège, qu'il fût expurgé de deux chapitres dans lesquels l'auteur traitait de la Création et de la physique de Moïse. Et n'oublions pas que c'est l'intervention militaire française en Italie du nord qui mit fin en 1796 à l'autorisation préalable de l'Inquisiteur général du Saint-Office qui était requise jusqu'alors!

J. GAUDANT

## PALAEOZOIC REEFS AND BIOACCUMULATIONS. CLIMATIC AND EVOLUTIONARY CONTROLS

Álvaro, J.J., Aretz, M., Boulvain, F., Munnecke, A, Vachard, D. & Vennin, E. (Eds)

Geological Society\*, Special Publication, Londres, 2007, 275 (2007), 1 vol. rel. 25x18 cm, 291 p., ill.

ISBN : 978-1-86239-221-2

Cet ouvrage résulte des publications issues de la réunion « *Climatic and Evolutionary Controls on Palaeozoic Reefs and Bioaccumulations* » qui s'est tenue à Paris au Muséum National d'Histoire Naturelle (7-9 Septembre 2005). Parmi les très nombreux sujets abordés on peut citer :

- le problème de la transition des structures entre accumulations de coquilles et récifs est traité avec des exemples illustrant toute la période ;
- pour le Cambrien inférieur, l'étude des phosphorites coquillières du versant nord de la Montagne Noire comme celle des récifs de Sardaigne ou du Haut Atlas marocain apporte des précisions nouvelles ;
- un assemblage à échinodermes, remarquablement préservé, dans l'Ordovicien du Massif armoricain offre un aspect inédit car il s'agit d'ophiures et de stylophores ;

- les fameux récifs wenlockiens de Gotland et d'Angleterre ont été abordés sous l'angle de leur marges à structure micritique ;

- une mise au point sur l'ensemble des récifs siluro-dévonien alpins est judicieusement proposée ;

- la susceptibilité magnétique est appliquée à la plate-forme ardennaise (SW Belgique) pour le Dévonien moyen ;

- à la sédimentologie des mounds carbonatés frasnien de l'Ardenne belge s'ajoute avec précision la paléocéanographie ;

- il est à noter l'importance des biostromes à phillipsastroides avec reconstitution dans le Frasnien ardennais de Belgique ;

- une vue originale des successions récifales du Famennien au Dinantien en Ardenne (Belgique) met un accent nouveau sur leur importance avant l'orogénèse varisque ;

# Analyses d'ouvrages

- au Mexique (Sonora) des formations carbonifères contiennent des accumulations pour les unes de chaetétides et pour les autres d'encrines ;
- dans le Permien de l'Oural, des communautés coelobiontiques se sont installées dans des fissures neptuniennes ;
- sur la plate-forme arabique au Permien, les récifs et carbonates de la Neotéthys témoignent de changements climatiques et océanographiques ;
- de nouvelles données biostratigraphiques, paléobiogéographiques et géochimiques sont fournies par les calcaires du Permien supérieur à la limite permo-triasique ;
- une hypothèse sur la répartition des planchers chez les tabulés est proposée comme outil possible dans l'estimation des changements paléoenvironnementaux, à partir de matériel givétien de l'Avesnois.

La diversité des thèmes abordés confirme l'actualité des travaux sur les récifs paléozoïques, avec des méthodes souvent nouvelles. Bien qu'il s'agisse de communications, l'unité dans leur expression comme la bonne qualité des illustrations (figures et photographies) doit être soulignée. L'excellente qualité des études n'empêche pas une lecture accessible. L'ouvrage peut donc s'adresser aussi bien aux spécialistes (sédimentologues et paléontologues) qu'aux étudiants (niveau master).

F. P. BIGEY

\*The Geological Society Publishing House,  
Unit 7 Brassmill Enterprise Centre,  
Brassmill Lane, Bath BA1 3JN,  
Royaume-Uni

## KOMATIITE

N. Arndt

Cambridge University Press, Cambridge, 2008, 1 vol. rel. 17,5 x 25 cm, 488 p., ill., ISBN : 978-0-521-87474-8. Prix : 75 £.\*

Le fort bel ouvrage que Nick Arndt consacre aux komatiites est particulièrement bienvenu car il comble une lacune dans la littérature scientifique. Les komatiites sont des laves dites « ultra-basiques », c'est-à-dire très magnésiennes, et témoignent de l'éruption de magmas particulièrement chauds (~1 600°C). Toutes très anciennes, elles furent, à de rares exceptions près, émises à l'époque archéenne ( $\geq 2,5$  milliards d'années). Elles ne sont, par contre, apparues que bien tardivement dans le paysage conceptuel de la pétrologie magmatique. Le traité « Igneous Petrology » de Carmichael, Turner et Verhoogen (1974), livre de chevet de tout apprenti pétrologue de ma génération, n'inclut pas l'entrée « komatiite » dans son index - fort complet par ailleurs. La publication de Viljoen et Viljoen (1969), considérée comme l'acte de naissance des komatiites, y est citée dans un court chapitre consacré aux roches ultrabasiques, assorti d'un commentaire lapidaire sur le fait

que « certain zoned peridotite bodies seem to have emplaced in a liquid state ». Cette possibilité est devenue certitude, en particulier grâce aux travaux de Nick Arndt, qui soutint sa thèse en 1975 sur des komatiites sud-africaines. Nick Arndt a donc largement participé au renouveau du concept de laves ultrabasiques, tant critiqué par l'intelligentsia des années Bowen.

L'importance de cette découverte dépasse de très loin le cercle étroit des pétrologues. Elle concerne la Terre dans sa globalité, qu'il s'agisse de son histoire thermique, des grands cycles géochimiques qui ont conduit à la formation du manteau, de la croûte, de l'hydrosphère, de l'atmosphère, et donc de la vie, sans oublier la formation de certains gisements métalliques clefs pour notre industrie. « Komatiite » nous offre donc une synthèse écrite de la plume d'un des principaux acteurs de cette aventure scientifique. Et quelle plume ! « Komatiite » est bien plus qu'un ouvrage aride que

l'on consulte, mais une œuvre passionnante, superbement écrite, dans laquelle on s'immerge et dont on a du mal à s'extraire. Un livre qui nous invite à un voyage dans le temps et nous aide à imaginer des paysages qu'aucune créature terrestre n'a eu le bonheur de contempler, mais que Dante eût pris plaisir à dépeindre.

La structure de l'ouvrage est d'une grande clarté. La première partie reste très factuelle et s'appuie sur des études de cas illustrées par de superbes photographies d'affleurements et de lames minces, ainsi que sur des diagrammes géochimiques d'une grande lisibilité. La seconde partie, dont certains chapitres ont bénéficié du concours de Steve Barnes et de Michael Lesher, aborde les processus physico-chimiques au-delà des spécialistes, elle intéressera toute personne s'interrogeant sur le lien entre les komatiites et la dynamique terrestre. La plupart des chapitres sont rédigés sous forme de synthèses relativement neutres quant

aux vifs débats internationaux entourant le concept de laves ultrabasiques. D'autres chapitres, au contraire, entrent de plain-pied dans des polémiques anciennes ou plus récentes sur la nature extrusive des komatiites ou concernant le rôle de l'eau dans leur genèse. Nick Arndt a l'élégance de ne jamais faire preuve de mépris ou de condescendance vis-à-vis d'idées qu'il ne partage pas, mais au contraire expose les arguments qui leur ont donné le statut de théories scientifiques à part entière.

« Komatiite » va sans nul doute occuper une place de choix dans les bibliothèques des laboratoires de Sciences de la Terre et devenir un des livres de chevet d'une nouvelle génération d'étudiants, pour les décennies à venir.

G. CEULENEER

\* Cambridge University Press,  
The Edinburgh Building,  
Shaftesbury Road,  
Cambridge CB2 2RU,  
Royaume-Uni.

# Analyses d'ouvrages

L'ENQUÊTE DU REGENT 1716-1718 - SCIENCES, TECHNIQUES ET POLITIQUE  
DANS LA FRANCE PRÉ-INDUSTRIELLE

Ch. Demeulenaere-Douyère et D. J. Sturdy

*De Diversis Artibus Tome 83 (N.S. 46)*, Brepols publishers, Turnhout, Belgique, 2008, 1 vol. rel. 16 x 25 cm, 1018 p., ill.

ISBN : 978-2-503-52817-5. Prix : 100 € \*



Une fois n'est pas coutume : d'abord un grand merci à la personne qui m'a demandé cette analyse d'ouvrage. Comme sont toutes les analyses de *Géochronique*, elle avait en effet ciblé ma personne en raison de mes compétences supposées. Pourtant,

que ce gros ouvrage s'annonçait soporifique ! Eh bien, il s'avère une « mine » de renseignements inédits, et je me dépêche de la signaler.

Le Régent, c'est Philippe II d'Orléans un prince érudit désigné par le gouvernement à l'avènement du jeune adolescent Louis XV pour faire un bilan des ressources minérales de la France. Le livre retrace les circonstances qui ont mis ce recensement (un bilan d'inventaire minier, dirions nous aujourd'hui) à l'ordre du jour. Cet inventaire se déroule en 1716-1718, c'est-à-dire (soulignons-le !) 50 ans avant les Lumières et l'Encyclopédie.

L'enquête recense toutes les exploitations en cours, les installations de traite-

ment et les fonderies et surtout les découvertes de gîtes métallifères de la France à cette époque et leur potentiel supposé. C'est ainsi que, s'agissant des mines de fer d'Allevard voire même (à vérifier) de la mine d'or de La Gardette en Oisans, nous apprenons des faits absolument inédits sur l'avancement des recherches dès cette époque, alors qu'on pensait par exemple, que la découverte de La Gardette ne datait que de 1763, soit 50 ans plus tard.

Le livre passe en revue toutes les régions du royaume où, à l'époque, étaient connues des recherches et des ateliers. Une solide introduction replace cet inventaire dans l'histoire de

l'Académie des sciences et du mouvement d'idées qui aboutira, plus tard, au siècle des lumières.

Outre le contenu de l'enquête, parfaitement insoupçonné jusqu'alors, l'analyse historique qui en est faite, la qualité de l'édition et des illustrations, un index des noms de personnes et des noms de lieux font de cet ouvrage un auxiliaire indispensable des historiens, géographes, archéologues miniers, des paléométallurgistes et des géologues.

J. FÉRAUD

\* Brepols Publishers NV,  
Customer Care  
Department, Begijnhof 67,  
B-2300 Turnhout Belgique,  
[www.brepols.net](http://www.brepols.net)

BIOGEOCHEMICAL CONTROLS ON PALAEOCEANOGRAPHIC ENVIRONMENTAL PROXIES

W.E.N. Austin et R.H. James

*Geological Society\**, *Special Publication*, 303, Londres, 2008, 1 vol. rel. 17,5 x 25 cm, 192 p., ill. ISBN : 978-1-86239-257-1

Cet ouvrage recueille une sélection de travaux présentés au congrès « Biogeochemical control on Palaeoceanographic Proxies\*\* » organisé par la « Geological Society » qui s'est tenu à Londres en octobre 2005. Le volume qui en résulte est multi-auteurs, avec une prédominance d'auteurs britanniques. Il est organisé en 11 chapitres, sous forme d'articles. Sept d'entre eux se focalisent essentiellement sur les foraminifères. Le style des articles est assez hétérogène : certains articles sont très généraux alors que d'autres sont plus spécifiques et présentent des données inédites. Le fil conducteur des articles est la discussion de certains « proxies » biologiques et géochimiques utilisés pour les reconstitutions paléoclimatiques et paléoenvironnementales et les défis qui doivent être surmontés pour obtenir un enregistrement plus fiable. Ces derniers incluent : une meilleure compréhension des mécanismes de contrôle de la biominéralisation ; une évaluation plus précise de l'impact des effets vitaux et de la diagenèse, qui peuvent avoir altéré sinon effacé le signal primaire ; une meilleure

connaissance de l'écologie des organismes utilisés ; la validation et la calibration des proxies grâce aux cultures ou à l'échantillonnage *in situ*, lorsque les caractéristiques chimiques et physiques de l'eau sont surveillées ; le développement de nouvelles méthodologies et instrumentations analytiques.

Cet ouvrage s'adresse à un public spécialisé, chercheurs, doctorants et étudiants au niveau master, dans un domaine qui combine la paléontologie, la géochimie et la paléocéanographie. Il donne un aperçu particulièrement intéressant, bien que non exhaustif, de l'état de l'art des proxies les plus fréquemment utilisés pour retracer l'évolution du système océan-climat.

A. BARTOLINI

\*The Geological Society Publishing House,  
Unit 7 Brassmill Enterprise Centre, Brassmill Lane,  
Bath BA1 3JN, Royaume-Uni

\*\*proxy : marqueur, dans le sens du titre de l'ouvrage marqueur du paléoenvironnement et du paléoclimat.

# Analyses d'ouvrages

## ET LE SINGE SE MIT DEBOUT

**B. Senut Avec M. Devillers, Préface d'Y. Coppens**

*Bibliothèque Sciences*, Albin Michel\*, Paris, 2008, 1 vol., 183 p., 14 x 22,5 cm, 183p. ill. ISBN : 978-2-226-18702-4 Prix : 15 €

Avec la réalisation de cet ouvrage original, Brigitte SENUT, professeur de paléontologie au MNHN, a eu l'excellente initiative de présenter une nouvelle synthèse, sur les dernières mises à jour qui touchent nos origines africaines, et de nous faire découvrir en véritable exploratrice qui a vécu en même temps sur le terrain des aventures passionnantes, parfois difficiles, mais inattendues. Ce récit est surtout une mise au point très claire et très didactique de recherches effectuées dans des régions souvent difficiles d'accès sur le plan géographique et sur le plan humain. Ces prospections ont été menées en équipe pluridisciplinaire, dirigée par l'auteur, en Afrique équatoriale et australe. Ce type de campagne s'est montré très enrichissant, grâce aux contacts avec une population de culture très différente de la nôtre. La lecture de l'ouvrage nous offre surtout une contribution à la reconstitution de l'arbre généalogique de nos ancêtres dans la mesure où le travail de terrain fait appel à la mise en application de techniques modernes variées et fiables. La biologie moléculaire est l'une de ces méthodes. Brigitte SENUT l'évoque en insistant toutefois et, à juste, titre sur les limites de la comparaison entre molécules lorsqu'il s'agit de périodes lointaines.

L'analyse des os reste parmi les recherches à privilégier. Il en est de même de l'étude des paléoenvironnements, décrite dans le livre, qui justifie la grande aventure dans laquelle l'équipe s'est lancée.

L'ouvrage de Brigitte SENUT est particulièrement riche car tout en permettant au lecteur d'apprécier le travail du chercheur sur le terrain, avec ses difficultés et ses satisfactions, il offre dans un langage scientifique simple à la portée de tous, une très intéressante description sur nos origines et notre évolution.

Ce récit passionnant peut être facilement lu par tout public. Il mérite d'être connu car il a tout à fait sa place dans nos bibliothèques.

J.-C. MISKOVSKY

\*Albin-Michel, 5 allée de la 2<sup>e</sup> DB, 75015 Paris



## MÂCHEFERS D'INCINÉRATION D'ORDURES MÉNAGÈRES - ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES

**P. Piantone et E. Autret**

*Série environnement et sécurité*, Dunod<sup>1</sup> - Belin<sup>2</sup> - BRGM Paris/Orléans<sup>3</sup>, 2008, 1 vol. rel. 18 x 25 cm, 235 p., ill. ISBN : 978-2-10-051773-2

L'ouvrage proposé est une synthèse sur les connaissances acquises sur les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM). Il constitue un état des lieux des connaissances sur les pratiques actuelles et présente une analyse des usages en vigueur. Dans un premier temps, les propriétés physico-chimiques et écotoxicologiques des MIOM sont évoquées mettant ainsi en exergue le comportement particulier des MIOM. Par la suite, les traitements et améliorations possibles de la qualité technique des MIOM sont abordés selon les différentes techniques en vigueur : stabilisation

par ajout de liants (hydrauliques ou carbonés), traitement des métaux par ajout d'argile ou de phosphates et traitement des sulfates par ajout d'alumine réactive sont notamment évoquées. La question délicate de l'échantillonnage d'un gisement de MIOM, du fait de leur hétérogénéité est ensuite relatée. Le statut législatif et les caractères techniques liés aux installations de maturation et d'élaboration des MIOM sont ensuite décrits. Des exemples d'utilisation en génie civil et confortement de carrière sont évoqués. Des éléments concernant l'impact environnemental des MIOM et les méthodes

existantes pour évaluer cet impact sont décrites, avec un rappel concernant la méthode d'analyse du cycle de vie. Enfin les derniers chapitres permettent de rassembler des informations relatives au retour d'expérience international et de donner certains repères économiques concernant ce domaine.

Ainsi, cet ouvrage donne au lecteur, qu'il soit spécialiste ou néophyte, une vue d'ensemble complète sur la problématique de l'utilisation des MIOM. Cette vue d'ensemble est assez large puisqu'elle couvre à la fois des domaines techniques ou plus généraux. L'avantage

de l'ouvrage est de réaliser une analyse complète de la filière en un volume assez restreint (235 pp). Par ailleurs, la bibliographie, fournie à l'issue de chaque chapitre, permet au lecteur d'approfondir les notions abordées dans le corps de texte.

S. DENUYS

<sup>1</sup> Éditions Dunod, 5 rue Laromiguière, 75005 Paris

<sup>2</sup> Éditions Belin, 8 rue Férou, 75278 Paris cédex 06

<sup>3</sup> BRGM éditions, 3 avenue Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans cédex 2



# Analyses d'ouvrages

## LES FOSSILES TÉMOINS DU DÉLUGE

**Johann Jakob Scheuchzer, Présenté par Jean Gaudant, Traduit par Geneviève Bouillet**

Collection *Histoire et sociétés*, Presses de l'école des Mines\*, Paris, 2008 – Collection Histoire et Sociétés, 1 vol., 159 p.

ISBN : 978-2-35671-009-3

Le titre de cet ouvrage, paru à la fin de l'année 2008, peut paraître déconcertant alors que l'année 2009 a été l'occasion de fêter l'évolution, avec la célébration du bicentenaire de la naissance de Charles Darwin et des 150 ans de la parution de *L'Origine des espèces au moyen de la sélection naturelle ou la lutte pour l'existence dans la nature*. Jean Gaudant nous offre en fait l'occasion de découvrir, grâce à la première traduction en français de deux textes de Johann Jakob Scheuchzer, publiés en latin au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, que ce médecin et naturaliste zurichois était un précurseur.

Le premier texte *Piscium querelae et vindiciae*, MDCCVIII (Doléances et Revendications des poissons) permet à Johann Jakob Scheuchzer d'exprimer avec certitude que les poissons fossiles qu'il observe ne résultent pas de l'action de « la merveilleuse Nature joueuse » mais sont, bel et bien, des restes d'organismes vivants qui seraient morts lors du Déluge, puis, ensuite pétrifiés. Le fait qu'il défende la thèse du Déluge pour expliquer l'existence des fossiles a facilité l'acceptation de l'origine biologique des fossiles puisque son explication non seulement ne défie pas les textes sacrés mais au contraire les consolide.

Le deuxième texte *Homo diluvii testis*, MDCCXXVI (L'Homme témoin du Déluge) est l'occasion d'étayer sa démonstration. En effet, la découverte d'un fossile humain confirme que les fossiles avaient péri lors du Déluge. Un siècle plus tard, Cuvier montre que l'homme témoin du Déluge était en réalité une salamandre géante.

L'important n'est pas que Johann Jakob Scheuchzer ait été créationniste. Ses contemporains étaient également créationnistes. A cette époque, toutes les explications concernant le vivant faisaient appel à la Création étant donné que jus-

qu'à la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, la conception de l'espèce, héritée de celle de Platon et d'Aristote, était créationniste et souvent fixiste. L'important est donc que grâce à Johann Jakob Scheuchzer, l'étude des fossiles devient, dès le début du XVIII<sup>e</sup> siècle, une discipline historique appartenant à la théologie naturelle.

L'ouvrage de Jean Gaudant comprend les parties suivantes : bref aperçu de la vie de Johann Jakob Scheuchzer ; les fossiles témoins du déluge ; doléances et revendications des poissons (1708) ; prospectus : portraits de divers poissons ; doléances et revendications des poissons (édition bilingue) ; prospectus : le squelette d'un homme noyé dans le déluge ; l'homme témoin du déluge (édition bilingue) ; de "l'homme témoin du déluge" à la "salamandre aquatique de taille gigantesque" ; épilogue.

Les textes de Johann Jakob Scheuchzer sont par ailleurs très plaisants à lire, l'auteur fait preuve d'un réel humour, ne serait-ce que dans le titre du premier texte ou lorsqu'il prend à témoin le lecteur au cours de ses démonstrations avec par exemple « *Quis negabit, vixisset, et adolevisse aliquando hoc corpus ? Quis allium audet producere fabrum praeter DEUM ?* » (Qui nierait qu'un jour ce corps a vécu et s'est développé ? Qui ose présenter un autre artisan, sinon DIEU ?).

Un grand merci à Jean Gaudant pour avoir rendu accessibles les textes de Johann Jakob Scheuchzer grâce leur traduction en français.

D. GROSHENY

\*Les Presses de l'École des Mines de Paris,  
60 bd Saint-Michel,  
75272 Paris Cedex 06, FRANCE

## LES ÉRUPTIONS VOLCANIQUES

**J.-M. Bardintzeff et C. Lesclingand**

Éditions DPF, Paris, 2009, 1 DVD, Durée 15 min. Réf. 24122. Prix : 32 € \*

Rouge, gris, noir et blanc : telle est la couleur des volcans. La couleur de leurs émissions est en effet le guide retenu par ce court film (12 minutes et demie) pour esquisser une typologie des volcans et de leurs éruptions. Sans prétentions scientifiques, il est destiné au grand public et aux élèves des lycées et collèges. Il fait

voyager le spectateur en images auprès des principaux volcans actifs du monde et lui fait découvrir ce que toute personne curieuse mais non spécialiste des sciences de la Terre aimerait comprendre quand une éruption majeure fait la une des médias.

Offrant une présentation claire des phénomènes vol-

caniques, il est accompagné d'un petit livret-guide reprenant par écrit les commentaires de l'auteur complétés par des explications scientifiques permettant d'aller au-delà des émotions suscitées par l'image.

Un certain regret de forme cependant : si le son généré par les éruptions correspond à ce que l'on

attend, la netteté moyenne de la parole du commentateur rend parfois celle-ci mal audible.

P. SOLETY

\* DPF Éditions - Diapofilm  
Multimédia,  
70 boulevard de  
Sébastopol,  
75003 Paris.  
contact@diapofilm.fr

# Analyses d'ouvrages

HISTORY OF GEOMORPHOLOGY AND QUATERNARY GEOLOGY

R.H.Grapes, D.R. Oldroyd, A. Grigelis

Geological Society\*, Special Publication, 301, Londres, 2008, 1 vol. rel. 25,5x17,5 cm, 336 p., ill. ISBN : 978-1-86239-255-7

Cet ouvrage réunit 18 articles, présentés lors de la Conférence annuelle de l'INHIGEO (*International Commission of the History of Geological Sciences*) tenue à Vilnius en 2006 retracent les différents aspects de la géomorphologie et de la géologie du Quaternaire et l'histoire des idées sur ces sujets.

En introduction, D.R. Oldroyd et R.H. Grapes font l'historique des relations entre géomorphologie et géologie. Les dépôts peu consolidés et les blocs erratiques ont fait l'objet de diverses théories depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. En ce qui concerne les périodes glaciaires, on suit l'évolution des idées depuis le « Diluvium » et les événements catastrophiques (Cuvier), la signification des blocs erratiques (Lyell), la théorie glaciaire (Ignace Venets, 1788-1859 et Jean de Charpentier, 1786-1855), popularisée par Louis Agassiz. F.R. van Veen montre le développement des idées sur l'origine des blocs erratiques aux Pays Bas, pour la période 1770-1907, qui a débuté par l'étude du Hondsrug, près de Groningen, élévation de 70 m dont la création a été attribuée, déjà à cette

époque, à une période glaciaire.

La notion de période quaternaire a eu du mal à s'imposer, et M. Klemun fait le point sur la paternité du terme « Quaternaire » proposé en 1829 par Jules Pierre François Stanislaus Desnoyers (co-fondateur de la Société Géologique de France).

Les articles de V.R. Backer sur le « Spokane Flood » à l'est de Washington et de A.R. Orme sur les lacs pléistocènes de l'ouest des Etats-Unis, montrent les péripéties des idées de différents scientifiques pour caractériser les phénomènes conduisant à ces morphologies.

Ke Zhang relate les recherches effectuées sur les surfaces pénéplanées tertiaires en Chine, et M. Yajima montre que le concept d'une « paléo-Tokyo baie » proposée en 1913 par Hisakatsu Yabe est actuellement bien documenté.

Cette réunion, se tenant pour la première fois en Europe de l'Est, a été une bonne opportunité pour connaître le travail qui a été effectué dans les divers pays de cette région.

C'est ainsi que E.E. Milanovsky, éminent géologue russe, présente une revue des glaciations plio-

cènes et quaternaires en Europe du Nord et en Sibérie, illustrée par ses splendides dessins. Sur ce même sujet, T. Ivanova et V. Markin rappellent l'œuvre pionnière (Recherches sur la période glaciaire, 1876) du prince P.A. Kropotkin, fameux anarchiste communiste, qui avait fait ses observations en Sibérie et en Scandinavie (et a pu écrire ses ouvrages lors de ses divers séjours en prison).

A. Gaigalas documente le développement de la recherche dans les pays baltes, et avec M. Graniczny, J. Stakunas et H. Urban rend hommage à l'œuvre de Ceslovas Pakuckas, sur la glacio-morphologie en Lituanie et en Pologne. Le travail de Valerija Cepulyte, qui fut la première femme en Lituanie à soutenir un doctorat en géographie, est analysé par O. Kondratiene et M. Stancikaite.

Plusieurs articles concernent l'Australie. D. Branagan, le doyen des historiens de la géologie retrace les recherches effectuées sur le Cénozoïque d'Australie. Le géomorphologiste C.R. Twidale consacre son article à l'histoire des dunes dans les déserts du sud de l'Australie, ce qui permet d'avoir des données sur les changements de climats dans

ces régions. D. Oldroyd montre l'importance des travaux de Griffith Taylor, Ernest Andrews, principalement, mais également de W.G. Woolnough et T.E. David, sur les systèmes fluviaux de la région de Sydney. W. Mayer relate les études conduites par des expéditions britanniques et françaises (N. Baudin, L. Depuch, L. de Freycinet, ...) entre 1791 et 1836, à la découverte des dépôts pleistocènes à l'est de l'Australie. Cela a été l'objet de discussions sur l'origine de rhizolites et de bois pétrifiés dans les calcaires de Tamala ainsi que les découvertes de fossiles marins qui permettent d'envisager des fluctuations du niveau de la mer. R.H. Grapes rend hommage, à Sir Charles Cotton (1885-1870), géomorphologiste de Nouvelle-Zélande, pour ses travaux de pionnier. De même, M. Brooks montre le rôle de G.L. Adkin (1888-1964) dans la connaissance des glaciations dans le « Tararua Range » en Nouvelle-Zélande.

En conclusion, cet ouvrage d'histoire de la géologie est passionnant. Les articles qui le composent sont bien illustrés, et suivis d'une bibliographie très abondante.

F. ORSZAG-SPERBER

# Analyses d'ouvrages

THE HISTORY OF THE STUDY OF LANDFORMS,  
OR THE DEVELOPMENT OF GEOMORPHOLOGY.  
QUATERNARY AND RECENT PROCESSES AND FORMS (1890-1965)  
AND THE MID-CENTURY REVOLUTIONS

T.P. Burt, R.J. Chorley, D. Brunnsden, N.J. Cox And A.S. Goudie

*Geological Society\**, Special Publication, Londres, 2008, 1 vol. br. 16 x 24 cm, 1027 p., ill. ISBN: 978-1-86239-249-6

Le volume 4 de la monumentale histoire de la géomorphologie – *Quaternary and Recent Processes and Forms (1890-1965) and the Mid-Century revolutions* – poursuit l'œuvre admirable entreprise par R.J. Chorley, R.P. Beckinsale et A. Dunn au début des années 1960 avec *Geomorphology before Davis* paru dès 1964 (devenu depuis introuvable mais qui vient d'être fort opportunément ré-édité chez Routledge), suivi de *The Life and Work of William Morris Davis* en 1973, puis de *Historical and Regional Geomorphology* en 1991. Cet ouvrage s'adresse donc en priorité aux spécialistes des sciences du relief, bons connaisseurs des transformations de la géomorphologie survenues depuis l'essor des approches systémiques, de la quantification et de la paléoclimatologie. Mais le livre sera aussi utile à tout spécialiste des sciences de la Terre soucieux de découvrir les origines d'une science bien plus complexe que l'image réductrice qui en est trop souvent donnée avec des binômes simplificateurs comme géomorphologie structurale / géomorphologie climatique, ou *tectonic geomorphology / process geomorphology*.

Plusieurs thèmes sont abordés : la part des contrôles structuraux, la géomorphologie fluviale (des versants élémentaires aux lits fluviaux et des vallées aux bassins-versants), les formes et processus glaciaires (y compris dans les

domaines périglaciaires), les formes et processus des autres domaines climatiques (tropiques humides, forêts, savanes, domaines arides chauds), processus éoliens et les formes associées, la géomorphologie littorale (y compris les domaines coralliens), les révolutions du milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Pour chaque chapitre, l'équipe éditoriale a fait appel à des spécialistes reconnus, ce qui confère à l'ensemble un haut niveau scientifique. Les illustrations sont nombreuses, pertinentes, et, dans le cas des portraits (photos), émouvantes ou impressionnantes. La bibliographie est abondante, non exhaustive mais complète pour les travaux majeurs en langue anglaise (et aussi dans d'autres langues le cas échéant).

Au total, il s'agit d'une somme dense, magistrale, certes non exempte d'une certaine hétérogénéité due au grand nombre de collaborateurs (plus d'une vingtaine), mais dont la consultation, facilitée par un index, sera toujours hautement profitable (il n'existe aucun ouvrage équivalent en langue française). Signalons pour finir le passionnant et percutant essai de B. Kennedy – *Inventing the Earth: Ideas on landscape development since 1740* (2005, Blackwell, 176 p.) – qui fut à Cambridge la collègue du regretté R.J. Chorley.

C. GIUSTI

LATE PALAEOZOIC AND MESOZOIC CONTINENTAL ECOSYSTEMS IN SE ASIA

E. Buffetaut, G. Cuny, J. Le Loeuff, V. Suteethorn (eds)

*Geological Society\**, Special Publication, 315, Londres, 2009, 1 vol. rel. 18 x 25,5 cm, 306 p., ill.  
ISBN : 978-1-86239-275-5. Prix: 95 £.\*

L'Asie du Sud-Est a connu une histoire complexe. Composée de plusieurs terranes d'origines gondwaniennes qui se retrouvent aujourd'hui réunies, elle appartient maintenant à un domaine laurasiatique. Cette histoire s'est inévitablement répercutée sur les flores et faunes terrestres et, depuis une trentaine d'années, la région a fait l'objet d'une certaine attention de la part des paléontologues. Les français ont pris une part importante dans cette activité récente, comme ils l'avaient fait dès le début de la phase exploratoire à

la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. L'ouvrage édité par E. Buffetaut *et al.*, même s'il inclut un historique sur certaines des premières activités dans cette zone, est consacré à des travaux récents sur la paléontologie continentale de la péninsule. Il se restreint à l'intervalle Paléozoïque supérieur-Mésozoïque, période clé pendant laquelle s'est fait le contact avec l'Eurasie, puis se sont mises en place des relations biotiques avec ce dernier continent. Il ne s'agit pas d'un ouvrage de synthèse mais d'un recueil de 19 chapitres distincts

précédés d'une introduction par les éditeurs. Une quarantaine d'auteurs ont apporté leur contribution. Réalisés par des spécialistes, ces chapitres correspondent en fait à de véritables articles.

Certains chapitres sont généraux (tectonique) ou assez généraux (affinités biogéographiques, revues de faunes), mais d'autres sont spécialisés, de nouveaux taxons étant même décrits. En dehors de l'article concernant la tectonique de l'Asie du Sud-Est, tous les autres se concentrent nettement sur le Laos et la Thaïlande et portent

essentiellement sur le Jurassique et le Crétacé, la part ayant trait au Paléozoïque et au Trias étant réduite. Les composants des écosystèmes qui sont discutés sont des végétaux (palynomorphes, arbres) et surtout des vertébrés. Ces derniers, qu'ils soient d'eau douce ou franchement terrestres, sont souvent envisagés de façon classique mais l'ichnologie, la structure osseuse et les isotopes de l'oxygène d'éléments squelettiques ont aussi été pris en compte dans la reconstitution des milieux.

En raison de la diversité des contributions, il est

# Analyses d'ouvrages

difficile de dégager une image globale, mais, parmi les résultats d'intérêt général, on notera que la région a subi un endémisme certain pendant le Jurassique et le Crétacé et qu'elle semble avoir été un centre de diversification pour divers taxons.

L'ensemble des chapitres montre que l'apport de l'Asie du Sud-Est à la paléontologie est important. Toutefois, je regrette un peu qu'aucun n'ait été consacré au Trias ; celui de Thaïlande avait beaucoup apporté il y a quelques années.

Comme pour tous les ouvrages de cette série, la qualité technique est bonne. Les illustrations sont nombreuses et l'ensemble fournit une bibliographie abondante et à jour.

L'ouvrage intéressera les spécialistes de l'Asie

du Sud-Est mais, du fait de la présence d'articles spécialisés sur divers faunes et taxons, il touchera aussi un éventail plus large de paléontologues.

J.C. RAGE

## CONTINENTAL EVOLUTION: THE GEOLOGY OF MOROCCO STRUCTURE, STRATIGRAPHY, AND TECTONICS OF THE AFRICA-ATLANTIC-MEDITERRANEAN TRIPLE JUNCTION

**A. Michard, O. Saddiqi, A. Chalouan, D. Frizon de Lamotte (eds.),**

*Lecture notes in Earth Sciences*, Springer-Verlag\*, Berlin Heidelberg, 2008, 1 vol. br. 24x16, 424 p., 235 figures.

ISSN : 0930-0317, ISBN : 978-3-540-77075-6.\*

Faut-il rappeler la place exceptionnelle du territoire marocain dans l'histoire géodynamique entre Europe, Amérique du Nord et Afrique ? En effet, si son histoire débute au Panafricain, sa structuration se complique lors de l'orogène varisque et de son incorporation au cœur de la Pangée. Situé sur le trajet de la « reconquête téthysienne » (l'Atlantique central) vers l'ouest il en a subi directement les effets. Ensuite, la fermeture de la Téthys occidentale et la convergence Afrique-Europe pendant le Cénozoïque, le déforme plus ou moins profondément une nouvelle fois.

Peut-on rêver un chantier d'étude aussi complet, aussi complexe, où la compréhension de l'héritage crustal est une des clefs de la compréhension générale de la région ? Pour cela le Maroc est certainement une des régions du globe où il est possible d'étudier des mécanismes géodynamiques de grande ampleur (crustaux et lithosphériques par exemple), dans des conditions d'affleurement exceptionnelles.

Depuis la précédente synthèse géologique de ce pays faite en 1976, de nombreux travaux ont profondément modifié les idées et les concepts. La présente synthèse arrive à point. En dix chapitres organisés dans l'ordre chronologique (du Panafricain au Quaternaire), les différents auteurs proposent une vue synthétique abondamment illustrée et une bibliographie très complète. Une conclusion très didactique récapitule les points essentiels traités dans l'ouvrage et nous appelle avec force à découvrir ou à redécouvrir la géologie du Maroc replacée dans son cadre géodynamique unique.

Le niveau scientifique élevé des divers articles (chapitres) de cet ouvrage en fait une référence incontournable pour des lecteurs avertis en sciences de la Terre (chercheurs, enseignants, doctorants). Cela ne doit pas rebuter pour autant l'amateur éclairé qui souhaite agréablement parachever sa culture.

P. VERGELY

\*Springer – Verlag GmbH & Co.KG,  
Tiergartenstrasse 17  
D-69121 Heidelber

## CORES AND CORE LOGGING FOR GEOSCIENTISTS

**Graham A. Blackburn**

Whittles Publishing, Caithness, 2009, 2<sup>nd</sup> édition, 1 vol. rel. 17,5 x 24,7 cm, 152 p., ill., ISBN : 978-1904445-39-5. Prix: 37,50 £.\*

La première édition de cet ouvrage, en 1989, a déjà été considérée comme un guide faisant autorité auprès des ingénieurs des compagnies pétrolières et géotechniques. L'auteur, profitant des énormes progrès réalisés dans ce domaine et de son expérience acquise au cours de sa carrière, enrichit cette édition en incorporant les derniers développements des techniques de forages et des interpré-

tations des résultats et des conseils très judicieux.

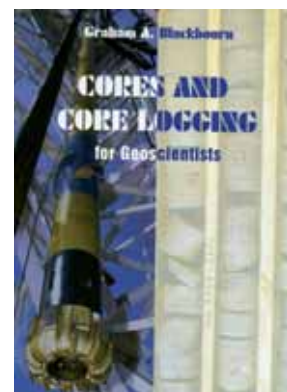
Ce livre s'adresse aussi bien aux géologues des compagnies qu'aux chercheurs et enseignants qui ont recours aux interprétations des données fournies par ces méthodes. Il comprend 6 chapitres consacrés aux méthodes de forage, d'échantillonnage, à l'interprétation des données, à la conservation et au stockage des carottes. En appendices sont indi-

qués les standards des abréviations et symboles utilisés, les équipements concernant les forages. Une abondante bibliographie et un index completent ce livre.

C'est un excellent ouvrage, pédagogique et source d'informations très utiles.

F. ORSZAG

\* Whittles Publishing,  
Dunbeath, Caithness  
KW6 6EY, Scotland,  
Royaume-Uni



# Analyses d'ouvrages

## L'INVENTION DU MASTODONTE AUX ORIGINES DE LA PALÉONTOLOGIE

P. Tassy

Pour la Science-Regards, Éditions Belin, Paris, 2009, 1 vol. br. 14,5 x 22,5 cm, 159 p., ill.

ISBN : 978-2-7011-4971-4. Prix : 18 € \*

En 1739, Charles Le Moyne, second baron de Longueuil, descend la rivière Ohio, à la tête d'un détachement militaire, pour aller jusqu'en Louisiane prêter main-forte à son oncle, en guerre contre les Indiens Chickasaw. Lors d'une halte au milieu de ces vastes territoires peu explorés, qui appartiennent alors encore à la France, dans ce qui deviendra l'état du Kentucky, des Indiens partis à la chasse découvrent des restes fossiles de gros animaux et apportent à Longueuil un fémur, une défense et des molaires. L'officier français les apportera en France en 1740, où ils prendront place dans le Cabinet du Roi.

C'est ainsi que débute une histoire longue et riche en rebondissements, où interviennent des Amérindiens anonymes, des colons français et anglais, certains des grands scientifiques des 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles, tels Daubenton, Buffon, Blumenbach et Cuvier, et des célébrités a priori plus inattendues, comme Benjamin Franklin et Thomas Jefferson, troisième président des États-Unis. À mesure de ces péripéties se dessine graduellement, avec de plus en plus de clarté, le portrait d'un mammifère disparu, le mastodonte américain, ou *Mammuth americanum*. Mais ce n'est pas seulement de

la découverte d'une nouvelle espèce fossile qu'il s'agit : comme le montre bien l'auteur, on est là aux origines de la paléontologie en tant que science, avec la mise en évidence, de façon indiscutable, du phénomène d'extinction des espèces.

Ces épisodes constituent un des grands classiques de l'histoire de la paléontologie, auquel Pascal Tassy a ajouté des pages inédites grâce à ses recherches dans les collections du Muséum de Paris. Son implication dans cette affaire ajoute une touche personnelle à son récit, qui lui permet de guider le lecteur de façon très attrayante au pays de l'herbe bleue, du Bourbon et du rock'n'roll, sur les traces de ce que l'on appela autrefois l'*incognitum* de l'Ohio.

E. BUFFETAUT

\* Éditions Belin, 8 rue Férou, 75006 Paris



## COLLISION AND COLLAPSE AT THE AFRICA-ARABIA-EURASIA SUBDUCTION ZONE

D.J.J. van Hinsbergen, M.A. Edwards & R. Govers (eds.)

Geological Society\*, Special Publication, 311, Londres, 2009, 1 vol. rel. 18 x 25,5 cm, 368 p., ill.

ISBN : 978-1-86239-270-0. Prix : 95 £. \*

Cet ouvrage rassemble 13 articles consacrés à la structuration du domaine méditerranéen en partant de l'idée que ce dernier montre une transition d'est en ouest entre une zone où la collision continentale est réalisée et une autre où celle-ci s'accompagne d'une océanisation arrière-arc.

Quatre articles apportent des contraintes spatiales et temporelles sur l'évolution du secteur anatolien du Crétacé à

l'Actuel. Le thème majeur concerne la succession des collisions arc-continent et continent-continent dans l'ensemble Anatolides-Taurides au long des sutures, dans le bassin néogène de Cankiri, et dans la région de Billis. Un article apporte des données géochronologiques nouvelles très importantes sur le volcanisme recoupé par la faille nord-anatolienne qui suggèrent un début d'activation il y a une dizaine de millions d'années et une

accélération importante il y a 2,5 Ma.

Les neuf autres articles concernent plus particulièrement les relations entre subduction, collision et collapse en Anatolie, Égée, Carpathes et mer Tyrrhénienne. Ils apportent quelques éclairages nouveaux grâce à de nouvelles données de détail : cinq profils sismiques très intéressants illustrent en particulier l'évolution des Hellénides submergées dans le détroit de Cythère.

L'ouvrage est bien illustré par de nombreuses figures de qualité ; il apporte aux spécialistes de la région une bonne moisson de données précises.

G. MASCLE

\* Geological Society Publishing House, Unit 7 Brassmill Enterprise Centre, Brassmill Lane, Bath BA1 3JN, Royaume-Uni

# Analyses d'ouvrages

## LA NOUVELLE DONNE DU CHARBON

F. Kalaydjian et S. Cornot-Gandolphe

Éditions Technip, Paris, 2009, 1 vol. br. 15 x 22 cm, 232 p., ill., ISBN : 978-2-7108-0926-5. Prix : 16 € \*

Ce petit ouvrage, qui remet sur le devant de la scène une substance que l'on avait eu tendance à oublier durant les dernières décennies, est organisé en deux parties

La première, intitulée "Le charbon, énergie du XXI<sup>e</sup> siècle", est consacrée aux aspects économiques : état des réserves mondiales et de leur répartition géographique, évolution de la production depuis 2000, perspectives à l'horizon 2030 en fonction de la demande, évolution des prix dans le contexte d'une augmentation accélérée de cette dernière en 2007 et 2008.

Quatre annexes donnent au lecteur des informations complémentaires qui lui permettent de rafraîchir ses connaissances sur la formation des charbons (annexe 1) ou d'appréhender la place qu'occupent les grands pays producteurs et consommateurs des ressources charbonnières

(États-Unis, Inde et Chine) dans le panorama mondial (annexes 2 à 4).

La seconde partie s'intitule "Des technologies pour un charbon sans émission de CO<sub>2</sub>". En effet, le revers de la médaille de l'utilisation du charbon, qui couvre 29 % des besoins énergétiques mondiaux, c'est qu'il est responsable de 40 % des émissions de CO<sub>2</sub>. Les auteurs passent en revue les différentes techniques permettant de limiter cet inconvénient majeur : capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub>, techniques de "polygénération" permettant de produire par gazéification, outre de l'électricité, de la chaleur, des carburants liquides ou de l'hydrogène, dans un nouveau type de centrale à cycle combiné dans lesquelles un traitement adapté permet de capturer le CO<sub>2</sub>.

Le dernier chapitre de cette seconde partie est consacré aux différents

procédés permettant d'obtenir des carburants liquides à partir du charbon. Les premières productions industrielles, en Allemagne, remontent à la seconde guerre mondiale. Actuellement, plusieurs projets fonctionnent ou sont en cours de réalisation, notamment en Inde, aux États-Unis et en Chine. Les auteurs présentent les différents procédés existants : liquéfaction directe par enrichissement du charbon en hydrogène, liquéfaction indirecte après gazéification du charbon.

Les annexes 5 et 6 permettent de compléter ce panorama. La première donne un aperçu d'un ambitieux programme européen de coopération avec la Chine pour la mise en place d'installations énergétiques de polygénération. La seconde concerne les projets d'exploitation du gaz méthane récupérable dans les couches de charbon.



En conclusion, un ouvrage d'actualité clair et bien illustré qui permettra d'informer les non-spécialistes sur des ressources énergétiques considérables (145 ans de réserves au rythme de production de 2005) qui pourraient être de plus en plus utilisées tout en limitant les émissions de CO<sub>2</sub> par la mise en œuvre de techniques appropriées.

Ph. LAGNY

\* Editions Technip,  
25 rue Ginoux,  
75015 Paris

## L'ESSOR DE LA GÉOLOGIE FRANÇAISE

Ouvrage coordonné par Jean Gaudant

Collection Histoire des sciences et sociétés, Presses de l'École des mines\*, Paris, 2009. 380 p.

ISBN : 978-2-911256-02-8

Les géologues français ont, depuis la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, contribué de façon très importante à l'acquisition des savoirs et au développement des concepts en sciences de la Terre. Loin d'être isolés, ils ont eu de nombreux contacts et échanges avec leurs collègues étrangers. Cet ouvrage, fruit de l'activité du Comité français d'histoire de la géologie, leur est en grande partie consacré. Il comprend deux sections. La première est une suite d'essais sur la naissance et l'évolution de la stratigraphie, de la pétrographie, de la cartographie géologique et de la géodynamique. La deuxième analyse des manuscrits inédits ; notes prises par des auditeurs au cours de G. Cuvier au Collège de France à Paris, au cours de « géognosie »

d'Alexandre Brongniart (Paris, 1813), et au cours de Brochant de Villiers à l'École pratique des mines du Mont Blanc (1810-1814), située à Pesey (actuellement Peisey-Nancroix-en-Savoie), à une époque où l'on estimait logique d'implanter une école des mines à proximité d'un gisement en cours d'exploitation !

Il n'est pas possible de procéder ici à une analyse exhaustive de tous les chapitres de cet ouvrage ; aussi nous nous limiterons à l'évocation des éléments qui nous paraissent les plus caractéristiques. Tout d'abord une large place est faite au « réseau pentagonal » d'Élie de Beaumont (M. Durand Delga et J. Touret). Ces élucubrations engendrées par une vision trop mathématique de la

# Analyses d'ouvrages

géodynamique pourraient faire sourire ; elles contiennent cependant en germe les principes de la datation des orogènes grâce aux discordances angulaires.

L'histoire de la géodynamique a été profondément marquée par le paradigme géosynclinal, auquel M. Lemoine consacre un long article. L'auteur, en se plaçant dans l'optique de l'épistémologue T. Kühn, montre que le modèle géosynclinal a longtemps été suffisant pour interpréter les faits de terrain. La longévité du géosynclinal (près d'un siècle !) est due à l'ignorance, pendant des décennies, de la nature des fonds océaniques. L'avènement de la tectonique des plaques a conduit la communauté géologique à abandonner ce paradigme ; il en reste cependant la notion de polarité orogénique.

L'article de J. Touret, au titre évocateur (De la pétrographie à la pétrologie), montre que l'étude des roches a été étroitement dépendante de la technologie : naissance et perfectionnement progressif du microscope polarisant, puis apparition dans les années cinquante de la microscopie électronique. Cette dernière a permis le passage de la

reconnaissance des minéraux à leur analyse chimique directe. Mais son utilisation a entraîné selon l'auteur la perte d'un savoir irremplaçable et donne lieu à des abus, comme de s'en servir pour identifier du quartz (sic)...

R. Medioni résume la grande aventure de la carte géologique de la France qui a débuté en 1841. La cartographie géologique, qui livre une « anatomie » du terrain au prix d'une énorme somme de travail, est dédaignée aujourd'hui. Aussi est-il utile de rappeler à travers son histoire qu'elle est la base indispensable de nombreux travaux en sciences de la Terre.

En définitive, cet ouvrage peut intéresser de nombreux lecteurs. On le conseillera particulièrement aux jeunes génies (ou qui se croient tels...) qui estiment obsolète toute référence bibliographique de plus de cinq ans ; cela leur inspirera, on l'espère, un peu d'humilité...

D. RAYMOND

\*Les Presses de l'École des Mines de Paris,  
60 bd Saint-Michel,  
75272 Paris Cedex 06

## VOLCANOLOGUE. DE LA PASSION À LA VOCATION

Jacques-Marie Bardintzeff

Éditions Vuibert\*, 2009, 1 vol. br. 17 x 24 cm, 176 p., ill. ISBN : 978-2-7117-2502-1. Prix : 22 €



Quel est le genre de ce livre et à quel public est-il destiné ? Quand on prend le volume sur le rayonnage de la bibliothèque, on est frappé par l'imagerie de sa couverture : le profil de l'auteur – tel un héros grec – sous les flammes d'un volcan jaillissant de la Terre fait songer à une épopée de science-fiction. Un survol rapide du livre, en s'arrêtant surtout sur les photos, laisse penser à un roman

d'aventures à la manière de Jules Verne ou à celle de Conan Doyle. Après une lecture attentive, la réponse à la question, fournie par l'auteur lui-même, est donnée dans le chapitre IX : « J'ai écrit pour différentes catégories de lecteurs. Des livres scientifiques de haut niveau, des livres pour le grand public, richement illustrés, des livres pour les jeunes, que j'espère aussi réussis que ceux qui m'ont fait rêver ».

L'ouvrage « Volcanologue » s'adresse sans hésitation aux deux dernières catégories de lecteurs, avec, en priorité, celle des jeunes ; il atteint clairement son objectif de susciter des rêves de découverte scientifique chez les lycéens et les étudiants, sans oublier toutefois le public des adultes qui ne connaissent pas les métiers des sciences de la Terre mais qui se passion-

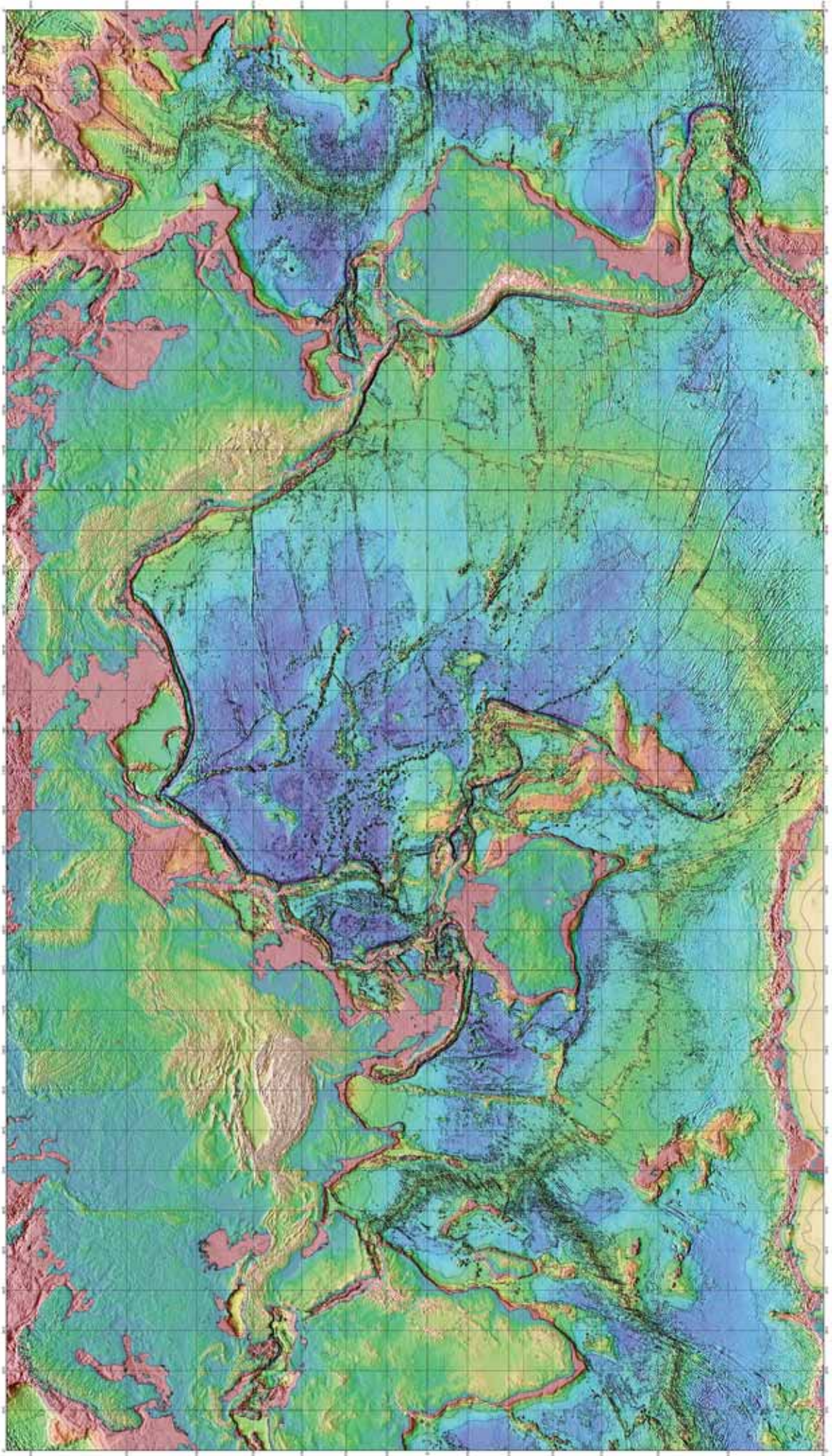
nent pour les grandes manifestations de la Nature.

Pour parvenir à son but, l'auteur prend un parti éditorial risqué : il se met en scène lui-même afin d'illustrer la vie professionnelle et personnelle d'un scientifique mu par sa passion et réalisant sa vocation. On peut s'étonner d'un tel choix, peu commun chez les chercheurs. Mais, grâce à la simplicité et à la transparence des propos, on y adhère rapidement en se laissant porter par le saute-mouton scientifique que nous propose l'auteur au gré de ses nombreuses missions de par les volcans du monde. Le premier pas est celui de la découverte par un bambin d'un cristal de calcite dauphinois ; l'un des derniers – à ce jour – est la descente d'une silhouette martienne au dessus du cratère de l'Ert'a Ale en

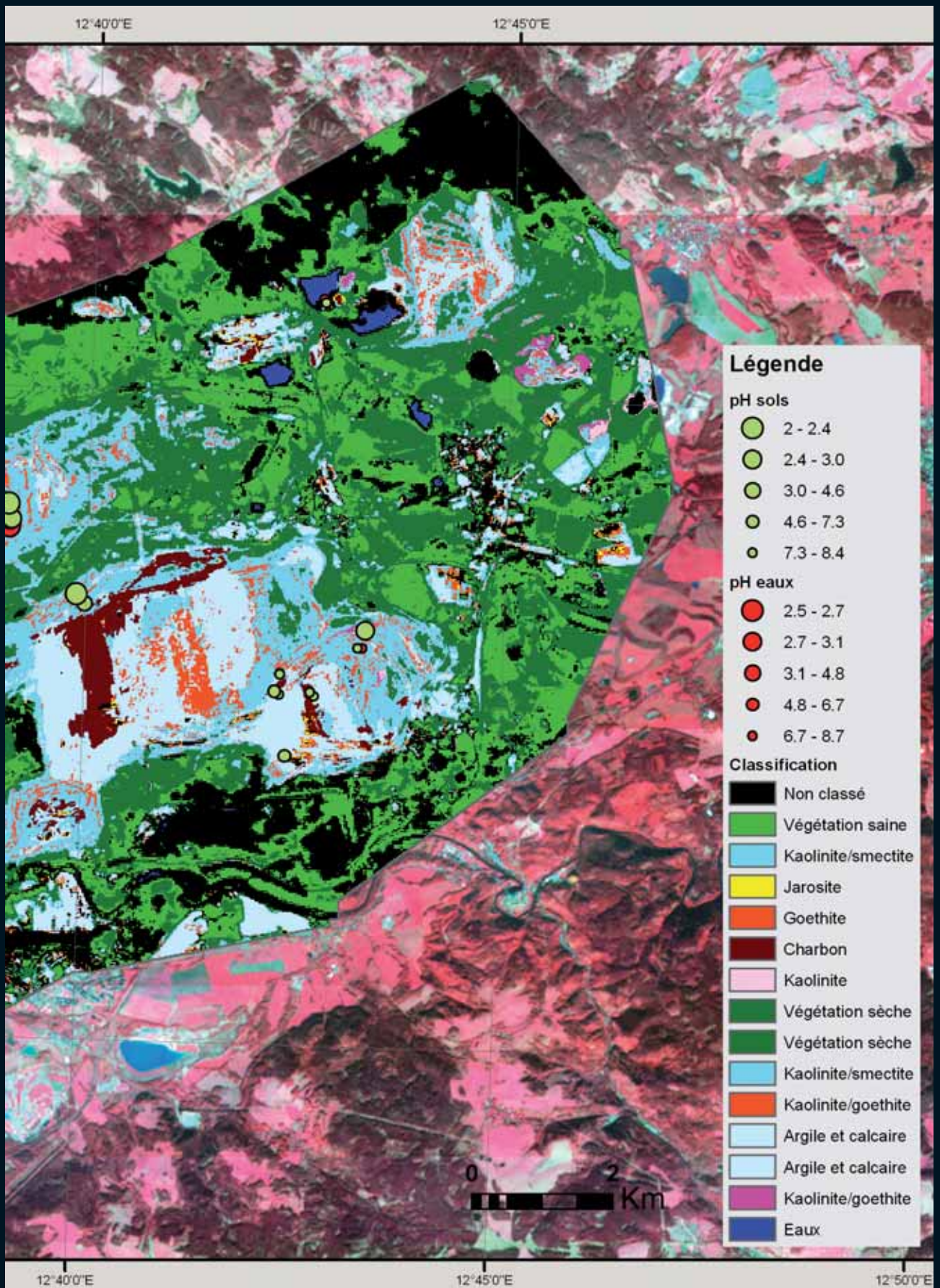
Ethiopie sous les yeux inquiets des caméras de l'émission télévisuelle Ushuaïa Nature. En général, les livres scientifiques, qu'ils soient destinés au grand public ou aux spécialistes, visent à donner une description objective du thème dont ils traitent : un observateur « neutre » décrit ce qu'il analyse en faisant comme si sa description ne dépendait pas de sa personne, considérée comme un instrument d'observation indépendant de la réalité observée ; le présent ouvrage, pour sa part, dévoile les faces cachées de l'instrument d'observation le plus perfectionné qui soit qu'est le scientifique, en l'occurrence le géologue de l'espèce volcanologue.

P. SOLÉTY

\*Éditions Vuibert,  
5 allée de la 4<sup>e</sup> DB,  
75015 Paris







Cartographie par télédétection spatiale du pH des sols et des eaux, des précipités et résidus miniers, de l'état de la végétation et des déblais de charbon sur le carreau d'une mine de lignite de Tchéquie (collaboration Brgm-Service Géologique national tchèque - mine de Sokolov)