

# Résurgences des mines souterraines abandonnées

**Approche prédictive de l'évolution  
de la teneur en fer  
selon Paul L. Younger  
de l'Université de Newcastle,  
Royaume-Uni**

*Proposer une méthode simple qui permette de prévoir la qualité des eaux de résurgence des mines abandonnées, et surtout leur teneur en fer, le tout sans rien sacrifier à la rigueur scientifique : c'est l'objectif d'un expert britannique à travers l'analyse de 81 mines de charbon abandonnées. Le bilan : des résultats à comparer à ceux des travaux menés dans l'Hexagone et des règles à transposer.*

par Jacques et Katia Laversanne

*Société de l'industrie minière*

Paul L. Younger, du *Water Resource Systems Research Laboratory* de l'Ecole d'Ingénierie civile et des sciences de la terre de l'Université de Newcastle, a consacré une part importante de ses recherches aux résurgences des mines du Royaume-Uni et, en particulier, des exploitations de charbon. Il est notamment connu pour la mise au point de procédés de traitement des résurgences minières. Si les résultats de son approche prédictive ne peuvent être

extrapolés comme tels aux autres mines, les raisonnements qui les sous-tendent peuvent, par contre, être transposés.

Il nous a paru intéressant, en s'appuyant notamment sur son article *Predicting temporal changes in total iron concentrations in groundwaters flowing from abandoned deep mines : a first approximation*, paru en 2000 dans le *Journal of Contaminant Hydrology*, aux éditions Elsevier (pp.47-69), de faire connaître au lecteur francophone, des règles pouvant

être appliquées dans de nombreux cas de fermeture, indépendamment des ajustements indispensables, fonction des conditions locales géologiques et minières. Les tableaux et figures illustrant notre propos sont tirés de l'article précité.

Paul L. Younger présente lui-même son travail, fondamental pour la fermeture des mines, ainsi :

« Les déversements d'eaux contaminées par des mines souterraines abandonnées sont un important problème environnemental dans la

majeure partie du monde. Alors que des modèles sur les processus de base de la génération des polluants ont été développés avec succès pour certaines mines à ciel ouvert, verses et terrils à la géométrie relativement simple et à l'extension limitée, il n'existe pas de modèles aisément applicables aux vastes systèmes interconnectés des mines souterraines abandonnées. L'expérience des résurgences de 81 mines de charbon souterraines abandonnées au Royaume-Uni a permis d'estimer, en première approximation, pour de tels systèmes, les facteurs hydrauliques et lithologiques, dont on peut raisonnablement attendre qu'ils influent sur le relargage des polluants. Ces données démontrent que, à la suite de l'ennoyage d'une mine souterraine profonde, et alors que l'eau commence à migrer des vides miniers vers les réseaux de surface ou les aquifères voisins, le renouvellement des eaux de la mine conduit à une amélioration progressive de la qualité de l'eau souterraine (celle-ci se manifeste principalement par une diminution de la concentration en Fe et par la stabilisation du pH autour de 7). Différents schémas de rinçage ont été examinés. Alors que d'élégantes solutions analytiques de l'équation « advection-dispersion » peuvent être élaborées pour simuler les changements de la concentration en fer, le paramétrage est, dans la pratique, subjectif. Un examen minutieux des données du Royaume-Uni suggère que, en première approximation, la phase principale de rinçage durerait quatre fois plus que l'ennoyage de la mine. Les

concentrations en fer sur les court et long termes (respectivement au début et à la fin de la phase principale de rinçage) peuvent être estimées à partir de la teneur en soufre de la couche exploitée. Si la composition de la couche n'est pas disponible, des indications sur le potentiel de relargage peuvent être fournies par des considérations sur la distance entre la couche exploitée et les niveaux sédimentaires marins (qui sont normalement riches en pyrite). Pour une résurgence donnée, les concentrations en fer sur le long terme peuvent être approchées en considérant la proximité du lieu de résurgence à l'affleurement de la couche de charbon la plus étroitement associée (MCACS), et ainsi aux zones d'oxydation possible actuelle de la pyrite. L'établissement d'un schéma des flux facilite l'application pratique de ces techniques simples de prédiction. »

## Quels sont les objectifs de Younger ?

Le principal objectif des études de Younger est de présenter un modèle conceptuel applicable aux variations de la qualité de l'eau dans les mines de charbon souterraines abandonnées. Le modèle doit conduire à une procédure empirique, utile à la prise de décision des personnes en charge de la gestion des mines abandonnées, se démarquant

d'un modèle plus rigoureux scientifiquement mais irréaliste dans la pratique. « Abandonnées » s'entend au sens de « dont l'exploitation est arrêtée », et non selon le sens commun.

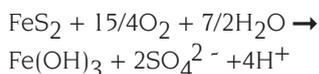
Les méthodes, essentiellement nord-américaines, pour prévoir la production de polluants à partir d'une mine à ciel ouvert ou d'une verse sont basées pour la plupart sur la comptabilité acide/base (*acid-base accounting*), et ne sont pas applicables aux mines souterraines abandonnées. Outre le fait que ces méthodes ne prennent généralement pas en compte la cinétique des réactions, elles supposent de disposer de la composition de l'ensemble des strates, devenues le plus souvent inaccessibles. De plus, l'encaissant des mines ne présente pas la réactivité relativement homogène des produits concassés des ouvrages de surface.

Il est pourtant nécessaire d'estimer la qualité future des résurgences et, en particulier, leur teneur en fer car ce métal est la principale source de contamination des eaux pour l'environnement des mines de charbon du type de celles du Royaume-Uni (mines avec affleurements dans un environnement collinaire). De plus, les données historiques sur les teneurs en fer sont de loin les mieux renseignées.

## Quels sont les processus physico-chimiques en jeu ?

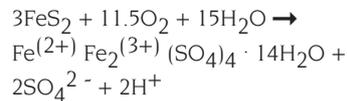
La démonstration de Younger est basée sur la présence d'AGS (sels générateurs d'acidité), assez générale dans les travaux et leur encaissant (Bayless et Olyphant 1983). En effet, l'observation de par le monde d'eaux de résurgence de bien moindre qualité que les eaux d'exhaure antérieures pose problème.

Les eaux d'exhaure, sauf dans le cas de mines très humides, ne présentent pas l'acidité et la richesse en fer que l'on pourrait attendre d'une oxydation complète de la pyrite et des autres sulfures par l'oxygène de l'aéragé selon la réaction :

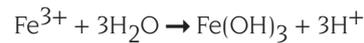


Dans la plupart des mines, le flux d'eau dans la zone insaturée (infiltration et humidité de l'aéragé), est insuffisant pour transporter l'hydroxyde ferrique, le sulfate et les protons. Dans cette zone, l'oxydation conduit à des incrustations de phases solides intermédiaires, les AGS, du type hydrosulfates

ferreux/ferriques que Younger illustre avec la römérite :



Cette réaction est presque 7 fois moins productive en protons que l'oxydation complète. Par contre, en cas de lessivage par l'eau, l'AGS est rapidement dissout et les ions ferreux peuvent être oxydés en ferriques, qui, à leur tour, libèrent des protons suivant la réaction :



Younger nomme « traumatisme géochimique » ce relargage qui peut doubler la teneur en fer des eaux et abaisser le pH de 3 unités. C'est notamment le cas lors de l'ennoyage de la mine après son abandon. Notons que le phénomène n'a pas de raison d'être limité aux mines de charbon ; Younger, pour sa part, fait référence à une mine d'étain de Cornouailles.

Le rinçage ultérieur des vides miniers par l'apport d'eau « propre » depuis la surface ou depuis les aquifères voisins conduit, comme observé très généralement, à une amélioration de la qualité de la résurgence. A terme, cette amélioration a souvent une limite résultant de l'oxydation des sulfures

dans, ou juste en dessous de la zone de battement de la nappe (« l'acidité juvénile » selon le terme de Younger lui-même) ; cette oxydation continue maintient sur le long terme un flux de contaminants à la résurgence. Younger en déduit que, pour prévoir le flux de contaminants à la résurgence, il faut prendre en compte à la fois le potentiel de relargage des strates minières pour le court terme et la configuration hydrologique du système pour le long terme.

## Quelles sont les hypothèses simplificatrices qui sous-tendent le modèle conceptuel de Younger ?

Ces hypothèses découlent de l'analyse de 81 mines de charbon abandonnées, réparties sur l'ensemble de la Grande-Bretagne, qui présentent suffisamment de données historiquement valides (cartes, coupes et analyses chimiques) et n'ont pas été perturbées ultérieurement par des exploitations à ciel ouvert.

Les deux principales hypothèses qui sous-tendent le modèle conceptuel, sont :

- l'importance de la contamination est, quelle que soit l'échelle de temps, le reflet de la teneur en pyrite de la couche exploitée et des roches encaissantes ;

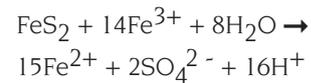
- l'importance de la contamination à long terme est en partie contrôlée par l'oxydation continue de la pyrite dans, et à proximité, de la zone de battement de la nappe après ennoyage de la mine.

La teneur en sulfures, et en particulier en pyrite, des couches de charbon anciennement exploitées, est rarement disponible. Plusieurs auteurs ont mis en évidence une relation entre la richesse de la couche en pyrite et la présence, dans son voisinage, de sédiments sous influence marine (pendant leur dépôt ou durant leur diagé-

nèse), environnement propice à la formation de sulfures. Les horizons marins étant, en général, des marqueurs reportés sur les cartes, une évaluation indirecte du contenu en pyrite peut être tentée en fonction de la distance aux niveaux marins.

Après ennoyage des travaux jusqu'au débordement, la possibilité d'une oxydation « continue » de la pyrite dépend de la probabilité que le battement de la nappe phréatique concerne une couche exploitée peu profonde. En effet, en période de basses eaux, les AGS (sels générateurs d'acidité) peuvent se former en zone insaturée avant de se dissoudre en période de

hautes eaux pour produire de l'acidité. Même en l'absence d'oxygène, les ions ferriques peuvent agir comme oxydant et permettre la mise en solution d'ions ferreux selon la formule :



L'oxydation continue de la pyrite dans, ou juste en dessous de, la zone de battement de la nappe phréatique bai-

gnant des travaux miniers, génère une contamination à long terme des eaux souterraines : c'est ce que Younger appelle « l'acidité juvénile ». Ce phénomène à long terme dépend de la présence de couches exploitées près de la surface. Younger

**Younger met justement en garde contre une extrapolation de ses résultats avant que la méthode ne soit testée et affinée sur d'autres gisements houillers à travers le monde.**

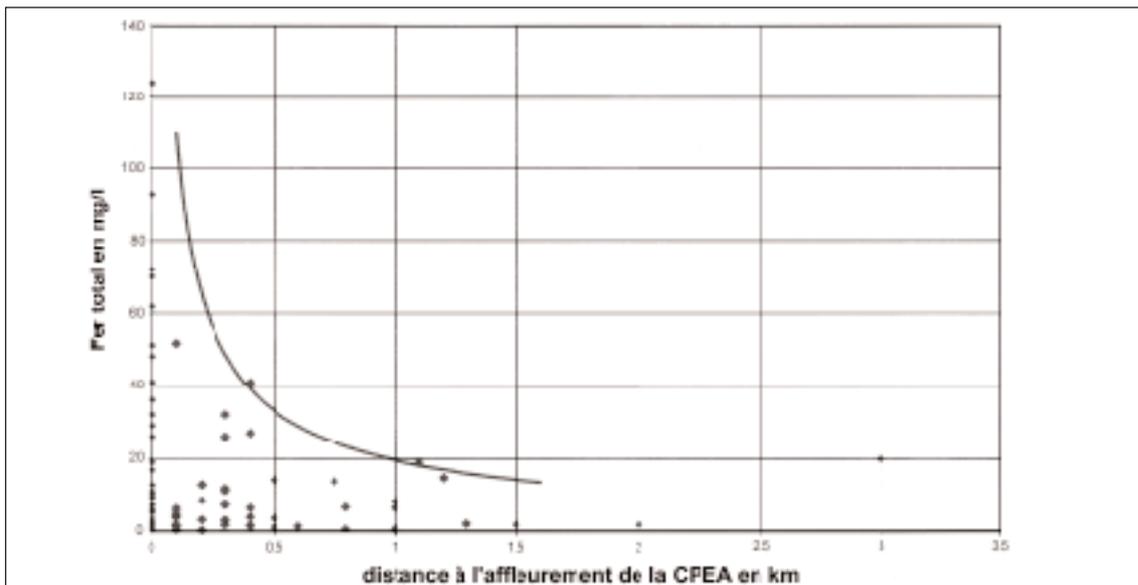


Figure 1 - Fer total en fonction de la distance entre l'exutoire des eaux de mines et l'affleurement de la couche la plus étroitement associée (CPEA) de 81 résurgences de mines britanniques complètement rincées après ennoyage. La courbe en trait plein, représentative d'une fonction puissance (cf. texte) constitue l'enveloppe supérieure de l'échantillon de mesures.

admet que la détermination des niveaux de base du drainage souterrain est un exercice difficile et renvoie à des publications plus fouillées sur le sujet (\*).

Indépendamment de ces difficultés, il apparaît pour l'auteur que l'approche la plus appropriée du potentiel d'oxydation continue de la pyrite sur le long terme est la mesure de la distance entre l'exutoire du drainage minier et l'affleurement de la couche de charbon la plus étroitement associée (la MCACS, que Younger propose de traduire en français par Couche la plus étroitement associée, CPEA). La possibilité de pénétration de l'oxygène nécessaire à l'oxydation de la pyrite est plus importante lorsque des travaux sub-affleu-

rants existent. La CPEA est alors définie comme la couche exploitée la moins profonde de la mine qui se trouve sous, ou dans, la zone de battement de la nappe en relation avec l'exutoire de la mine.

### Quels sont les résultats de l'examen des 81 mines de charbon britanniques ?

Après une discussion approfondie des critères de sélection des 81 résurgences minières, des recueils des données cartographiques et d'archives, des méthodes d'analyses géochimiques et de l'approche statis-

tique, Younger présente les résultats obtenus en 2 tableaux et 3 figures.

Le tableau 1 compare la teneur en soufre total des couches exploitées à la répartition des concentrations en fer des résurgences de mines récemment ennoyées, et le tableau 2 compare le pic à court terme en fer total à la concentration à long terme des résurgences. Pour l'auteur, la forte dispersion du pic à court terme traduit autant la variation des concentrations que la brièveté des séries temporelles de mesures.

Notons l'intéressante prise en compte d'une mine d'étain dans le tableau 2.

Les figures 1 et 2 comparent les teneurs en fer et le pH à long terme à la distance de

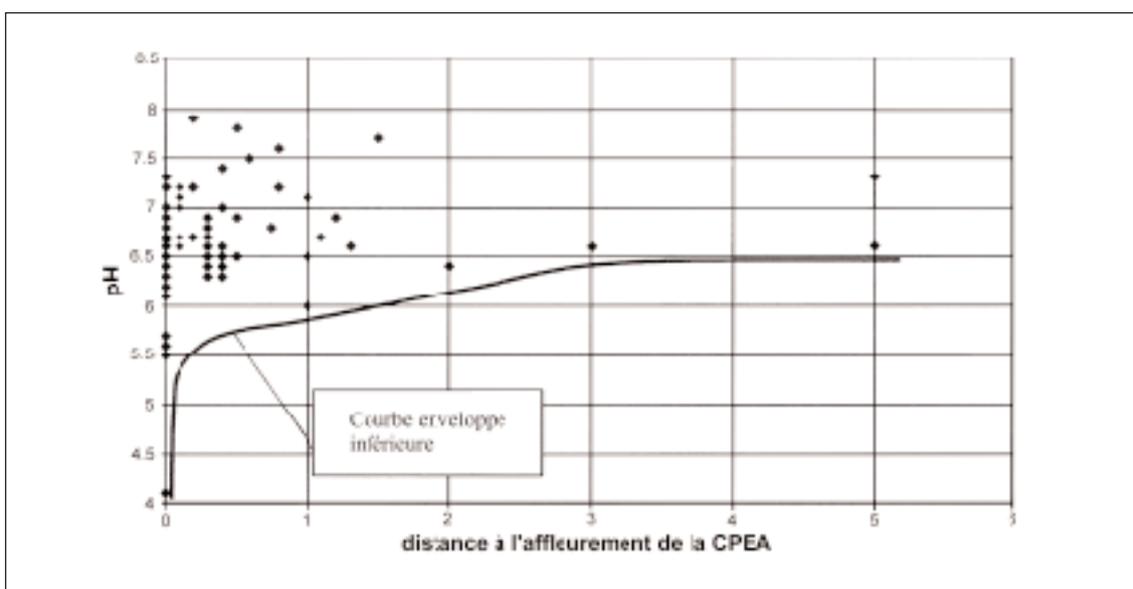


Figure 2 - pH en fonction de la distance entre l'exutoire des eaux de mine et l'affleurement de la CPEA de 81 résurgences de mines britanniques complètement rinées après ennoyage.

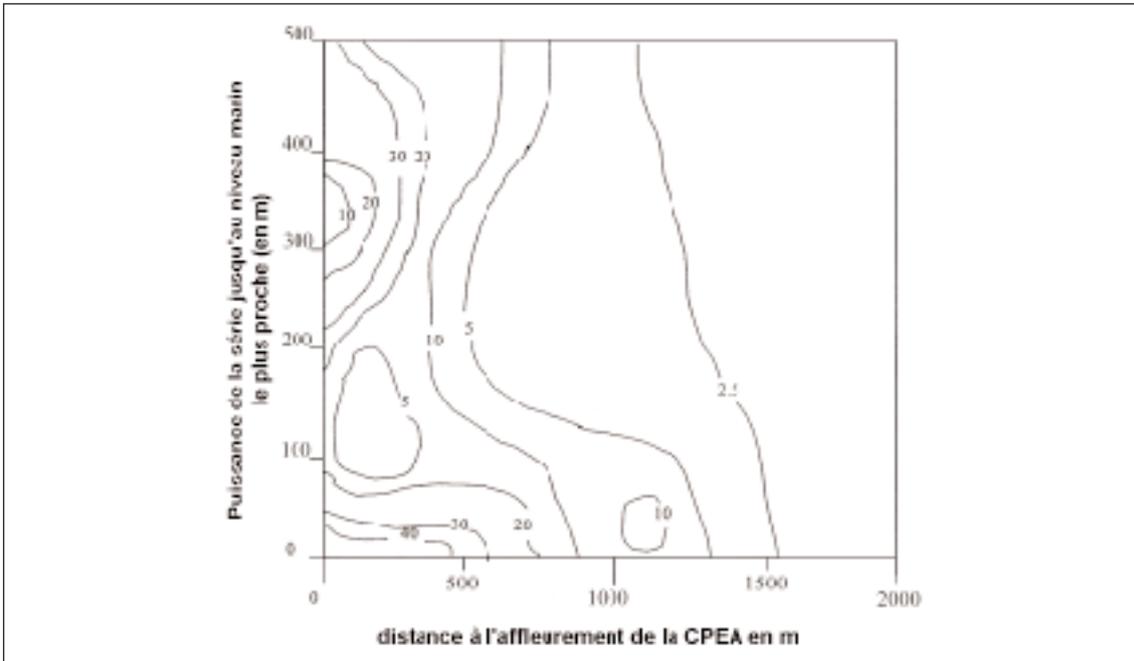


Figure 3 - Carte du fer total en mg/l dans des résurgences minières britanniques à la fin de la période principale de rinçage en fonction à la fois de la puissance, de la série stratigraphique jusqu'au niveau marin le plus proche et de la distance à l'affleurement de la CPEA. La carte est établie par simple interpolation linéaire. La résolution à cette échelle ne permet pas de reporter certains contours intermédiaires trop serrés.

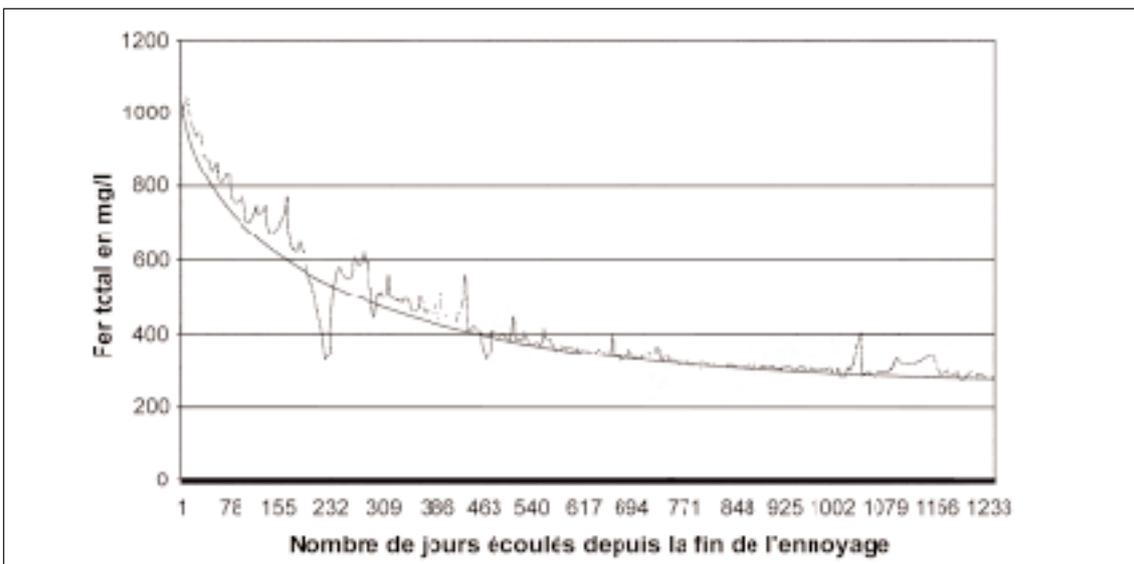


Figure 4 - Décroissance dans le temps de la concentration en fer pendant le rinçage de la mine de Wheal Jane en Cornouailles (trait fin) comparée aux résultats du modèle (traits épais) basé sur l'équation d'advection-dispersion pour un système unidimensionnel présentée ci-avant. Les concentrations en fer observées sont tirées d'un échantillon d'analyses journalières (pour de plus amples détails, voir Younger 1997).

Teneur en soufre total de la couche exploitée (en %)	Fer total (en mg/l) dans des mines de charbon récemment royées au Royaume Uni	
	Moyenne et intervalle de confiance	95%
0-1	0.15 ± 0.27	0.79
1-2	98 ± 14	182
2-3	267 ± 40	302
3-4	873 ± 163	1385
4-5	1494 ± 248	1694

Tableau 1. Concentration en fer en fonction de la teneur en soufre total de la couche pour les mines de charbon récemment royées avant rinçage au Royaume-Uni. Les erreurs analytiques propres à la teneur en soufre total sont de l'ordre de 0,05 %. Les intervalles de confiance calculés (notés ±) et la borne supérieure à la probabilité de 95 % sont estimés à partir des écarts-types des résultats d'observation, par application de la distribution (loi de Student-Fischer) avec un niveau de confiance à 95 %.

Mine	Fer total du pic à court terme (avant rinçage) en mg/l	Moyenne du fer total à long terme (après rinçage) en mg/l	Ratio entre le court et le long termes	Source d'informations complémentaires
Gaith Tomnaver	700 ± 159	35 ± 1,56	20 ± 5,1	Younger (1997)
Dalquharran Mine	1400 ± 172	230 ± 12,3	6 ± 2,3	Robb (1994); Robins and Younger (1996)
Kames Colliery	70 ± 10	25 ± 8	3 ± 0,45	Best and Aikman (1983)
Fordell Day-Level	28 ± 5,8	19 ± 2,75	1,5 ± 1,4	Henton (1981)
Midland Valley Mines	300 ± 78	22 ± 1,5	13,6 ± 3,8	Wood et al. (1999)
Mainsforth Colliery	50 ± 7,7	15 ± 2,0	3,3 ± 1,2	Cairney and Frost (1975)
Wheal Jane (mine d'étain)	1900 ± 157	250 ± 21	7,6 ± 1,0	Younger (1997)
Moyennes (avec Wheal Jane)	635 ± 84	85 ± 7,0	7,8 ± 2,2	
Moyennes (sans Wheal Jane)	425 ± 72	58 ± 4,7	7,9 ± 2,4	

Tableau 2. Concentrations en fer à court et à long termes dans l'eau de mines de charbon abandonnées (et dans celle d'une mine d'étain pour comparaison) dans l'ensemble du Royaume-Uni, illustrant le rapport entre la concentration de pic à court terme (au départ du rinçage) et la concentration à long terme (caractéristique des conditions après rinçage). Les écarts notés ± correspondent aux intervalles de confiance des mesures ainsi que, par déduction basée sur Baird 95, des ratios et moyennes. La dernière colonne fournit les références des articles donnant de plus amples informations sur ces résurgences de mines.

Teneur en soufre total (wt%)	Concentration en fer (après rinçage) à long terme (mg/l)	
	Moyenne et intervalle de confiance	95%
0-1	0.018 ± 0.76	0.1 ± 0.04
1-2	12 ± 8	23 ± 6
2-3	33,8 ± 22	50 ± 12
3-4	110 ± 78	175 ± 40
4-5	190 ± 127	214 ± 94

Tableau 3. Relation entre la concentration en fer à long terme (après rinçage) et la teneur en soufre total de la couche, déduite des résultats du tableau 1, par division sur la base du ration moyen entre les concentrations en fer à court et à long termes pour les mines de charbon étudiées, (soit  $7,9 \pm 2,4$ , cf. tableau 1) Les erreurs sont calculées pour un niveau de confiance de 95 %, selon les méthodes de Baird, 1995.

l'exutoire à la couche sub-affleurante la plus étroitement associée (la CPEA).

La figure 3, à notre sens beaucoup plus hardie, traduit la double relation entre la teneur en fer à long terme et, à la fois, la distance de la résurgence à la CPEA et l'épaisseur des terrains entre la CPEA et le niveau marin le plus proche. Nous verrons pourquoi par la suite.

Younger met justement en garde contre une extrapolation de ses résultats avant que la méthode ne soit testée et affinée sur d'autres gisements houillers à travers le monde.

## Comment apprécier la qualité des eaux de résurgence au fur et à mesure du rinçage ?

Rappelons que l'objectif de l'étude est de mettre au point des lignes de conduite pratiques qui permettent la prévision des teneurs des résurgences des mines abandonnées. Il est donc essentiel de prévoir l'importance du pic de concentration des contaminants après dissolution des AGS, ainsi que la durée de la

phase de rinçage avant que soient atteintes les teneurs à long terme.

Pour les teneurs de pic, on peut se servir du tableau I : une estimation raisonnable correspond au couple moyenne/intervalle de confiance, la borne supérieure à 95 % étant pour Younger très pessimiste.

Pour évaluer la durée de la phase principale du rinçage, le recours aux seuls paramètres hydrauliques du volume des vides et du taux de recharge est certainement insuffisant. Dans le cadre d'un écoulement par pistonage simple, le rinçage

du contaminant requiert un temps  $t_f$  défini comme le rapport du volume des vides  $V_0$  au débit d'évacuation de la mine  $Q$ . En conditions stables,  $Q$  correspond au taux de recharge. Or, dans la pratique, la durée de rinçage est généralement plus longue que prévue, traduisant des systèmes hydrauliques plus complexes du fait des hétérogénéités de la mine, notamment en termes de perméabilité et de temps d'écoulement.

Younger ne mentionne pas le cas des mines où tout ou partie des travaux profonds, une fois noyés, ne participent plus aux circulations ultérieures, l'aquifère minier présentant alors

une stratification géochimique comparable à celle des lacs miniers profonds. Il n'évoque pas non plus le cas de la saturation des eaux d'ennoyage, et éventuellement de rinçage, par certains sels comme les sulfates (les teneurs de la résurgence peuvent ne pas refléter cette saturation si des mélanges s'opèrent entre diffé-

**Il est donc essentiel de prévoir, pour tenir les objectifs de l'étude, l'importance du pic de concentration des contaminants après dissolution des AGS, ainsi que la durée de la phase de rinçage avant que soient atteintes les teneurs à long terme..**

rentes eaux souterraines du fait des hétérogénéités).

Il s'appuie, pour sa démonstration, sur l'exemple de la mine d'étain de *Wheal Jane* (Cornouailles) où, pour un volume de vide de 2,2 mil-

lions de  $m^3$  et un débit de résurgence de 8 000  $m^3$ /jour, le rinçage a duré 42 mois au lieu de 9.

Dans les milieux naturels, de tels retards sont expliqués par le recours au concept général de dispersion et la technique de modélisation la plus courante repose sur la résolution de l'équation d'advection/dispersion. Cependant, pour une mine, le paramétrage est délicat. Younger propose l'équation suivante, spécialement modifiée pour les mines abandonnées :

$C(t) = 0.5C_0 [\operatorname{erfc}(\{L-v_a t_w\} / \{2(Dt_w)^{0.5}\}) + C_a]$  où  $C(t)$  est la concentration à l'exutoire au

temps  $t$  (par exemple, le temps compté depuis que la mine a débordé) ;  $C_0 = C_p - C_a$  où  $C_p$  est la concentration du pic de fer à la fin du processus d'inondation ;  $C_a$  est la concentration en fer à l'asymptote, à la fin de la phase principale de rinçage ;  $v_a$  est la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau à l'intérieur du système minier ;  $t_w$  est le temps de fonctionnement réel ( $w$  pour *working*), différence entre la durée de la phase principale de rinçage (trouvée sur la base de tâtonnements) et le temps écoulé depuis le débordement ;  $D$  est le coefficient de dispersion longitudinale (en  $m^2$  par unité de temps) ;  $erfc$  est la « fonction d'erreur complémentaire » (explicitée dans Fetter 1999). La figure 4 illustre l'application de cette équation au cas de la mine de *Wheal Jane*.

Dans la pratique, aucune des équations précédentes n'est recommandée par Younger pour servir d'outil de terrain. Il propose une méthodologie plus simple, en accord avec le schéma conceptuel précédemment décrit. Cette méthodologie provient de Glover (1983) qui a émis l'hypothèse selon laquelle, en matière de décroissance des concentrations, la demi-vie des contaminants serait approximativement égale au temps nécessaire pour la recharge des vides miniers. Dans l'exemple précédent de

*Wheal Jane*, la demi-vie pour le fer était de 10 mois pour une recharge en 9 mois. Cette méthode ne prend pas en compte la persistance d'un flux de contaminants à long terme provenant de la zone de battement de la nappe. Younger propose d'améliorer la formule de Glover, en utilisant la valeur moyenne de son tableau 2. La formule de Glover, où  $R_f$  est le ratio des concentrations initiale et finale,  $t_f$  la durée de la phase de rinçage et  $t_r$  la durée de l'ennoyage, devient alors :  $t_f = (3,95 \pm 1,2) t_r$ . La phase de rinçage durerait environ 4 fois plus longtemps que l'ennoyage.

## Comment estimer la qualité des eaux à long terme une fois le rinçage terminé ?

Pour l'auteur, une estimation possible consisterait à se baser sur la valeur du pic en fer à court terme pour en déduire empiriquement la teneur à long terme. Le tableau 2 de Younger conduit à un ratio empirique de 8 entre la valeur de pic et la valeur à long terme.

Le tableau 3 explicite la relation entre la teneur en fer à long terme et la teneur en soufre totale de la couche. Il est remarquable que, pour la valeur la plus élevée de la concentration à long terme en fer des 81 résurgences, l'analyse donne 120 mg/l alors que le tableau 3 de Younger, pour une teneur en soufre totale de 3,5 % dans les strates, donne empiriquement  $110 \pm 78$  mg/l.

Le problème avec le tableau 2 est qu'il ne prend pas en compte l'oxydation des sulfures dans la zone de battement de la nappe. La figure 2 présente une population de valeurs dont la limite supérieure est une courbe  $Fe = d^{0,75}$ , reliant la teneur en mg/l de fer à la distance affleurement / résurgence en km. Younger voit dans cette population deux classes de valeurs, statistiquement relativement indépendantes :

- à moins de 0,5 km de distance, la teneur en fer est en moyenne de 19,2 mg/l, avec un écart-type de 24,2 mg/l ;
- à 0,5 km ou plus de distance, la teneur en fer est en moyenne de 7,0 mg/l, avec un écart-type de 6,8 mg/l.

Cette observation va dans le sens de l'hypothèse précé-

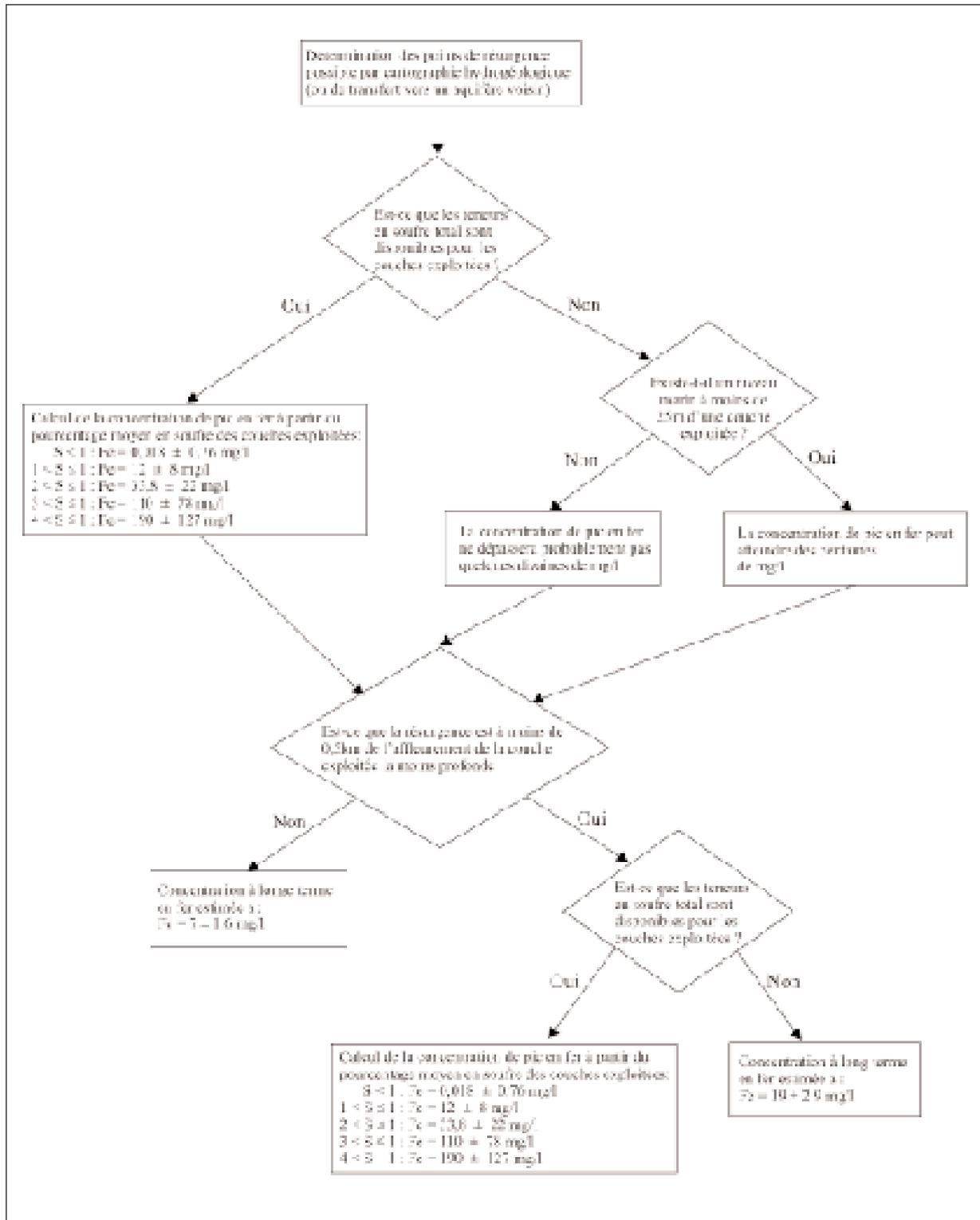


Figure 5 - Schéma de logique pour une première approche des valeurs de pic (immédiatement après l'ennoyage) de la mine et concentrations à long terme en fer (après rinçage complet) et des écarts-types à partir de l'étude statistique des données de résurgence de 81 mines du Royaume-Uni (t-distribution avec taux de stabilité de 95 %).

dente qui suppose des processus géochimiques différents pour la surface et la profondeur.

Pour le pH, les points sont plus dispersés, sans doute du fait de phénomènes de tamponnage (les mines de houille françaises contiennent assez de carbonates pour cela). Cependant Younger distingue deux classes qui ne sont pas vraiment indépendantes :

- à moins de 0,5 km de distance, la moyenne arithmétique du pH est de 6,52 pour un écart-type de 0,615, la moyenne géométrique de 6,49 ;

- à 0,5 km ou plus de distance, la moyenne arithmétique du pH est de 6,94 pour un écart-type de 0,489, la moyenne géométrique de 6,92.

La variabilité du pH et de la teneur en fer à faible distance des affleurements montre que d'autres phénomènes influent sur la qualité des eaux. Younger s'interroge, à travers sa figure 3, sur l'influence possible de la proximité de niveaux marins à la couche sub-affleurante (CPEA), notamment par référence à des observations effectuées dans les gisements houillers des Appalaches. Bien qu'il soit prématuré d'en tirer des conclusions définitives, il se pourrait toutefois que la présence de niveaux marins à moins de 50 mètres de la couche sub-

affleurante soit un facteur aggravant de contamination en fer (attention : la courbe 30 ppm de la figure 3 ne boucle pas).

### **Quels axes de recherche développer pour améliorer la pertinence des prédictions ?**

Younger propose de nouveaux axes de recherche pour améliorer la prévision de la qualité des eaux des résurgences et, en particulier, pour consolider les fondements scientifiques des modèles proposés. Il suggère d'approfondir nos connaissances de la teneur en sulfures, et en particulier en pyrite, des mines souterraines (si nous commençons par celles encore accessibles ?) et, par ailleurs, de mieux cerner la minéralogie et la géochimie des AGS, point fort de sa théorie. S'il recommande de travailler les modèles de types pseudo-karstiques non stabilisés pour simuler l'évolution des flux et de la qualité des eaux de mines (par des approches probabilistes du type Monte-Carlo, par exemple), il est conscient des contraintes qu'impose aux chercheurs le besoin en capa-

ités de calcul et se montre sceptique sur la possibilité d'en tirer des modèles fiables pour les risques de l'après-mine.

### **Quels enseignements en tirer pour les praticiens de l'après-mine ?**

En conclusion, Younger, sans se départir de sa rigueur scientifique et de sa puissance d'analyse des phénomènes physico-chimiques de l'après-mine, a su proposer aux praticiens un modèle empirique simple de prédiction de la qualité des eaux des exutoires de mines abandonnées, basé sur l'examen d'un panel fiable de 81 résurgences minières du carbonifère britannique. La figure 5 schématise la démarche proposée.

Des tableaux de valeurs empiriques fournissent au lecteur des relations entre la teneur en soufre total de la couche exploitée, essentiellement de charbon, et la concentration en fer, respectivement lors du pic de contamination suivant l'ennoyage (tableaux 1 et 2) et, à long terme, après complet rinçage des vides miniers (tableaux 2 et 3). En l'absence de données

sur la teneur en soufre de la couche, la proximité de niveaux « marins » peut être un moyen d'évaluation (cf. figure 5). Les données du tableau 2 suggèrent que la concentration en fer de la résurgence, après complet rinçage des vides miniers, est grossièrement le huitième de la concentration de pic à la fin de l'ennoyage, le rinçage durant environ 4 fois plus que l'ennoyage.

Par ailleurs, Younger propose une approche de la concentration à long terme par la mesure de la distance entre la résurgence et la couche exploitée sub-affleurante la plus proche (dont les sulfures sont soumis à l'oxydation dans, ou sous, la zone de battement de la nappe).

Il serait des plus intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus par Agnès Blachère (Cabinet Césame) pour les mines de charbon françaises et à ceux de Jean-Michel Schmitt (Ecole des Mines de Paris) pour les mines métalliques. La prise en compte de la complexité et de la taille du système minier, en particulier des zones profondes non soumises au rinçage, permettrait peut-être d'affiner le modèle conceptuel de Younger. A l'inverse, la connaissance de la géochimie des AGS pourrait, dans les mines métalliques, éclairer d'un jour nouveau la théorie de la réoxygénation des eaux de percolation

pour expliquer la richesse des résurgences en sulfates et métaux dans les premiers temps du rinçage.

## Bibliographie

Baird, D.C., 1993. *Experimentation. An Introduction to Measurement Theory and Experiment Design*. 3rd edn. Prentice-Hall, New Jersey, 224 pp.

Bayless, E.R., Olyphant, G.A., 1993. *Acid-generating salts and their relationship to the chemistry of groundwater and storm runoff at an abandoned mine site in southwestern Indiana, USA*. J. Contam. Hydrol. 12, 313-328.

Blachère, A., 2004. Eaux souterraines et de surface, l'étude hydrogéologique dans le cadre d'un arrêt d'exploitation. Dans ouvrage SIM à paraître.

Fetter, C.W., 1999. *Contaminant Hydrogeology*. 2nd edn. Prentice-Hall, New Jersey, 500 pp.

Glover, H.G., 1983. *Mine water pollution – an overview of problems and control strategies in the United Kingdom*. Water Sci. Technol. 15, 59-70.

Schmitt, J.-M., 2002. *Eau et industrie extractive : impacts, prévision, gestion*. Mines Avenir 2002, 9-13.

Younger, P.L., Barbour, M.H., Sherwood, J.M., 1995. *Predicting the consequences of ceasing pumping from the Frances and Michael Collieries, Fife*. In: Black, A.R., Johnson, R.C. (Eds.), *Proceedings of the Fifth National Hydrology Symposium, British Hydrological Society*. Edinburgh, 4-7 Septembre 1995. pp. 2.25-2.33.

Younger, P.L., 1997. *The longevity of minewater pollution : a basis for decision-making*. Sci. Total Environ. 194/195, 457-466.

Younger, P.L., Adams, R., 1999. *Predicting mine water rebound*. Environment Agency R&D Technical Report W179. Bristol. 108 pp.

## Note

(\*) Younger et al. 1995, Younger et Adams 1999.