

Copyright (c) Nadim EL GHEZAL

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

Sophie Vançon

Nadim El Ghezal

L'EAU DANS L'EXPLOITATION MINIÈRE : RESSOURCE OU DANGER ?



*Synthèse bibliographique réalisée dans le cadre du cours d'exploitation minière
de 3^{ème} année de l'option géo-ingénierie – février 2004*

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION..... | 3 |
| I – LA GESTION DE L’EAU PENDANT L’EXPLOITATION : L’EXHAURE | 4 |
| II – LES EFFONDREMENTS | 5 |
| 2.1. <i>Définition de l’ennoyage minier</i> | 5 |
| 2.2. <i>Hydraulique de l’ennoyage minier</i> | 6 |
| 2.3. <i>Intérêt de l’étude de l’ennoyage minier</i> | 6 |
| 2.4. <i>Description du processus</i> | 7 |
| 2.5. <i>Conséquences possibles de l’ennoyage en termes d’affaissement</i> | 7 |
| 2.6. <i>L’exemple du bassin ferrifère lorrain</i> | 9 |
| a. Les trois sous-bassins du bassin ferrifère Nord Lorrain | 10 |
| b. Les effets de l’ennoyage dans les Bassins centre et sud..... | 10 |
| c. Le contexte récent dans le Bassin nord | 11 |
| d. Les zones à risque du bassin nord | 12 |
| 7. <i>Le relevage des eaux dans l’ancien bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais</i> | 13 |
| III – LES DRAINAGES MINIERES ACIDES | 15 |
| 3.1. <i>Définition</i> | 15 |
| 3.2. <i>Origine</i> | 15 |
| 3.3. <i>Pollutions consécutives</i> | 17 |
| 3.4. <i>Lutte contre la pollution des DMA</i> | 19 |
| 3.5. <i>Evolution de la qualité des eaux après ennoyage</i> | 21 |
| 3.6. <i>Valorisation marginale des DMA</i> | 21 |
| 3.7. <i>Etude de cas : le bassin ferrifère lorrain</i> | 22 |
| CONCLUSION..... | 26 |
| BIBLIOGRAPHIE..... | 27 |

INTRODUCTION

L'exploitation minière d'une région n'est jamais sans conséquence sur le développement à la surface de zones bâties et peuplées et il est même assez fréquent de constater de lourds sinistres dans les régions dont le sous-sol a été intensément exploité au cours des dernières décennies ou des siècles passés. D'autre part, l'eau, ressource vitale aux véritables enjeux économiques, est un paramètre dont la prise en compte est capitale dans l'étude géotechnique et sa présence ou son absence peut entraîner de graves perturbations et instabilités du milieu.

Ainsi, nous allons étudier dans le présent document de quelles façons la gestion de l'eau est mise en place pendant et après l'exploitation minière, quel va être son impact et si elle peut être perçue comme une ressource ou comme un danger.

Afin de mener à bien cette étude, nous verrons tout d'abord à quelles fins les eaux d'exhaure peuvent être employées ; puis nous nous pencherons sur la problématique des effondrements miniers faisant suite à l'ennoyage et enfin nous traiterons dans une dernière partie le sujet préoccupant de la qualité de ces eaux d'exhaure. Tout au long de ce rapport, nous illustrerons nos propos grâce à l'étude du cas du bassin ferrifère de Lorraine.

I – LA GESTION DE L’EAU PENDANT L’EXPLOITATION : L’EXHAURE

Dans une mine, on est souvent amené à exploiter des zones situées dans la nappe phréatique. D’autre part, le creusement du réseau de galeries ou de la mine à ciel ouvert induit une modification des écoulements souterrains. Les galeries drainent l’eau des aquifères voisins et le foudroyage crée des courts-circuits hydrauliques en déstructurant le toit de l’exploitation. Ces perturbations entraînent un écoulement rapide de l’eau vers les points les plus bas de la mine, ce qui provoque une diminution du débit des sources, allant dans certains cas jusqu’à leur disparition, ainsi que la diminution locale du débit des rivières (voir figure 1.) Quand le point bas de la mine se situe au-dessus du niveau des rivières du secteur, il est parfois possible d’orienter la pente des galeries de telle façon que l’eau s’écoule naturellement vers l’extérieur. Mais dans la majorité des cas¹, il est nécessaire de pomper l’eau pour garder la mine au sec et permettre son exploitation. C’est ce qu’on appelle l’exhaure. Dans le bassin nord des mines de fer de Lorraine, l’exhaure repose sur un système complexe de drains convergents vers des albaques (réservoirs souterrains.) Ces albaques servent de réserves d’eau pour les pompes d’exhaure regroupées dans des salles souterraines à différents niveaux, jusqu’à 200m de profondeur. La puissance totale de ces pompes permet d’exhauser l’équivalent du débit d’une crue cinquantennale (environ 7m³/s.) Il est essentiel de les maintenir en parfait état de fonctionnement car, en cas de crue importante, la moindre défaillance pourrait entraîner une remontée du niveau d’eau quasiment irréversible.

L’eau d’exhaure est généralement utilisée pour l’alimentation en eau potable (en Lorraine, les eaux d’exhaure ont alimenté jusqu’à 300000 personnes, à l’apogée de l’industrie minière) et industrielle ou pour soutenir le débit d’étiage des rivières affectées par l’exploitation de la mine. On s’en sert également pour faire du remblayage hydraulique afin de réduire les risques d’affaissement, surtout en Allemagne et en Pologne. Enfin, pendant l’exploitation, une petite partie des eaux d’exhaure est bien sûr utilisée pour le traitement du minerai (flottation, lavage, transport par carbooducs...)

¹ On ne parle pas bien sûr du cas des mines de sel exploitées par dissolution, qui nécessite une injection d’eau et non un pompage.

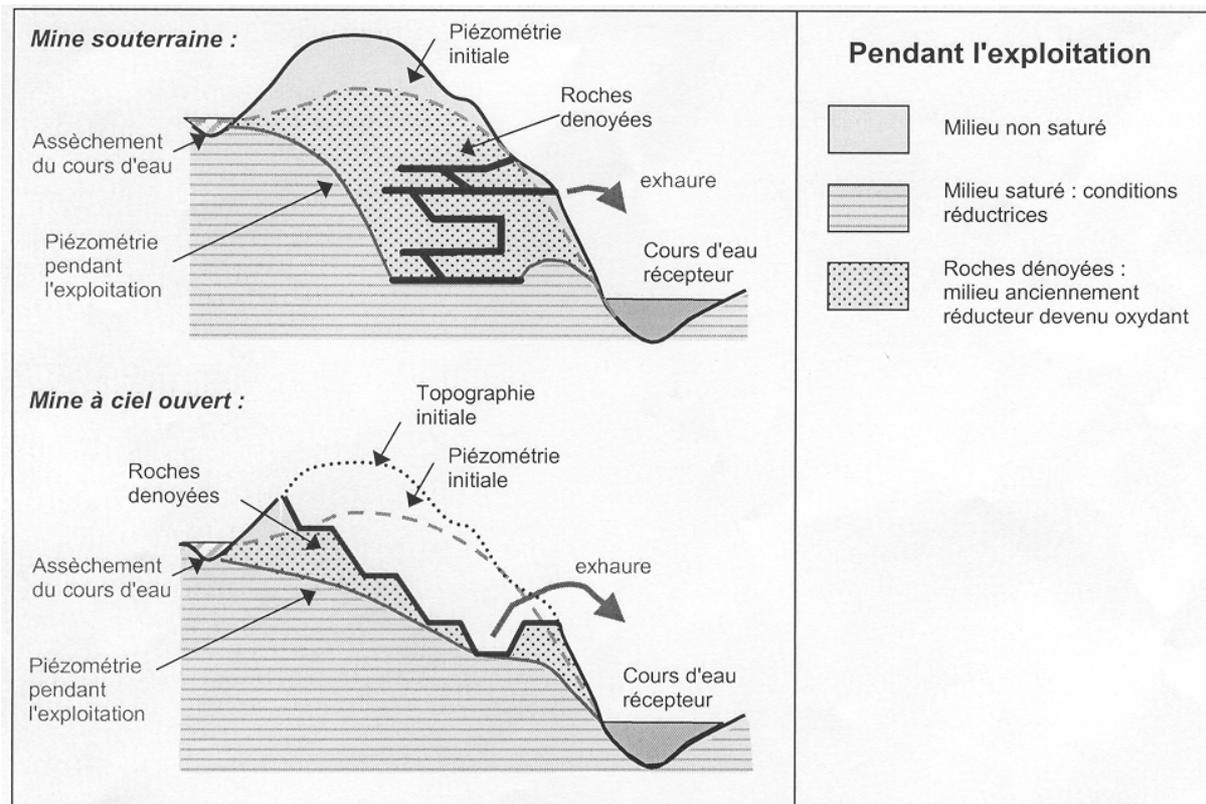


Figure 1 - fonctionnement hydrogéologique d'une mine pendant l'exploitation (source : Robert Fabriol, BRGM, 2004)

II – LES EFFONDREMENTS

2.1. Définition de l'ennoyage minier

L'ennoyage minier, appelé « mine water rebound » en anglais, est le processus par lequel les galeries d'excavation de mines souterraines abandonnées sont inondées par l'eau suite à l'arrêt du pompage d'assèchement, aussi appelé « exhaure ». L'ennoyage minier correspond donc au processus transitoire de remontée du niveau local de la nappe phréatique vers un nouvel état d'équilibre avec les conditions hydrogéologiques prévalant dans le secteur de la mine. Selon les dimensions et la géométrie de la mine, sa profondeur, les propriétés hydrauliques des matériaux en place et les caractéristiques du système hydrogéologique local, le temps nécessaire au rééquilibrage du niveau phréatique pourra varier entre quelques mois et quelques années.

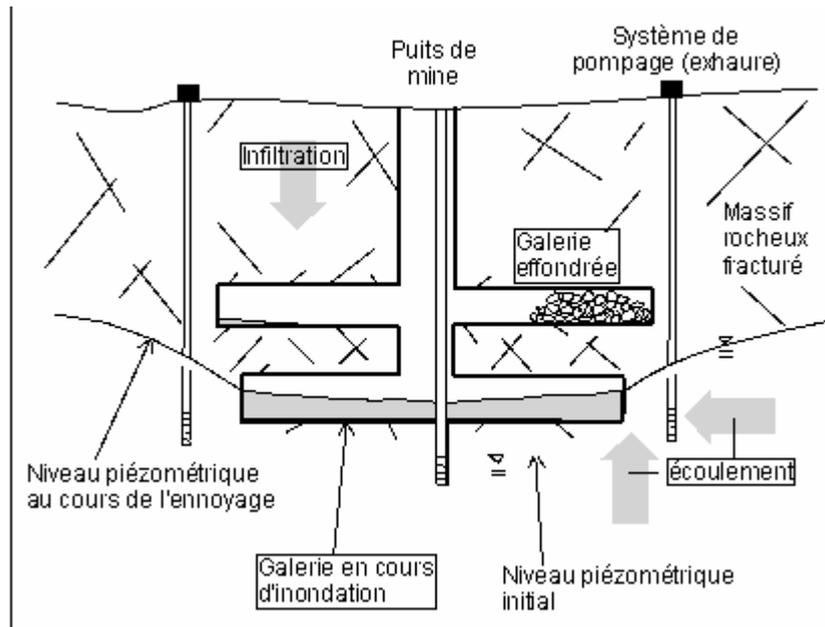


Figure 2 – Schéma de l'ennoyage minier

2.2. Hydraulique de l'ennoyage minier

La complexité du processus d'ennoyage minier repose sur le fait que le système d'écoulement souterrain local est perturbé de façon importante par les travaux miniers. D'une part, l'exploitation minière entraîne l'excavation de très importantes quantités de matériel et le creusement d'un réseau de galeries interconnectées entre elles. Ces vides miniers agiront comme conduites préférentielles pour l'écoulement de l'eau souterraine lors de l'ennoyage. D'autre part, l'excavation de matériel modifie significativement les caractéristiques des fractures présentes dans le massif rocheux. En effet, la création de vides miniers entraîne un relâchement des contraintes de confinement au voisinage des galeries et une augmentation de l'ouverture des fractures, augmentant d'autant la conductivité hydraulique équivalente de celles-ci.

2.3. Intérêt de l'étude de l'ennoyage minier

Un des impacts majeurs résultant de l'ennoyage minier sont les affaissements de terrain en surface. La remontée de la nappe phréatique entraîne une augmentation des pressions interstitielles dans le massif fracturé et une diminution proportionnelle de la contrainte effective pouvant supporter la charge sus-jacente, parfois jusqu'au seuil de rupture, ce qui provoque l'effondrement. Parmi les autres impacts de l'ennoyage minier, on note des

inondations locales en surface, la perte de la capacité qu'ont les eaux de surface de diluer d'autres contaminants, la surcharge et l'obstruction des égouts, l'émission accélérée de gaz et les impacts sur les sites d'enfouissement.

2.4. Description du processus

On connaît les mécanismes qui sont impliqués dans le processus d'envoyage minier (Adams et Younger, 2001) :

- Écoulement transitoire en milieu préalablement non-saturé à travers les fractures (=> faible conductivité hydraulique)
- Transfert d'eau des fractures vers la matrice poreuse du massif rocheux
- Transfert d'eau des fractures aux galeries minières
- Écoulement turbulent dans les galeries minières (\approx écoulement en conduites ouvertes/fermées => très forte conductivité hydraulique « équivalente »)
- Écoulement laminaire dans les galeries minières où du matériel effondré (blocs) occupe les galeries (=> forte conductivité hydraulique)
- Dissolution des minéraux des parois en contact avec l'eau et mise en solution d'ions

2.5. Conséquences possibles de l'envoyage en termes d'affaissement

Lorsque l'exploitation a eu lieu par chambres et piliers, les terrains sus-jacents ne se sont pas effondrés. Les piliers supportent donc ces terrains. Ils sont, de ce fait, plus ou moins fortement surchargés. Leur capacité de résistance à long terme est le plus souvent sensiblement inférieure à leur résistance à court terme. Elle faiblit également lorsque la roche se sature en eau. Les couches argileuses ou marneuses peuvent en outre fluer en présence d'eau. Dans ces conditions, il est fréquent de constater une dégradation progressive des piliers et du toit des galeries. Cette dégradation peut gagner de proche en proche. Les terrains sus-jacents s'effondrent alors progressivement jusqu'à provoquer parfois un affaissement de la surface, voire la création de fontis. L'affaissement des terrains est rapide au début. Il ne cesse qu'après quelques semaines, voire quelques mois, avec une extension progressive de la cuvette d'affaissement.

Cependant, l'influence de l'eau est controversée. L'effet de l'eau sur la stabilité des exploitations minières est un phénomène complexe :

1) Il est établi qu'une roche saturée en eau perd de sa résistance. Il ne faut pas surestimer cet effet car, lors de l'exploitation, la roche demeure saturée en eau à faible profondeur dans les parois, son « assèchement » restant superficiel. D'autre part, la résistance des roches baisse de manière générale entre l'état sec et l'état humide, mais ceci dans des proportions très différentes selon le type de roche. Ainsi, pour le minerai de fer lorrain, par exemple, qui est déjà pratiquement saturé en eau dans les anciennes exploitations, la perte de résistance est négligeable. Les effets pourraient être légèrement plus importants sur certains intercalaires marneux ; on considérera de manière générale que les exploitations faites dans les couches siliceuses (verte, noire, brune et grise) sont plus sensibles à l'eau que celles effectuées dans les couches calcaires (jaune, rouge). Certaines marnes gonflantes sont très sensibles à l'eau mais aucun niveau de ce type n'a été repéré dans la zone du bassin d'ennoyage.

2) A long terme, lorsque le niveau d'eau est stabilisé et que l'eau a pénétré dans l'ensemble des terrains, la pression d'eau joue un rôle de support du toit (déjaugage) qui soulage les piliers ; mais cet effet peut être contrebalancé par la perte de confinement horizontal à l'intérieur des piliers. Le bilan de ces actions dépend des conditions locales (niveau hydrostatique, taille des piliers) et de manière générale les conditions de contrainte après ennoyage sont peu différentes des conditions de la mine sèche. Une zone présentant un risque de rupture à sec continuera à présenter un risque après ennoyage.

3) Dans la phase transitoire où l'eau pénètre dans les chantiers, puis petit à petit dans les terrains, elle peut agir sur les fractures qui affectent les piliers en diminuant leurs propriétés de frottement et en les ouvrant par sa pression. Il apparaît que ce phénomène est prépondérant dans l'action de l'eau. En effet, les risques d'instabilité sont associés à la phase d'ennoyage (ou de dénoyage) de la mine. Les effets ne seront ressentis que dans des zones où les piliers sont déjà fortement dégradés ou dans des zones où existent des fractures importantes.

On peut développer plus amplement à titre d'illustration le triste et néanmoins célèbre exemple des anciennes mines de Lorraine.

2.6. L'exemple du bassin ferrifère lorrain

Pendant plus d'un siècle, les mines de fer de Lorraine ont exploité une couche minéralisée riche en minerai de fer (Aalénien) entre les vallées de la Moselle et de la Meuse, notamment dans le bassin de Briey. Le minerai était extrait de la manière suivante : des galeries étaient percées (traçage), puis le minerai était exploité entre les galeries jusqu'à ne laisser que de minces piliers, enfin les piliers étaient souvent détruits à l'explosif (dépilage). L'effondrement des galeries abandonnées a provoqué une fracturation supplémentaire des terrains sus-jacents (marnes micacées et calcaires du Dogger).

Ainsi, l'extraction du minerai de fer, qui s'est effectuée sous la vaste nappe des calcaires du Dogger, a mis en communication hydraulique ces deux niveaux et a causé le dénoyage progressif de la nappe du Dogger par vidange dans les galeries minières. Pendant toute la durée de l'exploitation, cette eau a donc été pompée et rejetée massivement dans les cours d'eau, conduisant à leur artificialisation. En outre, la quasi-totalité de l'alimentation en eau potable ou industrielle de la région était effectuée grâce à cette ressource abondante et facile d'accès.

L'arrêt de l'extraction du minerai depuis une dizaine d'années, et surtout celui des pompages d'exhaure à partir de 1993 pour le réservoir centre, et 1995 pour le réservoir sud, a entraîné l'ennoyage du réseau de galeries. La remontée du niveau de l'eau s'est poursuivie jusqu'à ce qu'un équilibre soit trouvé entre les apports d'eau (la pluie) d'une part et les débits de débordement (galeries aménagées), de fuite et de drainage (sources) d'autre part.

Cet équilibre est différent de celui qui existait avant l'exploitation minière, car la création de galeries et de drains, ainsi que la fracturation de l'écran imperméable (marnes micacées) qui séparait la formation ferrifère et les calcaires du Dogger, ont considérablement modifié la perméabilité locale de la roche, la nature et les axes de circulation de l'eau souterraine.

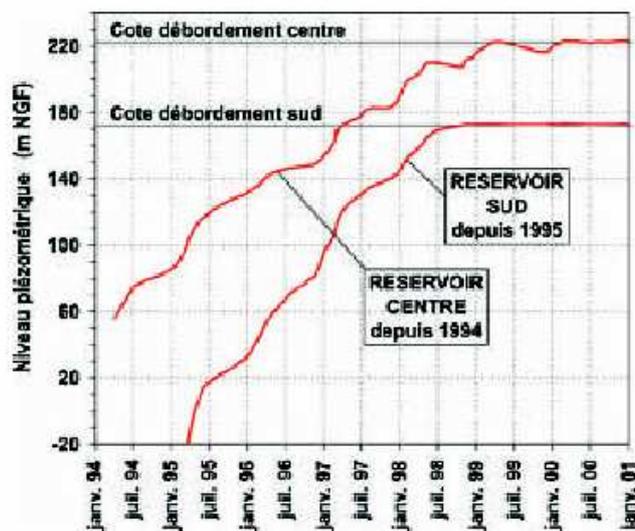


Figure 3 – Remontée du niveau de l'eau

a. Les trois sous-bassins du bassin ferrifère Nord Lorrain

Les exploitations de fer en Lorraine se sont étendues à l'ouest d'une ligne Thionville-Metz-Nancy, sur environ 100 km du nord au sud, de la frontière franco-luxembourgeoise à Nancy, pour une largeur qui varie entre 10 et 30 km. Le gisement s'interrompt sur près de 25 km en son centre, coupé en deux zones distinctes : le bassin ferrifère de Nancy au sud et le bassin ferrifère de Briey-Longwy-Thionville au nord. Les structures géologiques principalement nord-est/sud-ouest découpent ce deuxième bassin en trois zones : le bassin sud, le bassin centre et le bassin nord (cf. carte en annexe). Les travaux miniers se sont, par contrainte d'exploitation, développés dans ces structures géologiques, de sorte qu'ils constituent aujourd'hui 3 grands réservoirs globalement indépendants sur le plan hydraulique.

A ce jour, les sous-bassins Centre et Sud ont été ennoyés. L'ennoyage du sous-bassin Nord fait l'objet d'un report au 30 novembre 2004.

b. Les effets de l'ennoyage dans les Bassins centre et sud

Les principaux effets de l'ennoyage ont été observés lors de l'ennoyage des bassins centre et sud. Il s'agit de modifications du régime des nappes, de la qualité de l'eau souterraine, de la tenue des terrains.

La remontée des eaux dans les vieux travaux s'accompagne d'un rechargement des nappes sus-jacentes, en particulier celle du Dogger. Là où elle est phréatique, il peut en

résulter des inondations des ouvrages souterrains (caves, ...). Ce phénomène a été constaté près de Moyeuve-Grande, là où la nappe du Dogger est drainée par l'Orne. En effet, des résurgences ou de nouveaux écoulements sont apparus avec parfois des inondations de sous-sols. Suite à l'inondation de caves consécutive à la remontée de la nappe phréatique, un aménagement a alors été prescrit afin de créer un exutoire plus en aval de la rivière pour rabattre la nappe à un niveau inférieur.

Le 15 octobre 1996 à Auboué (Meurthe-et-Moselle), sur la colline de Coinville, l'ancienne cité minière se lézarde brutalement. Les planchers penchent, le bitume des routes éclate et les trottoirs se soulèvent. Dans le sous-sol, les galeries de la mine viennent de s'écrouler. Cent mètres plus haut, soixante-dix familles doivent quitter les lieux à la hâte. Puis le 18 novembre 1996, le quartier de la rue de Metz, voisin du précédent, a été également sinistré. Enfin, le 15 mai 1997, Moutiers, ville voisine d'Auboué, a été à son tour touchée par un affaissement inopiné. Les communes de Montois-la-Montagne, Roncourt et Moyeuve sont venues par la suite rejoindre le clan des sinistrées (cf. carte en annexe).

Dans le cas des affaissements de 96/97 d'Auboué et Moutiers, suivis par ceux de Moyeuve-Grande et de Roncourt, la concomitance de l'ennoyage et d'affaissements miniers a donc pu être constatée. Les conditions de stabilité du recouvrement y étaient suffisamment précaires pour expliquer l'évolution de ces zones. L'arrivée de l'eau a pu être présentée comme un facteur déclenchant.

Ces zones ne représentent qu'une très faible partie des zones d'aléa qui ont été ennoyées : 95 ha pour 2366 ha dans le bassin sud et 0 ha pour 1664 ha dans le bassin centre, soit 2,4 % de l'ensemble. Il s'agit donc de zones dont la dégradation était suffisamment avancée pour que l'affaissement puisse être déclenché par l'ennoyage.

En conclusion, l'ennoyage ne crée pas le risque d'instabilité de terrain ; il peut déclencher l'affaissement dans une zone dont le processus de dégradation est suffisamment avancé et où l'affaissement se serait produit plus tard en l'absence d'ennoyage.

c. Le contexte récent dans le Bassin nord

Sur propositions de la société Arbed, dernier exploitant actif des mines de fer lorraines, et après consultations et expertise scientifique, les conditions d'arrêt de l'exhaure du bassin Nord ont été déterminées par un arrêté préfectoral du 29 octobre 1998. Cet arrêté

définit les conditions préalables à l'ennoyage, prévu alors pour commencer le 30 novembre 2002. La zone d'ennoyage prévue concerne huit communes du département de la Moselle. Elle s'étend sur 5300 ha, soit moins de la moitié des zones ennoyées de chacun des bassins Sud (11200 ha) et Centre (12200 ha). Cet arrêté a dès 1998 fait l'objet de multiples recours par les élus locaux concernés et plusieurs associations ont vu le jour pour s'élever contre ce projet.

Le secrétaire d'Etat à l'Industrie a accepté de rouvrir le dossier de l'ennoyage du sous-bassin Nord qui a fait l'objet d'une expertise internationale dont le rapport a été rendu en novembre 2001. Le secrétaire d'Etat à l'Industrie en a tiré les conclusions début 2002. Le report de deux ans jusqu'en novembre 2004 du début de l'ennoyage devait permettre de mettre en place toutes les mesures nécessaires en matière de sécurité publique et permettre l'étude et la mise en œuvre éventuelle par les collectivités de solutions alternatives de prolongation de l'exhaure.

d. Les zones à risque du bassin nord

Les dernières études globales cartographiant et listant les zones d'aléas du sous-bassin Nord ont été rendues en avril 2002. Dans le bassin d'ennoyage, ces études font ressortir l'existence de 1445 hectares de zones d'aléas sur une surface totale du bassin d'ennoyage de 5300 hectares, dont 15% concernent des zones bâties (24 zones, 211 hectares). Ces zones couvrent notamment une partie importante des zones urbanisées des communes d'Angevillers, Rochonvilliers, Tressange, Ottange (seul le bourg de Nondkeil est concerné par l'ennoyage) et dans une moindre mesure des communes d'Aumetz et Fontoy.

Parmi ces 24 zones, une seule a été reconnue comme présentant un risque d'effondrement brutal : c'est la zone de Fontoy. Pour toutes les autres zones bâties du bassin d'ennoyage, le risque d'effondrement brutal est dorénavant exclu par les experts. La zone de la rue de Longwy à Fontoy, concernant 20 habitations, devra faire l'objet d'un traitement rapide afin de supprimer ce risque qui ne peut être accepté durablement. Ce traitement pourra consister soit à remblayer les vides miniers afin de supprimer le risque d'effondrement, soit à exproprier les maisons soumises à ce risque.

Toutes les autres zones d'aléas du bassin d'ennoyage ne présentent pas, selon les experts, de risque pour la sécurité publique. Certaines zones doivent toutefois être encore équipées de dispositifs de surveillance, par l'ancien exploitant minier qui en a l'obligation, à défaut par l'Etat.

Le cas de Nondkeil est un cas particulier : cette zone d'aléa de superficie importante et densément bâtie (environ 700 habitants, 164 immeubles, 330 adresses) a été reconnue depuis longtemps comme particulièrement concernée par les risques de mouvement de terrain. Elle a été équipée d'un dispositif de surveillance micro sismique qui a effectivement enregistré des signaux, montrant une évolution des travaux miniers au fond, sans caractère de dangerosité immédiat.

Pour l'ensemble des zones présentant seulement un risque d'affaissement progressif, il n'est pas envisagé, dans le cadre de la politique actuelle, de comblement dont le coût apparaît excessif par rapport au risque. Pour le seul secteur d'ennoyage du bassin nord, le vide au droit des zones d'affaissement progressif sous bâti est estimé à plus de 5 millions de m³ alors que le coût de comblement pourrait être de l'ordre de 100 euros par m³.

7. Le relevage des eaux dans l'ancien bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais

Au-delà du problème de l'ennoyage après l'exploitation minière, la gestion de l'eau peut s'avérer problématique pendant la phase d'exploitation elle-même. C'est le cas dans des bassins mal drainés. On peut citer en particulier l'exemple du Nord-Pas-de-Calais, qui a connu de nombreuses inondations lors de l'extraction de la houille et qui a dû recourir à de nombreux aménagements afin de contrer les dangers que cela représentait.

La zone géographique siège de l'exploitation des Houillères du Bassin du Nord-Pas-de-Calais (HBNPC) a un relief peu marqué. La pente des rivières y est très faible. Dans le Douaisis, par exemple, de premières stations de relevage des eaux, destinées à assainir des terrains très mal drainés, ont été mises en service bien avant l'exploitation minière.

L'exploitation charbonnière intense a créé à son aplomb des cuvettes d'affaissement. Cet affaissement, qui a atteint par endroit plus de dix mètres, a parfois provoqué le renversement local du sens d'écoulement des cours d'eau et créé des zones où les eaux de surface s'accumulaient. Pour éviter l'inondation de ces zones, l'exploitant minier a mis en place des stations de pompage destinées à relever les eaux pour les rejeter dans le réseau hydrographique (fossés, ruisseaux, rivières ou canaux). L'exploitation minière s'étendant progressivement, de nouvelles stations de relevage ont été mises en place. Parfois, le rejet d'une première station a dû être relevé à son tour. In fine, les eaux peuvent être relevées

plusieurs fois, par des cascades de stations. Par ailleurs, la nappe phréatique est souvent proche de la surface et les affaissements ont pu abaisser la surface du sol en dessous du niveau naturel de la nappe. L'inondation des terrains a été alors évitée par le rabattement de la nappe, au moyen, là encore, de stations de relevage.

A la fin de l'exploitation du bassin, ce sont 6 000 ha de zones inondables qui avaient été créés (les concessions minières couvrant au total 136 464 ha). Les principales sont au centre du bassin, dans le Douaisis, et à l'Est, dans le Valenciennois. Des zones plus restreintes touchent la région de Bruay-en-Artois et celle de Lens-Lievin.

Au total, 180 stations de relevage ont été créées dans la région, dont 133 par les HBNPC. A ce jour, sur ces 133 stations, 55 ont pu être arrêtées, notamment grâce à des d'aménagements locaux et 20 ont été reprises en charge par les collectivités locales (les premières dès 1970, la majeure partie dans les années 70, les dernières en 1995-1996).

Il reste donc 58 stations de relevage encore gérées par Charbonnage de France. Ces stations sont situées dans la région de Bruay-en-Artois (5 stations), de Lens-Billy-Montigny (6 stations), de Douai-Denain (28 stations) et de Condé-sur-Escaut (19 stations). Leur puissance installée est d'environ 5 MW. Le volume moyen unitaire annuel relevé en 1981-1996 par ces stations est inférieur à 1 M m³ par an pour 31 d'entre elles, compris entre 1 M m³ et 5 M m³ par an pour 18 autres et supérieur à 5 M m³ par an pour les 8 dernières (dont 4 à plus de 10 Mm³ par an). Le volume relevé par toutes les stations Charbonnage de France est passé de 300 Mm³ en 1975 (pour 104 stations) à 90 Mm³ en 1991 (pour 62 stations).

Conscientes de la nécessité de revoir cette situation, les HBNPC ont fait procéder en 1980 à une étude en vue d'une éventuelle rationalisation du réseau des stations de relevage du bassin aval de la Scarpe. Le coût de cette rationalisation a alors été estimé, en francs de l'époque, à 32 MF, le coût d'exploitation du nouveau dispositif étant de 5,1 MF par an. Ces travaux n'ont pas été réalisés...

III – LES DRAINAGES MINIERS ACIDES

3.1. Définition

Les affleurements de minéraux sulfurés (appelés chapeaux de fer ou gossan en anglais) sont naturellement sujets à une oxydation par contact avec l'air et l'eau. Ce phénomène lent entraîne l'apparition d'acide sulfurique et la solubilisation des métaux présents.

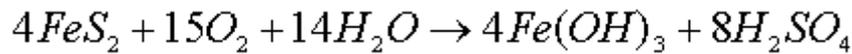
Lorsque des travaux miniers (excavations et pompages) perturbent l'équilibre chimique de ces affleurements et des gisements de sulfures métalliques profonds en les plaçant brutalement en conditions oxydantes, cette réaction amplifiée crée des écoulements acides appelés « Drainages Miniers Acides » (DMA) ou encore « Drainages Rocheux Acides » (DRA), en particulier au Canada. Par extension, il englobe généralement toutes les eaux acides d'origine minière provenant de l'oxydation spontanée des minéraux sulfurés, que ce soient les eaux produites au fond des mines à ciel ouvert ou les eaux de percolation sur les déchets miniers stockés à l'extérieur de la mine. L'expression DMA est employée pour désigner, à la fois le mécanisme d'acidification et l'eau produite. Une expression plus exacte serait « écoulement gravitaire spontané d'eaux acides sur les sites miniers ».

3.2. Origine

Les minéralisations du sous-sol sont dues à des circulations de fluides qui transportent des cations métalliques qui vont être piégés dans les horizons réducteurs. Or l'exploitation minière va brusquement modifier les conditions redox à l'origine du gisement en dénoyant les roches et en les exposant à l'air libre. Une mine exploitée représente en effet plusieurs kilomètres de galeries (quelques centaines de Km parfois plusieurs milliers comme à El Teniente, au Chili). Ce sont autant de conduits susceptibles d'apporter de l'eau et de l'oxygène au contact du minerai. Quant aux matériaux des mines à ciel ouvert et des carrières, ils sont par définition soumis aux conditions atmosphériques. Les DMA se forment alors, soit dans les galeries ennoyées, soit par percolation d'eau sur les tas de solides excavés contenant des sulfures. Ces matériaux extraits de la mine sont de diverses natures : encaissant parfois relativement riche en sulfures (stérile franc), minerais pauvres en sulfures (haldes, stérile de sélectivité) ou encore rejets de traitement pauvres en métaux précieux mais riches en sulfure. Les quantités produites et stockées peuvent atteindre plusieurs millions de tonnes. Ainsi, les déchets de flottation de la plus grande mine de cuivre au monde, Chuquimata, au Chili,

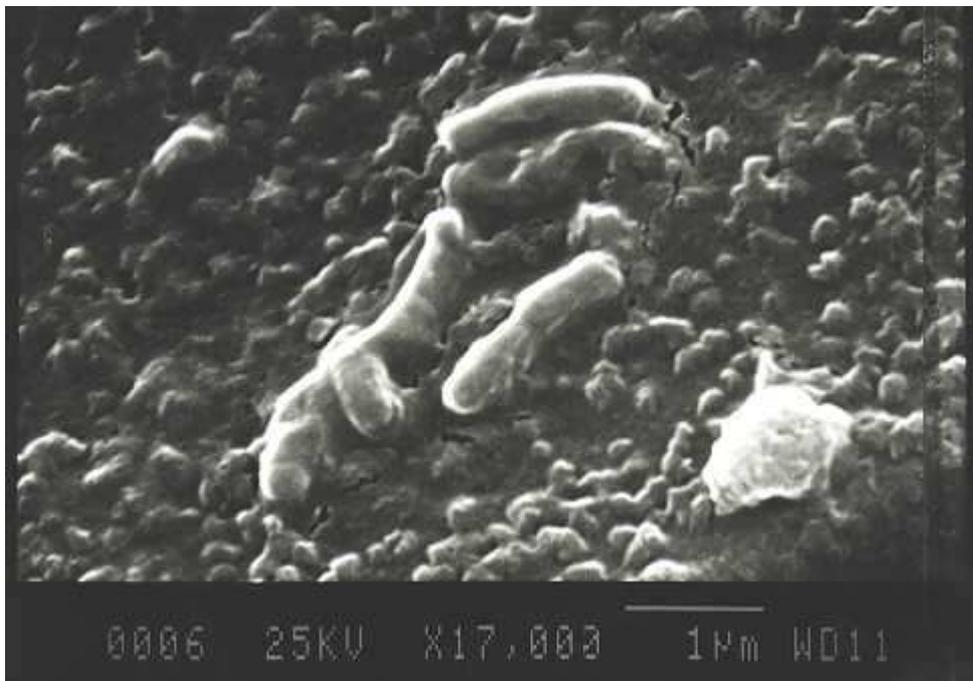
occupent une surface de 48 km². Ces produits, déjà stockés humides, reçoivent aussi les pluies. Le phénomène biologique et chimique de formation des DMA s'enclenche alors par suintement ou ruissellement sur le lieu de stockage².

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



il ne s'agit bien sûr que d'une équation bilan : le processus d'oxydation de la pyrite varie en fonction de l'évolution du pH (Toulhoat, 1996.) La particularité de cette réaction est d'être autocatalysée, ce qui permet au phénomène de production de DMA de se propager de façon similaire à un incendie : de même que la combustion produit de la chaleur qui déclenche la combustion d'autres matériaux, l'oxydation des sulfures produit du fer ferrique (et, indirectement, des bactéries) qui génèrent l'oxydation d'autres sulfures.

L'apparition des DMA est favorisée par la présence de microorganismes qui tirent l'énergie nécessaire à leur croissance des réactions d'oxydoréductions métalliques. Ces bactéries



**Figure 4 –
Bactéries
*Acidithiobacillus
ferrooxidans*
fixées sur un
grain de pyrite.
(photographie
prise au M.E.B.,
grossissement
17 000 x.
Source : BRGM)**

² Les régions désertiques ne connaissent donc pas ce genre de problème...

agissent comme de véritables catalyseurs des réactions chimiques qui se déroulent à la surface des minéraux et en solution. Les détails de ce phénomène sont encore mal compris et font l'objet de polémiques pour déterminer la réaction prédominante entre oxydation directe et indirecte (c.à.d. avec contact direct ou non des bactéries à la surface des sulfures).

3.3. Pollutions consécutives

Les DMA sont une source de pollution acide et métallique pour les milieux aquatiques et les aquifères. Ils sont capables, pour les cas les plus sévères, de libérer plusieurs tonnes de composés métalliques toxiques par jour dans le système hydrographique.

L'acidification est directement à l'origine d'une mortalité importante des populations de poissons, de perturbations de leurs taux de croissance et de leur reproduction. Les effets indirects de l'acidification sont la dégradation de l'habitat des poissons et des modifications des relations entre prédateurs et proies (interruption de la chaîne alimentaire)³. L'anoxie des eaux commence vers pH 4,2 et presque aucune espèce ne survit à des pH inférieurs à 5.

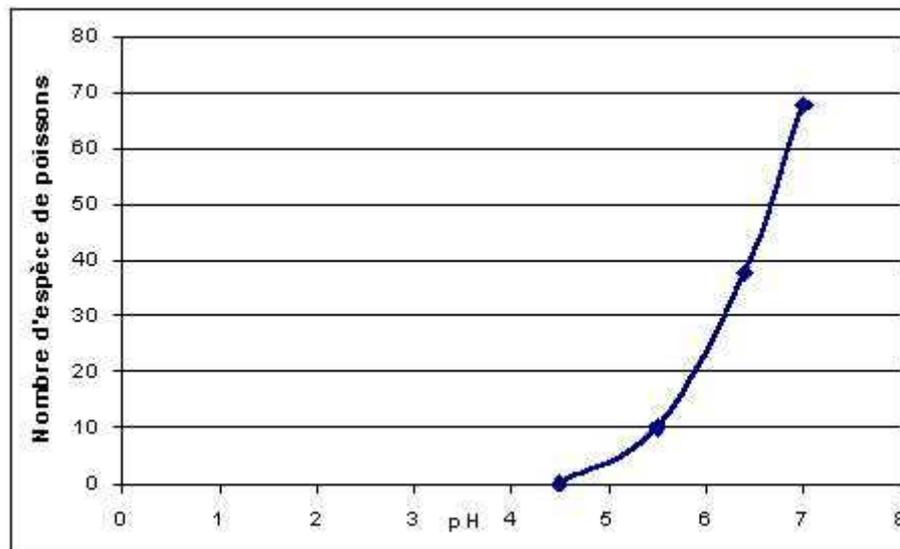


Figure 5 – Effet du pH sur le nombre d'espèce de poissons (résultats d'une étude réalisée sur les cours d'eau de Pennsylvanie affectés par les DMA)

Les métaux des effluents miniers acides sont généralement des poisons du métabolisme, en particulier les métaux lourds. La présence simultanée de plusieurs métaux peut engendrer une toxicité supérieure à celle de chaque métal séparé. Par exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont toxiques aux faibles pH et agissent en synergie pour inhiber la croissance des

³ voir <http://horticulture.coafes.umn.edu/>

algues et affecter les poissons. On constate, par exemple, la réduction de la croissance et de l'espérance de vie des jeunes truites de l'année alimentées avec des invertébrés benthiques collectés dans les eaux à forte concentration en métaux⁴.

Dans les régions constituées de terrains acides, l'acidité des eaux est conservée et les métaux sont transportés sous forme soluble à grande distance. C'est le cas des fleuves acides (pH 2-3) Tinto et Odiel (Espagne), qui, après 80 Km de cours, transfèrent l'impact minier au golfe de Cadix puis à la Méditerranée, via le détroit de Gibraltar). Dans les régions constituées de terrains calcaires (basiques), les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et précipitent. Lors des crues, les particules solides riches en métaux (fragments détritiques de minerai ou minéraux métalliques précipités) seront entraînées très loin en aval (sur plusieurs centaines de kilomètres parfois). Les sables des fleuves miniers contiennent beaucoup de minéraux métalliques ; ils constituent un vecteur important de transfert des métaux et sont une source potentielle de pollution. C'est une des causes de pollution des vallées de l'Orbiel (Salsigne, Aude) et de l'Amous (Gard). Enfin, si les caractéristiques des eaux changent, certains des métaux sous forme de particules solides peuvent se remettre en solution. C'est le cas du cadmium de la Gironde : provenant d'un site métallurgique du district de Decazeville (bassin du Lot), il est solubilisé dans l'estuaire et peut être transporté sur la côte atlantique et se retrouver dans des huîtres à plus de 400 Km de sa source.

Quant aux sulfates, présents en forte teneur, ils induisent une pression osmotique importante, qui va déshydrater les êtres vivants.

En dégradant la qualité de l'eau, les DMA conduisent à la disparition de ses usages en aval des opérations minières (alimentation en eau potable, base de loisir, pêche, irrigation). Pendant l'exploitation, ils sont également responsables de la corrosion des infrastructures minières et des équipements⁵.

La surveillance des eaux destinées à l'alimentation humaine exclut, *a priori*, les risques d'ingestion directe de métaux lourds provenant de DMA. Cependant une intoxication indirecte n'est pas impossible. En effet, le jeu des bioaccumulations et des bioamplifications peut aboutir à une intoxication humaine via les poissons, notamment chez les populations de pêcheurs. Chez les personnes souffrant d'intoxications métalliques, on trouve des métaux toxiques 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

⁴ voir http://amli.usgs.gov/amli/reports/ofr98_297/besser2.html

⁵ voir <http://www.hort.agri.umn.edu/h5015/99fpapers/reinhardt.htm>

d'entre eux dans le corps humain est longue (30 ans pour le cadmium). L'exposition aux métaux pourrait provoquer des cancers.

Enfin, notons que les DMA ont également un impact sur les paysages : il s'agit de l'impact visuel que constitue les dépôts de couleur rouille sur plusieurs kilomètres de cours d'eau ou l'aspect dénudé des stocks de déchets miniers.

3.4. Lutte contre la pollution des DMA

La pollution par les métaux est aussi ancienne que l'activité minière. Dans l'estuaire du Rio Tinto, petit fleuve acide qui draine la plus grosse minéralisation sulfurée du monde (Rio Tinto, Espagne), un sondage a recoupé un horizon contaminé contenant des sables à sulfures avec des scories et des charbons datés de l'âge du cuivre (-2500 ans). Ce type de pollution a longtemps été occulté pour ne pas entraver le développement industriel : la prise de conscience est assez récente. En fait, il a fallu deux accidents majeurs pour que cette problématique touche l'opinion mondiale : sur le site de la mine d'Aznalcóllar (Espagne), en 1998, l'effondrement d'un terril a entraîné le déversement de 4 millions de m³ de DMA dans un fleuve adjacent⁶ ; à Baia Mare (Roumanie), en 2000, un incident similaire⁷ entraîna le déversement de 100000 m³ de DMA, contenant entre 50 et 100 tonnes de cyanure, qui ont contaminé le Danube sur plus de 2000 Km. La recherche sur les DMA, débutée dans les années 1970, s'est organisée à la fin des années 1980 avec l'avènement de grands programmes de recherche internationaux, comme le MEND⁸ au Canada ou le MiMi⁹ en Suède. Les principales organisations internationales, publiques ou privées, en charge des problèmes de DMA, se sont constituées il y a moins de 10 ans. En pleine évolution, la recherche sur les DMA est encore jeune.

A l'abandon d'une mine, le meilleur moyen d'éviter la pollution de la nappe et des cours d'eaux voisins est de renoncer à l'ennoyage et de poursuivre l'exhaure : c'est une solution contraignante mais il est facile d'en évaluer le coût financier et de constituer une provision. Cette option paraît particulièrement pertinente quand les eaux d'exhaure trouvent une utilisation lucrative. Le traitement des effluents acides, en revanche, est un fardeau financier d'une durée indéterminée pour les opérateurs miniers, les personnes chargées de la réhabilitation et finalement pour la communauté. Si on choisit tout de même cette dernière

⁶ <http://www.antenna.nl/wise/uranium/mdaflf.html>

⁷ <http://www.rec.org/REC/Publications/CyanideSpill/>

⁸ http://www.nrcan.gc.ca/mms/poli/med_f.htm

⁹ <http://www.mimi.kiruna.se/>

solution, on privilégiera les traitements passifs, sur le modèle des processus naturels, qui sont moins chers, plus faciles à mettre en place et à gérer, et moins agressifs pour l'environnement que les traitements chimiques actifs. Les traitements chimiques classiques consistent en une neutralisation des eaux acides par des produits alcalins et une adsorption des métaux précipités sur des gels colloïdaux d'alumine ou de fer dont la formation est favorisée par l'adjonction de polymères et flocculants. Les traitements passifs sont en général du type « Wetlands », c'est à dire que l'on reconstitue des conditions anaérobies de marais dans des bassins où, sous l'action de bactéries qui réduisent les sulfates en SH_2 et augmentent l'alcalinité, on va précipiter des métaux (fer et métaux lourds) sous forme de sulfures métalliques. Le manganèse, qui lui reste facilement soluble, nécessite un traitement spécifique dans des bassins à tapis bactérien flottant où le pH devient alcalin, et permet la précipitation de carbonates de manganèse. L'arsenic qui, comme le fer, devient insoluble sous sa forme oxydée (As^{5+}) sera oxydé et précipité avec le fer, sous l'action de bactéries oxydantes du type *Thiobacillus ferrooxidans*, dans des bassins peu profonds avec aération par cascades. Les traitements passifs comprennent souvent une succession de différents types de bassins (anaérobies, aérobies) qui peuvent être précédés par des drains carbonatés anoxiques pour diminuer l'acidité des eaux avant traitement.

Dans le cas des DMA issus de terrils, il existe plusieurs méthodes de neutralisation. On peut d'abord noyer les stocks de déchets miniers sous une lame d'eau ou les déverser dans des lacs anoxiques et fermés (l'oxygène pénètre très difficilement dans l'eau). C'est, par exemple, l'option qui a été choisie suite à la fermeture définitive de l'usine de traitement de minerai de Falconbridge (Canada). Plus de 4 millions de tonnes de résidus miniers, titrant environ 7 % de soufre, sont stockés à cet endroit, sur 90 ha. Il a été décidé d'inonder le site en déplaçant les résidus miniers qui étaient surélevés et en construisant une série de digues qui créeraient deux étangs. La qualité de l'eau dans les étangs s'est constamment améliorée depuis l'inondation et la végétation aquatique s'implante grâce à une combinaison de propagation naturelle et de transplantation d'espèces locales. Dans d'autres cas, on préfère traiter le site en drainant et dérivant les eaux de ruissellement et en recouvrant les stocks de déchets miniers d'une couverture imperméable : film plastique, épandage de goudron ou de chaux et de polymère hydrophobe. La couverture peut aussi être naturelle, permettant une revégétalisation et donc une protection contre l'érosion : couches superposées d'argile et de terre, dépôts de tourbière (riches en matière organique et réducteurs). Le choix de l'imperméabilisation a été fait pour le site de la mine Equity Silver (Colombie-Britannique), exploitation à ciel ouvert fermée en 1994. Les stériles ont été couverts avec un recouvrement constitué d'un minimum de 0,5 m de

till glaciaire compacté et de 0,3 m de till non compacté, mis en place de 1991 à 1997, afin de minimiser le transfert d'eau et d'oxygène aux déchets minier. Les résultats indiquent une réduction du DRA mais les taux d'écoulements souterrain et les niveaux d'oxygène sont un peu plus élevés que prévus.

3.5. Evolution de la qualité des eaux après ennoyage

L'exhaure massive dans les bassins miniers conduit souvent à un abaissement général du niveau de la nappe, avec formation de cuvettes piézométriques autour des mines. Après ennoyage, les bassins miniers retrouvent un nouvel équilibre hydrodynamique non influencé, exempt de toute surexploitation. Cet équilibre est différent de celui qui prévalait avant ou pendant l'exploitation minière (du fait des vides laissés par l'exploitation), mais il est définitif dans le sens où les désordres causés par l'exploitation dans le sous-sol sont irréversibles. Au fil du temps, le circuit hydraulique retrouve des conditions réductrices et la qualité des eaux du nouveau réservoir s'améliore d'abord rapidement (quelques mois à quelques années) puis plus lentement (quelques dizaines à quelques centaines d'années). Il est difficile d'évaluer le délai de retour à une qualité suffisante pour l'adduction d'eau potable : cela dépend beaucoup des particularités du site considéré¹⁰ et il n'existe pas de réponse générale. La démarche de prévision de l'évolution reposera d'une part, sur une caractérisation des réactions chimiques contrôlant la qualité de l'eau, et d'autre part, sur une reconnaissance des écoulements dans le réservoir de la mine ennoyée. Ces deux types de données permettront d'établir un modèle de fonctionnement hydro-chimique de la mine et d'en construire un simulateur numérique. Dans le cas des grands réservoirs, il est nécessaire de prendre également en compte la répartition spatiale de ces données.

3.6. Valorisation marginale des DMA

Les DMA trouvent parfois des utilisations inattendues. Ainsi, des expériences menées en Afrique du Sud¹¹ ont révélé que l'irrigation à partir des DMA des mines de charbon peut accroître les rendements agricoles. Les DMA, traités avec de la chaux hydratée ou un autre

¹⁰ Younger, 1997

¹¹ voir <http://www.imwa.de/>

agent neutralisant, deviennent de l'eau saline peu acide, riche en gypse (sulfates de calcium.) l'université de Pretoria a démarré une recherche en 1993 sur l'impact environnemental et la pérennité de l'irrigation avec de l'eau de mine de gypse ferreux. La première phase de cet essai a montré que les rendements avec l'eau de gypse étaient beaucoup plus élevés par rapport à ceux obtenus au niveau de l'agriculture en zone aride. Un modèle informatisé, simulant des scénarios d'irrigation à long terme, prévoit que l'irrigation avec cette eau est durable si elle est gérée convenablement.

Autre exemple : la valorisation des eaux de drainage minier acide pour la déphosphatation des eaux usées municipales. Il ressort d'une étude expérimentale¹² qu'une concentration égale à deux fois et demi la dose stoechiométrique en eau de drainage minier acide serait requise pour la déphosphatation d'une eau usée municipale partiellement traitée ce qui représente une dose légèrement supérieure à la dose requise en alun. Les concentrations en métaux lourds des eaux déphosphatées ainsi que celles des boues sont, dans la majeure partie des cas, en deçà des normes et recommandations en vigueur ce qui indique, a priori, la faisabilité de cette valorisation. L'étude montre que le pH de l'effluent municipal ne serait pas significativement affecté par ce type de déphosphatation.

3.7. Etude de cas : le bassin ferrifère lorrain

Pour permettre cette exploitation de ce bassin, d'importants pompages d'exhaure (jusqu'à 250 millions de m³ par an) ont été mis en place afin d'assécher les mines. Les pompages d'exhaure ont entraîné la surexploitation locale de l'aquifère calcaire du Dogger. Les eaux pompées étaient rejetées dans les cours d'eau, conduisant à une artificialisation de leur régime. La dernière exploitation minière a été arrêtée en 1997. Après l'arrêt de l'exploitation, les pompages d'exhaures n'ont plus d'utilité directe, et les réservoirs miniers ont été ennoyés, ainsi que l'aquifère du Dogger sus-jacent. Cela a causé des désordres nouveaux pour les milieux aquatiques : assèchement de tronçons de cours d'eau qui étaient alimentés auparavant par les exhaures et minéralisation des eaux souterraines au contact des anciens travaux miniers.

En effet, le fonctionnement des exhaures entraînait la baisse régulière des niveaux de nappe de l'aquifère du Dogger, allant même jusqu'à l'assèchement localisé. Avec l'arrêt de ces exhaures, la situation de surexploitation localisée des nappes disparaît progressivement. Ainsi,

l'arrêt des exhaures des bassins Centre (1993) et Sud (1995) a entraîné l'ennoyage progressif des réservoirs miniers jusqu'à leur débordement dans le réseau hydrographique, chacun de ces réservoirs représentant un volume de près de 200 millions de m³. La nappe du Dogger sus-jacente, autrefois fortement déprimée, se reconstitue également, entraînant le retour à l'artésianisme de piézomètres sous couverture (Saint-Jean Les Busy), ou encore la réapparition de sources et de zones marécageuses (vallée du Chevillon). Aujourd'hui, l'ensemble des pompages d'exhaures du bassin ferrifère est arrêté, à l'exception de ceux du bassin Nord. Ces derniers devraient être arrêtés fin 2004, sous réserve que les risques d'affaissements miniers mettant en péril les biens et les personnes soient limités.

L'arrêt des exhaures et l'ennoyage qui s'en suit entraînent des répercussions sur la qualité des eaux souterraines. Deux phénomènes expliquent cette dégradation : la minéralisation des eaux d'ennoyage au contact des terrains exploités et la contamination des eaux du fait des produits laissés en fond de mine et/ou des infiltrations de polluants à partir de la surface (hydrocarbures et phénols essentiellement). La qualité des eaux souterraines du bassin ferrifère est suivie au moyen d'un réseau constitué de 35 points de surveillance. Les contaminations liées aux produits laissés au fond et aux infiltrations à partir de la surface sont généralement épisodiques. Ainsi, les derniers indices de contaminations en phénols et en hydrocarbures remontent respectivement à 1998 et 1999 dans les réservoirs miniers Centre et Sud. La minéralisation des eaux d'ennoyage est une conséquence indirecte de l'exploitation minière, liée à des phénomènes naturels de dissolution de certains éléments contenus dans les roches en profondeur. La figure 6 présente les concentrations en sulfates observées dans 4 puits miniers des réservoirs Centre et Sud. Elle montre en particulier la forte augmentation des concentrations apparues en 1995 et 1996 dans les puits de Droitaumont et d'Auboué, lorsque ceux-ci ont été atteints par l'ennoyage. De nombreux éléments se retrouvent en quantité excessive dans les eaux souterraines des réservoirs miniers suite à l'ennoyage, en regard des concentrations maximales admissibles pour l'alimentation en eau potable (CMA) du décret du 21/12/01. La qualité actuelle des eaux des réservoirs miniers doit être considérée comme une qualité naturelle, dans la mesure où elle n'est pas liée à une pollution d'origine anthropique. Cette qualité devrait cependant s'améliorer avec le temps, au fur et à mesure du renouvellement des eaux. Compte tenu des connaissances actuelles, les eaux du réservoir Sud se renouvelleraient à une vitesse moyenne d'une fois tous les 2 ans environ, et celles du réservoir Centre à raison d'une fois tous les 7,5 ans. Cette différence de vitesse de

¹² C. Bouchard, J.-B. Sérodes et P. Gélinas, Water Quality Research Journal of Canada n°31, 1996

renouvellement des eaux explique que l'on constate une amélioration des concentrations en sulfates dans le réservoir Sud, et une stagnation dans le réservoir Centre (cf. figure 6).

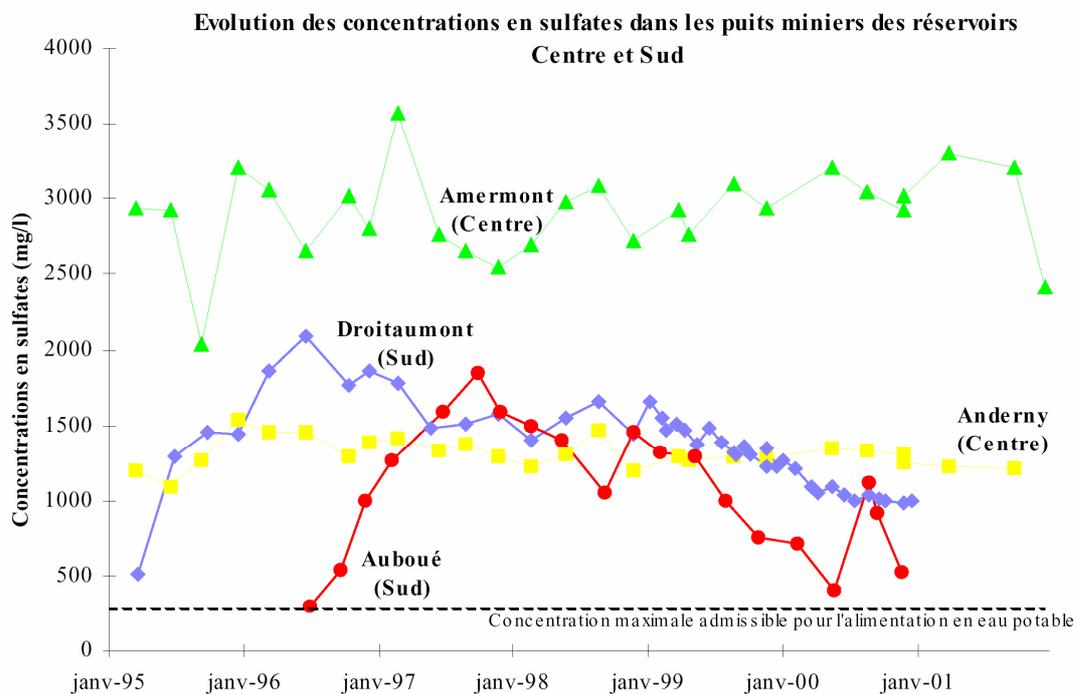


Figure 6 – Evolution des concentrations en sulfates dans les réservoirs miniers Centre et Sud (Source : Agence de l'Eau Rhin-Meuse)

Quant aux cours d'eau du bassin ferrifère, leurs débits d'étiage étaient souvent liés aux rejets des eaux d'exhaure. L'arrêt de ces dernières conduit à des baisses importantes des débits allant jusqu'à l'assèchement de certains tronçons de cours d'eau, rarement compensées par les débordements gravitaires des réservoirs miniers ennoyés. Compte tenu des problèmes de qualité des eaux induits par la baisse des débits, des arrêtés préfectoraux ont imposé la mise en place de soutiens d'étiage sur 5 cours d'eau (Yron, Woigot, Ruisseau de la Vallée, Othain et Crusnes) pour un débit maximal pompé de 600 l/s. Ces soutiens d'étiage sont aujourd'hui pris en charge par des collectivités. Les débits de crue des cours d'eau ne sont que très faiblement influencés par l'arrêt des activités minières et des exhaures, compte tenu de débits de débordement des réservoirs miniers qui sont faibles en regard des débits des cours d'eau, et du fait que les pointes de crue souterraines et superficielles ne sont généralement pas synchrones. La qualité des cours d'eau du bassin ferrifère est surveillée au moyen d'une quarantaine de stations. La qualité des cours d'eau est actuellement médiocre du fait des débits, qui ont fortement diminué et ne jouent plus un rôle de dilution suffisant en regard des rejets, et de l'influence des eaux minéralisées (sulfates notamment) en provenance des

réservoirs miniers (du fait des débordements et des soutiens d'étiage). Ainsi, sur la quarantaine de stations de surveillance de la qualité des cours d'eau du bassin ferrifère, 7 seulement présentaient une eau de bonne qualité vis-à-vis des matières oxydables en 2001. Cette situation ne pourra évoluer qu'avec une diminution des rejets puisque le fonctionnement hydrologique du bassin ferrifère est aujourd'hui définitif (à l'exception de celui du bassin Nord). Cette diminution des rejets devra de plus être encore plus forte si les soutiens d'étiage actuels ne sont pas poursuivis dans l'avenir.

CONCLUSION

Les eaux d'exhaure ont longtemps constitué une richesse pour les bassins miniers, qui profitaient gratuitement d'une eau de qualité généralement très bonne. Mais avec l'arrêt de l'exploitation minière, l'eau est devenu un problème très délicat qui mobilise régulièrement les habitants des régions minières. Les problèmes de l'après-mine n'avaient jamais été sérieusement envisagés puisque la France est un pays pionnier en la matière. Ils font aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches, mais il faut bien avouer qu'on ne connaît pas encore très bien les diverses conséquences de l'ennoyage, en particulier sur la stabilité des terrains. Quant aux drainages miniers acides, on en est réduit à les étudier au cas par cas tant il dépendent des conditions hydrogéologiques et environnementales du site.

Peut-être serait-il temps de tirer les conséquences de la douloureuse expérience de l'arrêt des exploitations minières françaises et de se demander si ce secteur d'activité doit être uniquement régi par les lois du marché...

BIBLIOGRAPHIE

« *LA MAITRISE DES SEQUELLES TECHNIQUES A LONG TERME DES EXPLOITATIONS MINIERES* »

Dominique PETIT, Novembre 1998

« *Les affaissements miniers des mines de fer de Lorraine
Recommandations sur un projet de DTA et sur l'établissement de Plans de Prévention des
Risques Miniers*

Rapport de Mission

Septembre 2002 »

Dominique Petit, Jean-Noël Boutin, Marcel Rat

« *LE BASSIN FERRIFERE*

Etat des Lieux au 20 février 2003 »

Rapport de la DRIRE-Lorraine

« *L'ennoyage minier, une question complexe de plomberie souterraine : Problématique et état
des connaissances* »

Christian Boyaud & René Therrien

« *DÉPRISE MINIÈRE*

*SURVEILLANCE DES EAUX SOUTERRAINES DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN DE
1998 À 2001* »

Rapport annuel du BRGM

T. EARLE, T. CALLAGHAN, *Impacts of mine drainage on aquatic life, water uses, and
man-made structure*, in Coal Mine Drainage Prediction and Pollution Prevention in
Pennsylvania. DEP, 1998

ENVIRONNEMENT AUSTRALIA, *Managing Sulphidic Mine Wastes and Acid Drainage.
Best Practice Environmental Management in Mining*, may 1997

F. Elbaz-Poulichet, *Transfert des métaux dans les bassins sous impact minier*, extrait de la
Lettre n°11 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de
Recherches sur le Climat (PIGB-PMRC)

Site du BRGM : <http://www.brgm.fr/DMA/>

P. Collon, *Evolution de la qualité de l'eau dans les mines abandonnées du bassin ferrifère
lorrain. De l'expérimentation en laboratoire à la modélisation in situ*, Thèse de l'INPL,
Nancy, 2003

P.L. YOUNGER, *The longevity of minewater pollution : a basis for decision-making*, The
Science of the Total Environment, 1997

J.M. SCHMITT, P. COMBES, E. LEDOUX, *Qualité des eaux après fermeture des mines :
remplissage initial, évolution transitoire, stabilisation à long terme et gestion
environnementale*, Colloque Après-mines 2003, Nancy

E. LEDOUX, *Données et concepts utiles pour la gestion optimale de l'environnement hydrogéologique, aspect méthodologique*, Les Techniques, Vol 96, Numéro spécial "Mines et Carrières ", décembre 1996

F. PINTE, *Les exhaures acides*, note BRGM, 2000

P. TOULHOAT, *Evolution chimique des eaux profondes et de surface*, Les Techniques, Vol 96, Numéro spécial "Mines et Carrières ", décembre 1996

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.

59 Temple Place, Suite 330, Boston, MA 02111-1307 USA

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats

include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- D. Preserve all the copyright notices of the Document.
- E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- H. Include an unaltered copy of this License.
- I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.

O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties--for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of

Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may

distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.