

**Conseil économique et social**

Distr. générale  
2 février 1998  
Français  
Original: anglais

**Comité des ressources naturelles**

Quatrième session

10-19 mars 1998

Point 6 de l'ordre du jour provisoire \*

**Protection de l'environnement et problèmes  
de remise en état de l'environnement résultant  
des activités minières****Techniques écologiques de pointe pour l'utilisation  
et le retraitement des déchets miniers****Rapport du Secrétaire général***Résumé*

Le présent rapport, établi en application de la décision 1996/306 du Conseil économique et social, expose l'utilisation et le retraitement des déchets miniers compte tenu de la diffusion croissante des technologies de réduction des déchets à la source. Il est consacré en particulier aux déchets solides résultant de l'extraction et du traitement des minerais de métaux de base ou précieux, ces déchets ayant sur l'environnement des impacts au nombre des plus irréductibles et des plus persistants. Il donne également, lorsqu'il y a lieu, des exemples pris dans d'autres types d'industries minières. Bien qu'il traite en particulier des déchets miniers, certaines des technologies et des méthodes décrites pourraient également s'appliquer aux sols contaminés et à d'autres déchets solides contenant des métaux.

---

\* E/C.7/1998/1.

## Table des matières

	<i>Paragraphes</i>	<i>Page</i>
I. Introduction .....	1	3
II. Déchets produits par l'industrie minière et problèmes connexes .....	2-8	3
III. Utilisation et retraitement .....	9-13	4
IV. Utilisation et retraitement des déchets : facteurs motivants et démotivants .....	14-16	4
V. Industries extractives et types de déchets .....	17-18	5
VI. Traitement des minéraux et production éventuelle de déchets .....	19-23	5
VII. Métallurgie extractive et types de déchets .....	24-31	6
A. Hydrométallurgie .....	25-29	6
B. Pyrométallurgie .....	30-31	7
VIII. Techniques de pointe permettant d'utiliser les déchets minéraux .....	32-35	7
A. Difficultés liées à l'utilisation des déchets minéraux .....	32	7
B. Utilisation sur place .....	33-34	7
C. Utilisation hors site .....	35	8
IX. Retraitement des déchets minéraux .....	36-41	8
A. Retraitement des déchets en vue de récupérer les sulfures générateurs d'acide .....	36-38	8
B. Retraitement par violixiviation .....	39-40	9
C. Solutions autres que l'utilisation du cyanure pour la récupération de l'or ...	41	9
X. Utilisation, retraitement et réduction des déchets à la source .....	42-49	10
A. Réduction des déchets à la source dans les industries extractives, le traitement des minéraux et la métallurgie extractive .....	42-46	10
B. Gestion des déchets et prévention tour à tour privilégiées .....	47-49	10
XI. Conclusions : optimisation de la réduction à la source, du retraitement et de l'utilisation .....	50-51	11
XII. Références .....		13

## I. Introduction

1. La richesse des ressources géologiques, conjuguées à un marché dont la situation échappe dans une large mesure au contrôle des sociétés métallurgiques, explique le niveau d'innovation technologique particulièrement bas qui caractérise le secteur minier. Cette situation tend cependant à changer : après une période d'évolution technologique limitée, sous la pression de l'opinion, préoccupée par les effets dommageables pour l'environnement des activités extractives, on a commencé à mettre au point des technologies appropriées, la réglementation obligeant désormais les entreprises à faire en sorte que leurs activités aient sur l'environnement moins d'effet ou pas d'effet du tout. Si l'on s'occupe surtout pour l'instant de «gestion des déchets» plutôt que de «prévention de la pollution», c'est sans doute que l'on considère généralement que lorsqu'on ferme un site d'exploitation, il suffit d'y effectuer des travaux de génie civil de remise en état pour pouvoir le déclasser sans avoir à supporter par la suite aucune responsabilité. Or, si tel était bien le cas il y a une vingtaine d'années, la technologie, la législation et les exigences des parties prenantes ont beaucoup évolué, les conceptions actuelles du traitement des déchets présentent toutes un point commun, c'est que les solutions peu durables (mais relativement peu coûteuses) aux problèmes d'environnement à long terme sont vues comme risquant d'entraîner par la suite procès et responsabilité civile.

## II. Déchets produits par l'industrie minière et problèmes connexes

2. Les métaux et les autres ressources minérales se présentent rarement à l'état naturel sous une forme suffisamment pure pour être commercialisés tels quels. Les métaux se rencontrent généralement combinés à de l'oxygène (sous forme d'oxydes), à du soufre (sulfures) ou à d'autres éléments (chlorures, carbonates, arséniates, phosphates, etc.). De même, à l'état naturel, les ressources minérales non métalliques telles que le charbon ou les minéraux à usage industriel contiennent souvent des impuretés résultant d'un processus physique ou chimique.

3. Bien que toute unité d'exploitation entrant dans le cycle de vie d'un site d'extraction puisse avoir un effet ou un impact sur l'environnement, le principal danger de ces activités tient au rejet délibéré (réglementé) ou accidentel (non réglementé) de déchets solides, liquides ou gazeux. Les caractéristiques de ces déchets, la nature de l'environnement touché et la distance sur laquelle ces déchets sont propagés sont les principaux facteurs qui permettent de déterminer

leurs incidences sur l'environnement. L'attitude et les valeurs de la société en cause ne sont pas étrangères non plus à la manière dont certains rejets sont perçus par les différentes parties prenantes : cet aspect plus subjectif, qui s'ajoute aux caractéristiques quantifiables et mesurables des déchets eux-mêmes et de l'environnement touché détermine donc en partie l'impact écologique d'une exploitation sur un site.

4. Étant donné que l'on comprend de mieux en mieux les incidences des activités minières sur l'environnement, il se pourrait que, peu à peu, les préoccupations en matière de protection de l'environnement l'emportent sur les arguments justifiant l'exploitation de certaines réserves minérales (Hodges, 1995). L'ensemble des industries extractives doit s'employer, en concertation avec un éventail aussi large que possible d'intervenants, à améliorer inlassablement ses performances en matière de contrôle et de gestion des activités minières tout au long du cycle de vie d'une exploitation, ce qui suppose aussi de mieux rentabiliser l'utilisation des ressources.

5. La gangue (substance qui entoure le ou les minerais exploitables, et dont la valeur marchande est marginale, voire nulle) forme l'essentiel des déchets solides résultant de l'extraction et du traitement ultérieur des minéraux. En fonction du moment où l'on sépare les minéraux recherchés de leur gangue, celle-ci se présente soit telle quelle, soit sous forme de résidus miniers (après traitement du minéral), de scories ou de laitier (après fusion), ou de déchets divers (poussières, boues résiduelles après lavage, ou résidus résultant de la lixiviation). Ces déchets contiennent parfois des quantités importantes du minéral ou du métal recherché, en raison du faible rendement du traitement utilisé, de contraintes technologiques ou de facteurs d'ordre minéralogique.

6. Les entreprises concernées ont à choisir entre une amélioration de la teneur (concentration d'un ou de plusieurs métaux présents dans le produit final ou intermédiaire), et celle du taux de récupération (rapport entre la quantité de métal contenue dans le minerai parvenant à l'usine de traitement et le produit prêt à être commercialisé). Il est possible d'obtenir un produit à très haute teneur en éliminant une partie importante du minerai initial (c'est-à-dire en acceptant un taux de récupération faible) ou d'atteindre un taux de récupération très élevé en diluant à l'excès les concentrés avec des matières de teneur plus faible. Dans la pratique cependant, aucune de ces deux options ne constitue la solution idéale d'un point de vue économique. On détermine celle-ci en comparant les recettes tirées de l'extraction de métal supplémentaire avec le capital et les frais d'exploitation à prévoir, dans la perspective plus générale de la faisabilité technique. Dans tous les cas, une certaine proportion du ou

des métaux recherchés finira sous forme de déchets, de même que leur gangue.

7. Dans le cas de l'exploitation des métaux non ferreux, la gangue forme généralement l'essentiel d'un gisement. C'est particulièrement vrai en ce qui concerne le minerai aurifère, dont la teneur en or est si faible (de l'ordre de 5 grammes par tonne au plus) qu'après traitement, c'est pratiquement la totalité du minerai extrait qui est éliminée sous forme de déchets, à moins qu'il ne contienne d'autres substances exploitables, telles que des métaux de base. Dans le cas d'autres ressources minérales, la proportion de gangue par rapport au minerai exploitable peut être moins importante, mais il n'en reste pas moins que l'évacuation de la gangue reste un problème important, et que, pour de nombreuses exploitations minières, l'évacuation des déchets donne autant de travail que l'extraction des minéraux proprement dite.

8. Il va sans dire que les déchets évacués dans le cadre des activités minières constituent une source importante de substances risquant d'être nocives pour l'environnement. Mais elles ne le sont pas nécessairement, car de nombreux facteurs viennent en atténuer les effets, qu'ils tiennent aux procédés employés pour le traitement, qui déterminent les caractéristiques chimiques ou physiques des déchets, ou à l'environnement dans lequel ces déchets sont rejetés (climat, topographie, caractéristiques de l'écosystème).

### III. Utilisation et retraitement

9. L'utilisation et le retraitement sont deux des divers moyens utilisés en fin de chaîne (mesures correctives) pour résoudre les problèmes environnementaux que posent les déchets résultant des activités minières. Ce sont pendant longtemps les mesures correctives de faible technicité qui ont eu la faveur des industries extractives, mais elles sont récemment devenues plus techniques, étant concurrencées par l'utilisation croissante de technologies de réduction des déchets à la source.

10. Parmi les solutions au problème des déchets, l'utilisation et le retraitement de ces derniers présentent moins d'avantages que la réduction à la source (prévention de la pollution) mais, d'un point de vue écologique, ils constituent une meilleure solution que le traitement ou l'évacuation (Allen et Rosselot, 1997).

11. Par utilisation des déchets on entend normalement utilisation sans traitement (éventuellement au prix d'une modification de l'aspect physique); dans le cas des déchets provenant des activités minières, l'utilisation peut nécessiter,

pour être envisageable, le retraitement destiné à les débarrasser d'une partie ou de la totalité des métaux recherchés ou des polluants qu'ils contiennent. Seuls peuvent être utilisés, surtout *ex situ*, les déchets suffisamment «propres» puisque le principal problème est en l'occurrence le risque de disperser les polluants qu'ils contiennent sur une étendue beaucoup plus vaste. En règle générale, les déchets sont d'autant plus utilisables qu'ils contiennent peu de polluants. En raison de ces contraintes, l'utilisation peut présenter un intérêt égal pour les exploitations actuelles et pour les déchets plus anciens ou laissés pour compte.

12. Pour le retraitement, c'est l'inverse qui est vrai, puisqu'il est d'autant plus rentable que les déchets sont plus riches en métaux recherchés. Le retraitement visant à récupérer une ou plusieurs substances exploitables (métaux, minéraux et sels métalliques) est plus facilement applicable aux déchets résultant d'activités minières plus anciennes, du fait que les minerais exploités à l'époque étaient plus riches et les technologies moins efficaces.

13. Le retraitement n'est pas nécessairement bénéfique pour l'environnement, notamment lorsque les résidus de déchets, après retraitement, contiennent encore des quantités importantes d'autres polluants (minéraux autres que les minéraux recherchés). Mais la réglementation impose souvent, lorsque des déchets sont retraités, d'évacuer les résidus finals dans des conditions de sûreté écologique, par exemple vers un site équipé à cet effet, alors que ce n'était pas le cas avant le retraitement.

### IV. Utilisation et retraitement des déchets : facteurs motivants et démotivants

14. Il existe de nombreux facteurs qui encouragent à adopter des approches novatrices pour remettre en état les exploitations minières polluées, et notamment à utiliser et retraiter les déchets. Il existe également une série de facteurs démotivants. Parmi les principaux facteurs positifs, on mentionnera les progrès technologiques, la hausse du prix des métaux, la pénurie des produits de base, l'utilisation de certains produits de base à des fins stratégiques, la recherche d'une utilisation maximale des ressources, le programme Action 21, le souci d'assurer la viabilité, la nécessité de dissocier croissance économique et impacts sur l'environnement, le principe du pollueur payeur, les obligations et responsabilités légales, l'obligation de déposer un cautionnement pour certaines exploitations, et les pressions exercées par diverses parties intéressées.

15. Le fait que le grand public juge éventuellement que les méthodes actuelles ne sont pas les meilleures ni même écologiquement acceptables à moyen et long terme peut jouer aussi, bien que ce facteur soit vraisemblablement moins sensible dans les industries extractives que dans d'autres secteurs industriels. Aux niveaux local et régional cependant, cet élément peut avoir son importance.

16. Les autres facteurs motivants sont notamment les régimes réglementaires qui encouragent les innovations dans le domaine des technologies et de la gestion des ressources, et les initiatives prises par les entreprises en vue de dégager des solutions plus efficaces et moins coûteuses aux problèmes environnementaux actuels et à venir (Kovalick, 1993 et Ayen, 1994).

## V. Industries extractives et types de déchets

17. D'une manière générale, il existe trois types d'extraction minière : extraction à ciel ouvert, extraction souterraine et extraction *in situ* (extraction par dissolution). L'application de ce dernier type d'extraction est assez limitée, bien que l'on y ait parfois recours pour l'exploitation de minéraux résiduels à mesure que la teneur baisse dans les mines souterraines ou à ciel ouvert. Dans l'exploitation minière à ciel ouvert, les méthodes d'extraction en carrière (extraction des métaux de base et des métaux précieux) ou en mine (exploitations houillères) dominent. Quelle que soit la méthode utilisée, l'exploitation minière ne va jamais sans traitement d'un type ou d'un autre. Pour des matériaux relativement purs ou homogènes, le traitement peut se réduire au broyage et au calibrage (certaines extractions de zéolithes naturels, de roches de carrière) ou au lavage physique (certaines exploitations houillères). Ces options simples ne sont possibles que là où les minéraux recherchés constituent la plus grande partie des matières extraites. Dans ces cas, c'est l'extraction minière elle-même, et non le traitement ultérieur, qui entraîne des rejets et des impacts sur l'environnement.

18. Les deux principaux déchets de l'exploitation à ciel ouvert et de l'exploitation souterraine susceptibles d'être retraités et utilisés sont les déchets minéraux (terrains de recouvrement et roches stériles) et les eaux polluées (rejets acides ou métalliques des décharges et des travaux d'exploration). Les eaux polluées représentent également un problème important dans l'exploitation minière *in situ*, encore que dans ce cas les substances chimiques ajoutées pour faciliter la lixiviation des métaux peuvent aussi contribuer à contaminer et polluer l'eau.

## VI. Traitement des minéraux et production éventuelle de déchets

19. Le traitement des minéraux s'entend du traitement physique qui ne donne lieu à aucune modification chimique des composants minéraux du minerai, mais permet de séparer et de concentrer les minéraux en différentes phases, par exemple, de séparer les minéraux recherchés de la gangue, ou un minéral exploitable d'un autre (Hayes, 1993). Pour les ressources minérales non métalliques, le traitement peut livrer un produit final; en revanche, pour les métaux, il livre un produit intermédiaire, dans la mesure où il ne modifie en rien la combinaison chimique métal-oxygène, métal-soufre, etc. En règle générale, le traitement des minéraux est une phase intermédiaire entre l'exploitation minière et la métallurgie extractive, encore qu'il y ait des exceptions telles la lixiviation de minerai de décharge ou de terril. Les produits du traitement des minéraux (les concentrés) constituent les apports de la métallurgie extractive (procédés hydrométallurgiques ou pyrométallurgiques, voir par. 24 à 31 ci-après).

20. Les méthodes de traitement des minéraux peuvent se répartir en deux catégories : comminution et séparation des minéraux en différentes phases. On a recours au concassage et au broyage (combinés avec le calibrage) pour séparer les minéraux rentables et non rentables, en vue d'obtenir les apports voulus pour la suite du traitement, qui livrera des minéraux en d'autres phases. Cependant, en règle générale, le broyage ne donne pas un produit minéral totalement homogène, certaines particules pouvant contenir deux espèces minérales ou plus, et présenter les caractéristiques physiques ou chimiques propres à un tel mélange. Le résultat est que des minéraux recherchés peuvent être évacués avec la gangue, ou que des minéraux de gangue peuvent diluer le concentré minéral.

21. Le concassage et le broyage se font à l'aide de broyeurs (à mâchoires, à cylindres, à cônes, ou de broyeurs plus fins à barres, à boulets, à marteaux et à percussion). Le concas consiste à transformer les blocs de minerai en particules ne dépassant pas 25 millimètres de diamètre. Les matières obtenues peuvent ensuite passer dans les broyeurs fins ou être traitées directement si le minéral exploitable est suffisamment pur. Le broyage donne des particules d'une taille supérieure à 10 microns environ<sup>1</sup>. À la différence du concassage, effectué sur du minerai tout venant, le broyage se fait presque toujours par voie humide et il en résulte une espèce de boue, suspension de fines particules dans l'eau.

22. La séparation des minéraux peut s'effectuer sur la base des différences de caractéristiques telles que la dimension ou

la densité des particules, les propriétés magnétiques ou électriques ou la chimie des surfaces (flottation).

23. La technique de séparation à retenir dépend d'un certain nombre de facteurs propres au site en cause, notamment la taille de l'exploitation, la dimension à laquelle les particules des minerais sont suffisamment purifiés, les considérations minéralogiques, le circuit global de traitement (de l'exploitation minière à la métallurgie extractive), etc. Chaque procédé livre finalement un concentré (contenant une proportion importante du minéral ou des minéraux recherchés), des résidus (contenant principalement des minéraux non rentables ou de rentabilité marginale) et des mixtes (particules dont le traitement n'a pas permis de séparer totalement les minéraux recherchés et la gangue). Les mixtes sont généralement rebroyés ou traités par un autre procédé pour libérer ou récupérer d'une autre façon le minéral exploitable, cependant que les résidus sont évacués comme déchets. Des différents procédés de séparation, c'est désormais la flottation qui est la méthode la plus communément utilisée pour produire des concentrés de minéraux, en particulier à partir de minerais de sulfures. D'autres stades de traitement des minéraux ne risquent guère d'avoir un impact sur l'environnement extérieur, du fait que le traitement y est pratiquement en circuit fermé, 100 % de l'apport se retrouvant au stade suivant. La flottation est souvent la dernière phase, où les déchets (résidus) sont produits et rejetés vers l'environnement extérieur. Les résidus produits lors de la flottation sont principalement composés de fines particules de minéraux de gangue contenant du ou des minéraux exploités en proportion diverse selon le procédé utilisé, son efficacité et les contraintes minéralogiques.

## VII. Métallurgie extractive et types de déchets

24. La métallurgie extractive peut se subdiviser en deux grandes catégories, l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie. Une troisième, l'électrométallurgie, ne sera pas étudiée ici, l'application dans le secteur minier en étant plus limitée (principalement production d'aluminium, et de zinc dans certains cas).

### A. Hydrométallurgie

25. Les méthodes hydrométallurgiques de traitement des minerais sont surtout utilisées pour l'or, l'uranium, le cuivre et l'aluminium, et dans une moindre mesure pour le zinc et

le nickel. En particulier, les minerais contenant des substances oxydes (environ 10 % des minerais non ferreux) sont traités par lixiviation. Dans un premier temps, le minerai est traité aux normes des procédés suivants, puis on ajoute un agent de lixiviation pour extraire le ou les métaux exploités sous forme de solution diluée, riche en métal, qui passe ensuite à la phase de récupération du métal, qui peut se faire par précipitation, extraction par solvant ou par électrolyse.

26. La lixiviation est habituellement pratiquée à l'aide des réactifs et solvants ou des méthodes suivantes :

a) Acides (acide chlorhydrique, acide sulfurique) pour des minerais de cuivre oxydés (azurite, malachite, ténorite, chrysocale), et des oxydants (sulfate ferreux) pour les minerais de cuivre moins oxydés (chalcosine, bornite, covellite, chalcopyrite);

b) Alkalis et réactifs ammoniacaux (hydroxyde ou carbonate de sodium/d'ammonium) pour certains minerais de cuivre;

c) Lixiviation à l'aide de bactéries permettant d'obtenir à moindres frais des acides et des oxydants à partir de minéraux sulfurés;

d) Cyanure (solution de cyanure de potassium ou de sodium) pour la dissolution de l'or;

e) Mercure, réactif d'amalgamation dans l'extraction de l'or; il est communément utilisé dans les petites exploitations minières, en particulier dans les pays en développement.

27. Les réactifs de lixiviation susmentionnés sont utilisés selon les méthodes suivantes :

a) Lixiviation de minerais de décharge sur une surface non revêtue. Le terme vient de la pratique qui consiste à lessiver des matières déposées à l'origine comme roches de rebut; toutefois, il s'applique également au sulfure brut, de faible teneur, ou aux roches de sulfure et d'oxyde de qualité mixte placées pour être lessivées sur une surface n'ayant subi aucune préparation;

b) Lixiviation en terril de minerais pauvres, placés sur une plate-forme spécialement aménagée revêtue de matériaux synthétiques, d'asphalte ou d'argile compactée. Dans la lixiviation en terril, le minerai est souvent prétraité par broyage ou concassage avant d'être placé sur la plate-forme;

c) Lixiviation en cuve, qui remplace avantageusement la lixiviation de résidus et la lixiviation en terril pour une production importante et se pratique dans un système de cuves ou de citernes à l'aide de solutions concentrées d'agents de lixiviation et de minerai brut ou de minéraux concentrés.

28. La procédure de récupération, qui est fonction du métal, fait souvent appel à la cémentation préférentielle (cuivre ou or) ou encore à l'extraction par solvant ou l'électrolyse.

29. Les déchets produits au cours du traitement hydrométallurgique qui se prêtent au retraitement et à l'utilisation comprennent notamment les suivants :

a) Minerais épuisés et concentrés appauvris, contenant des résidus chimiques du traitement et des minéraux ou métaux recherchés ou autres;

b) Boues résultant de l'extraction par solvant ou de la récupération par électrolyse, et contenant des matières qui peuvent s'accumuler dans les citernes d'extraction/de récupération par électrolyse (particulats, émulsion de phases organiques et aqueuses);

c) Électrolytes épuisés produits pendant les opérations de récupération par électrolyse et mêlés d'impuretés solubles;

d) Déchets pollués au mercure, provenant de l'utilisation de cette substance dans l'amalgamation.

## B. Pyrométallurgie

30. Les procédés pyrométallurgiques sont à l'heure actuelle ceux qui servent le plus pour la récupération du cuivre, du zinc, du nickel et du plomb à partir des gisements de sulfures. D'une façon générale, le procédé consiste à traiter les minéraux pour obtenir un concentré généralement par flottation, soumis ensuite à la fusion, où les minéraux perdent leur structure cristalline (fusion oxydante). Le procédé est différent pour chaque métal ou série de métaux. Par exemple, la fusion du cuivre produit une matte (qui contient jusqu'à 40 % de métal) qui, à l'état fondu, est convertie et séparée en cuivre blister (d'une teneur d'environ 97-99 %) et laitier de silicate de fer, dont la valeur économique pourrait justifier que l'on en poursuive le traitement. Les produits métalliques blister étant trop impurs pour la plupart des applications industrielles, un affinage s'impose. Cette opération s'effectue souvent par chauffage en four à réverbère, lorsque le produit à affiner contient peu d'impuretés, ou par électrolyse quand on veut récupérer d'autres métaux. Les cathodes ainsi obtenues, généralement pures à environ 99,8-99,9 %, sont directement commercialisées auprès des ateliers de première transformation ou coulées en profilés (barres à fils). Le plomb, en revanche, est produit par des opérations successives d'agglomération, de réduction de l'aggloméré en haut-fourneau, et d'affinage pyro- ou hydrométallurgique du plomb d'oeuvre.

31. Les procédés pyrométallurgiques émettent cinq substances qui peuvent être polluantes : fumées, émissions fugaces, effluents, poussières de fours industriels et déchets de combustion, ces deux dernières substances étant celles qui se prêtent au retraitement et à l'utilisation ultérieure.

## VIII.

### Techniques de pointe permettant d'utiliser les déchets minéraux

#### A. Difficultés liées à l'utilisation des déchets minéraux

32. Il existe relativement peu d'exemples d'utilisation de déchets minéraux dans le secteur de l'extraction des métaux communs et des métaux précieux. Deux raisons expliquent cette situation. La première tient à la présence dans ces déchets de minéraux (métaux) susceptibles de causer des dégâts à l'environnement. L'utilisation des déchets peut ainsi être perçue comme entraînant par dispersion une contamination et une pollution plus étendues de l'environnement. La deuxième tient au coût élevé du stockage des déchets minéraux, même s'ils ne contiennent pas de contaminants. En règle générale, les frais de transport au-delà d'une zone relativement limitée dépassent de loin la valeur marchande des déchets. Le coût relativement faible des matériaux primaires qui concurrencent les déchets (agrégats primaires et secondaires, autres matériaux de remblayage, etc.) constitue un autre obstacle.

#### B. Utilisation sur place

33. On peut, dans une large mesure, surmonter les deux premiers obstacles en trouvant le moyen d'utiliser les déchets sur place. Cette pratique est déjà largement suivie dans la plupart des mines, les déchets étant utilisés dans des applications telles que l'endiguement, la construction et l'entretien de routes et les applications géotechniques. Mais la principale utilisation possible des déchets sur place est le remblai, en particulier dans les mines souterraines. Là encore, se pose toutefois le problème des contaminants et de la dispersion éventuelle une fois les déchets en place, d'où la pratique qui consiste à les remblayer avec du ciment Portland, des cendres de combustibles pulvérisées et d'autres agents stabilisateurs (silicates solubles), à la fois pour renforcer les caractéristiques physiques et pour réduire les risques de lixiviation des métaux dans les eaux souterraines. On utilise largement les

déchets comme remblais dans les mines souterraines peu profondes (charbon et chaux).

34. À l'avenir, on peut envisager des applications mineures, probablement particulières à certains sites, telles que le traitement de l'eau, notamment l'utilisation de roches de rebut finement broyées comme matière d'absorption dans les collecteurs de flottation (Heiskanen et Yao, 1992) et l'utilisation de la pyrite (récupérée par retraitement, voir sect. IX ci-dessous) pour éliminer par absorption dissout l'arsenic dissout (Zouboulis *et al.*, 1993).

### C. Utilisation hors site

35. Toivola et Toivola (1997) ont fait breveter une méthode permettant de produire un matériau de construction à partir d'un mélange de déchets thermoplastiques et d'agrégats minéraux non criblés. On peut en fabriquer des dalles, des briques ou des parpaings. Aljaro (1991) a fait état de l'utilisation d'effluents (résidus non traités) comme source d'eau pour l'agriculture, à la suite d'une étude financée par la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Chili). Les effluents non traités ont été acheminés de la mine de cuivre et de molybdène d'El Teniente pour l'irrigation des cultures et l'approvisionnement en eau du bétail. On avait déterminé quelles cultures résistaient à des niveaux élevés de cuivre, de molybdène, de manganèse et de sulfate (ainsi qu'aux conditions pédologiques et hydriques locales), puis pratiqué ces cultures. La teneur en métaux des parties comestibles des récoltes n'était pas importante, restant en-deçà des niveaux autorisés. Toutefois, le risque d'accumulation de métaux dans les sols et les eaux souterraines a toutes les chances de restreindre fortement cette utilisation. Parmi les autres applications sur lesquelles on a des informations précises, on peut citer l'utilisation de grandes quantités de résidus propres de taconite comme matériaux de construction de levées, de barrages et de routes aux États-Unis, l'utilisation de faibles quantités de résidus propres de taconite dans la production de céramique, de briques et de carreaux ainsi que l'utilisation de déchets de métaux communs et de métaux précieux dans la production de briques à forte teneur en silicate de calcium, de béton aéré, de matériaux de construction légers à base de mousse, de parpaings montés à sec et de verre (Mitchell, 1990).

## IX. Retraitement des déchets minéraux

### A. Retraitement des déchets en vue de récupérer les sulfures générateurs d'acide

36. En séparant des déchets en déchets riches en sulfures et pauvres en sulfures, on s'ouvre de nouvelles options pour gérer les déchets dans les exploitations en cours, et traiter les problèmes écologiques sur les sites où des déchets non triés produisent de l'acide. Dans les deux cas, en théorie du moins, on peut déverser la partie riche en sulfure, la moins volumineuse, dans des décharges construites à cet effet ou l'isoler en «cellules» enfouies dans les déchets en vrac, tandis que la partie pauvre en sulfure, qui représente un volume important, peut être évacuée comme déchets inertes, ou utilisée sur place ou hors site.

37. Dans un article récent, Humber (1995) a analysé la relation entre la récupération des sulfures (pyrite et pyrrhotite), la formation d'acide et les coûts estimatifs (exploitation et investissement initial) du retraitement. Il passe en revue plusieurs techniques de traitement des minéraux permettant de séparer les sulfures générateurs d'acide des résidus miniers existants, de manière à obtenir une partie sans sulfure et un petit volume de résidus riches en sulfures. Les méthodes examinées comprenaient la séparation par gravimétrie (concentrateur, centrifuge, dispositif de secouage, concentrateur à spirale, etc.), la flottation, la séparation magnétique et le passage en cyclone. Elles ont été mises à l'essai sur des échantillons provenant de trois mines. Les concentrés de sulfure ont également été examinés sous l'angle de la valeur commerciale<sup>2</sup>. Pour chacun des trois échantillons, les minéraux sulfurés étaient bien libérés, à des concentrations suffisamment faibles pour permettre (théoriquement) de produire des petits volumes de concentré de sulfure. Aucune des méthodes de gravimétrie éprouvées n'a donné de résidus non réactifs (sans capacité nette de production d'acide). La technique de flottation a eu plus de succès, bien que le résultat ait semblé tenir, dans une certaine mesure, à la simplicité de la minéralogie et à la fine granulométrie des sulfures. Le retraitement par flottation a réduit non seulement le risque de formation d'acide dans la partie sans sulfure mais aussi la concentration d'autres métaux ayant un effet sur l'environnement tels que le cadmium, le cuivre et le zinc.

38. À partir des essais ayant produit les déchets où le risque de formation d'acide était le plus faible, on a calculé les dépenses d'exploitation et l'investissement initial à prévoir. Ce dernier allait de 130 000 dollars à 1 275 000 dollars, et les dépenses d'exploitation de 0,50 dollar par tonne à 1,35 dollar par tonne. Cependant, l'article ne disait rien des dépenses d'exploitation ni de l'investissement initial consenti pour les sites existants, il est difficile d'apprécier l'impor-

tance de ces dépenses supplémentaires. Il existe toutefois d'autres exemples où cette méthode a été appliquée à grande échelle dans des exploitations en activité, et non pas à des déchets anciens. La Magma Copper Company a fabriqué dans sa Superior Mine des produits de pyrite en soumettant les résidus du circuit du cuivre à un circuit supplémentaire de flottation, ce qui lui a permis d'obtenir un produit de résidus moins réactif, un produit de pyrite fine presque pure et du concentré de pyrite peu affiné (45 à 47 % de fer, 48 à 50 % de soufre) [USEPA, 1994a]. La société a vendu environ 500 tonnes de produits contenant de la pyrite par mois en 1994, soit 90 à 95 % du marché des États-Unis [USEPA, 1994b]. Dans ce cas cependant, les produits à base de pyrite ont été commercialisables parce que le minerai a) avait une teneur en pyrite atteignant 25 % et b) contenait peu d'impuretés. De ce fait, il est possible que ce gisement présente des caractéristiques à peu près uniques, et que l'application de cette méthode à d'autres exploitations soit plus difficile qu'il n'y paraisse. Comme on l'a déjà dit, la production de pyrite n'était pas motivée par des considérations strictement écologiques (bien que la société ait reconnu les avantages découlant d'une réduction des exhaustes acides), mais par la demande de ce produit : s'il n'y avait pas de demande, on ne récupérerait pas la pyrite. On voit bien là les problèmes que posent les minéraux comme la pyrite, qui ont peu ou pas de débouchés ou de valeur marchande.

## B. Retraitement par biolixiviation

39. La lixiviation bactérienne a été utilisée pour exploiter les minerais aurifères réfractaires qui ne pouvaient être extraits du fait de leur imbrication dans le socle cristallin

40. avec la pyrite, que les bactéries peuvent facilement dissoudre. Les progrès de la biotechnologie, conjugués aux avantages écologiques et économiques que les techniques de lixiviation bactérienne semblent présenter par rapport aux autres procédés classiques à large échelle, à plus forte intensité de capitaux et plus polluants, pourraient modifier profondément la structure de l'industrie minière. En mars 1994, Newmont Gold a fait savoir que des essais sur le terrain avaient confirmé la viabilité économique d'un procédé de biolixiviation breveté permettant d'extraire de l'or de matières à faible teneur en sulfure dont l'exploitation n'aurait auparavant pas été jugée rentable (Brewis, 1995). La méthode consiste à utiliser *Thiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans* pour oxyder les sulfures aurifères sur une plate-forme de lixiviation de terril, puis à procéder à une lixiviation par le cyanure ou le thiosulfate d'ammonium pour extraire l'or. Malgré la lenteur cinétique de la réaction, cette méthode est économiquement viable du fait du faible coût des apports biologiques. La biolixiviation n'a eu à ce jour d'applications commerciales que pour récupérer de l'or, de l'uranium, du cuivre et du nickel. On l'a également proposée pour la lixiviation en terril de minerais de zinc à faible teneur.

## C. Solutions autres que l'utilisation du cyanure pour la récupération de l'or

41. Si la cyanuration constitue le principal procédé utilisé pour extraire l'or dans les exploitations industrielles (100 % de la production industrielle d'or en Afrique du Sud) (Adams, 1997), le cyanure n'est pas le seul agent de lixiviation pouvant servir à récupérer l'or. On peut également utiliser le thiocyanate (Adams, 1996) et les solvants halogénés, notamment le gaz chloré, l'hypochlorite de sodium, l'iode et le brome (Ramadorai, 1994). Aucune de ces substances ne saurait être considérée comme un produit de substitution à tout faire pour le cyanure, mais elles peuvent servir à traiter certains types de minerais ou de déchets aurifères pour lesquels il n'existe aucun procédé économiquement ou techniquement viable au moment de l'évacuation. Tout porte à croire, en ce qui concerne les minerais non réfractaires, que les solvants halogénés ne sont ni plus efficaces, ni plus rentables que le cyanure. En revanche, ils pourront peut-être servir plus dans le traitement des minerais et des déchets réfractaires, bien que des études plus poussées soient nécessaires dans ce domaine.

## X. Utilisation, retraitement et réduction des déchets à la source

### A. Réduction des déchets à la source dans les industries extractives, le traitement des minéraux et la métallurgie extractive

42. Les technologies propres font si bien partie des techniques de réduction des déchets et de prévention de la pollution (réduction à la source) qu'on voit souvent les deux comme synonymes. Elles sont utilisées surtout dans les industries de transformation (où elles ont en fait été mises au point). En principe, pour apprécier dans quelle mesure une technologie est «propre», il faudrait voir également si en amont les fournisseurs, et en aval les utilisateurs et les responsables de l'évacuation des produits, ont un comportement écologique. Mais dans la pratique, ce n'est pas facile, et on se contente donc d'évaluer le procédé lui-même.

43. Dans le cadre d'un système global de gestion, on a recours à différentes méthodes d'application générale (qui ne sont pas limitées à un secteur déterminé) pour faciliter la prévention de la pollution : a) perfectionnement des opérations; b) modification des techniques de traitement; c) recyclage, récupération et réutilisation des déchets; d) substitution de matières premières; e) nouvelles spécifications du produit.

44. S'agissant d'extraction et de traitement des métaux de base et des métaux précieux, ce sont les méthodes a), b) et c) qui offrent les applications les plus évidentes – encore qu'on puisse parfois modifier la nature des apports [méthode d)] – par exemple dans le cas de pratiques extractives plus sélectives et plus précises («juste au bon endroit») (Almgren et coll., 1996). La méthode e) n'est guère applicable aux industries extractives, et on n'en parle donc pas ici.

45. Lorsque plusieurs technologies propres sont en concurrence, on peut les classer selon la réduction des risques qu'elles permettent pour ce qui est de la production de déchets, selon les frais de traitement ou d'évacuation, les responsabilités futures, les risques de sûreté, et le coût des matériaux auxquels elles font appel. Pour déterminer à quel point une technologie donnée est propre, on se fonde dans une large mesure sur une évaluation de l'utilisation des ressources et de l'impact sur l'environnement, réalisée par la méthode de l'inventaire du cycle de vie et celle de l'évaluation du cycle de vie.

46. Bien que la réduction maximale des déchets présente des avantages très divers, elle se heurte souvent à des obsta-

cles d'ordre institutionnel, les chefs d'entreprise hésitant par exemple du fait qu'ils ne sont pas certains du rendement des investissements consentis, qu'ils craignent que la production se trouve interrompue pendant un certain temps, que la qualité des produits en souffre, et qu'ils redoutent de livrer des renseignements confidentiels aux consultants auxquels ils feraient appel. La meilleure démarche en la matière consiste à s'assurer la participation de la haute et de la moyenne hiérarchie, des responsables des opérations et du personnel d'exécution, autrement dit de tous les échelons de l'entreprise (Haas, 1995).

### B. Gestion des déchets et prévention tour à tour privilégiées

47. Dans les industries extractives, la tendance actuelle à privilégier la réduction des déchets à la source est contre-carrée par des obstacles tels que la présence dans les gisements (de minerais de métaux de base et de métaux précieux) de minéraux de peu de valeur, mais dangereux pour l'environnement, tels que l'arsenic et la pyrite. L'arsenic est un exemple particulièrement parlant des problèmes et des questions que suscitent les impuretés non rentables et toxiques communément trouvées dans les combinaisons minérales de valeur. L'arsenic est essentiellement un sous-produit de la production d'autres métaux plus importants tels que le cuivre, le plomb, le zinc, l'or, l'argent et l'étain. Le trioxyde d'arsenic de qualité marchande est récupéré à la fusion ou au grillage de minerais ou de concentrés de métaux non ferreux dans 18 pays au moins (Broad, 1997). Le marché futur ne semble pas très prometteur pour l'arsenic, les alliages plomb-arsenic étant remplacés dans les piles par des équivalents plomb-calcium, et les utilisations de faible technicité (traitement des bois d'oeuvre) étant de plus en plus menacées.

48. Nombre des techniques de traitement mises au point pour évacuer dans l'innocuité les déchets dangereux ne sont pas applicables aux déchets minéraux contenant de l'arsenic. En revanche, on travaille actuellement sur plusieurs options :

a) *Technique de stabilisation en minéraux de synthèse* : elle consiste à ajouter les produits chimiques voulus aux métaux traités par précipitation ou convertissage, et donc sous forme non volatile, de manière à obtenir durant le convertissage la combinaison minérale synthétique recherchée (White et Toor, 1996). Cette technique a servi à stabiliser des poussières de gaz contenant du trioxyde d'arsenic sous la forme d'un minéral peu soluble du type de l'apatite ( $\text{Ca}_5(\text{AsO}_4)_3\text{F}$ );

b) *Arséniates ferreux* : il y a plusieurs années qu'on mène des recherches sur la précipitation à haute température de l'arsenic dissous livrant des cristaux d'arséniates ferreux stables (voir par exemple Swash et Monhemius, 1994, et les références qui y sont citées). On obtient ces arséniates ferreux par dissolution du composé d'arsenic [de trioxyde d'arsenic habituellement (Van Weert et Droppert, 1994)], puis convertissage en scorodite cristalline ( $\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) à l'aide de solutions ferriques acides de nitrate (ou de sulfate), à des températures allant de 140 à 160 °C;

c) *Incorporation à des scories de silicates* : plutôt que d'obtenir des formes minérales peu solubles, on peut aussi incorporer l'arsenic à des scories de silicates. La recherche a montré qu'on pouvait incorporer jusqu'à 10 % d'arsenic (en poids) à des scories vitreuses de silicates et que les quantités d'arsenic libéré ensuite par lixiviation restaient alors très faibles (Machingawuta et Broadbent, 1994).

49. Malgré ces progrès récents, le problème de la récupération, du traitement et de l'évacuation de l'arsenic reste à résoudre. Faute de marchés des sous-produits contenant de l'arsenic, il n'y a pas d'incitation financière pour la récupération (bien que l'on en récupère souvent sans l'avoir cherché au cours des opérations de traitement), alors que les conséquences financières auxquelles on s'expose en ne faisant rien ne sont pas assez graves pour motiver a contrario. Lorsqu'il n'y a pas de débouché pour un déchet ou un sous-produit donné, et que l'impureté considérée est inévitable dans les apports du procédé utilisé, aucune solution technique véritablement «propre» ne saurait être mise au point. À défaut, on peut soit a) ne pas exploiter les minerais contenant des métaux et minéraux à problème pour lesquels il n'y a pas de débouché, soit b) accepter de considérer que la meilleure option consiste à récupérer, isoler et traiter efficacement les éléments faisant problème avant de les évacuer. En fait, dans la pratique, c'est cette dernière option qui prédomine, encore qu'on ait vu dans certains cas refuser un projet d'exploitation minière pour cause de risque globalement inadmissible (cas de la New World Mine à la lisière du parc national Yellowstone, aux États-Unis), précédent possible pour des restrictions futures à l'extraction minière sur des sites «sensibles» qui ne seraient pas autrement «à l'abri» de ces activités (ou aux abords de tels sites). À tout le moins, le caractère déplaisant des restrictions aux activités d'extraction pourrait inciter à récupérer et traiter avant évacuation les métaux et métalloïdes secondaires non rentables, si cette option est prouvée la plus écologique par des études scientifiques rigoureuses.

## XI. Conclusions : optimisation de la réduction à la source, du retraitement et de l'utilisation

50. Il est difficile de donner une appréciation absolue des technologies de pointe, du fait que les outils auxiliaires d'évaluation, tels que l'évaluation du cycle de vie, ne sont pas encore au point. On ne comprend pas entièrement non plus les incidences écologiques et toxicologiques de l'utilisation et du retraitement, encore que les évaluations écotoxicologiques par site aient progressé suffisamment pour réduire les incertitudes qui s'attachaient à certaines techniques de dépollution sur les sites d'exploitation (Pascoe, 1994; Greene et Barich, 1994). Ceux qui s'occupent de gestion des déchets ont pourtant de plus en plus de raisons de mettre au point des méthodes viables à terme, et de choisir une démarche stratégique pour protéger l'environnement, au mieux des possibilités concrètes (Barton et coll., 1996). En fait, il est indéniable que les industries extractives seront toujours amenées à pratiquer parallèlement réduction des déchets à la source, retraitement, utilisation, traitement et dépollution de faible technicité. Chacune ayant son utilité dans certains cas, ces techniques pourront connaître un usage plus ou moins étendu selon le moment, mais sans qu'aucune disparaisse entièrement. Nombre d'organismes, publics et privés, qui pourraient en principe s'occuper de dépollution des sites d'extraction (et par extension de retraitement) en sont empêchés par la réglementation et par des obstacles d'ordre institutionnel, notamment la question de la responsabilité encourue, qui gênent la remise en état ou la dépollution des sites, et peuvent de plus freiner l'investissement allant à la mise au point de technologies novatrices (Durkin, 1995). La question consiste donc à trouver une manière de réglementer propre à encourager des méthodes de retraitement et d'utilisation des déchets d'extraction plus efficaces que les méthodes actuelles.

51. La dépollution des sites d'extraction existants offre une belle occasion de mettre au point des technologies nouvelles et novatrices pour le retraitement des déchets miniers, et de définir des politiques et des techniques incitant à utiliser partout où c'est faisable des sous-produits secondaires au lieu de ressources primaires. Du fait des contraintes croissantes qui pèsent sur l'exploitation de ces dernières, les déchets font maintenant figure de ressources exploitables. Des normes réglementaires et des normes de qualité peuvent empêcher d'appliquer des technologies novatrices, et il peut exister aussi des obstacles techniques au retraitement de certains déchets complexes. Il arrive aussi que l'investissement dans des technologies novatrices soit freiné par le manque d'informations sur le coût et les résultats. Enfin, les technologies de

pointe se trouvent en concurrence avec un nombre croissant de techniques de stabilisation [voir plus haut le paragraphe 47 a)]. Pourtant, même si elles présentent des inconvénients (paraissant moins crédibles ou offrant moins de garanties de stabilité à long terme), elles pourraient bien être la seule solution praticable pour les minéraux et les métaux présentant peu de valeur marchande (ou aucune).

*Notes*

<sup>1</sup> Au-dessous de cette taille, les particules deviennent de plus en plus difficiles à manipuler et à séparer.

<sup>2</sup> Dans la production de l'acide sulfurique, la pyrite a été remplacée par du soufre (Berkowitz, 1988), ce qui donne à penser que la pyrite ne serait pas commercialisable.

## Références

- Adams, M. D. (1996). Environmental impact of cyanide and non-cyanide lixivants for gold. *New Developments in the Extractive Metallurgical Industry* (Johannesburg), 23 février 1996.
- (1997). Group leader: process and environmental chemistry, Randburg (Afrique du Sud). Personal communication.
- Aljaro, B. (coll.) (1991). Untreated tailings effluent: alternative use. *Mining Journal Environment Supplement*, 20 septembre 1991, p. 16 et 17.
- Allen, D. T., et K. S. Rosselot (1997). *Pollution Prevention for Chemical Processes*, New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Almgren, G., T. Almgren et U. Kumar (1996). Just-in-time and right-in-space. *Minerals Industry International* (septembre), p. 26 à 29.
- Ayen, R. J. (1994). A business and market assessment of waste treatment technologies. *Journal of Metals* (mai 1994), p. 30 à 34.
- Barton, J. R., D. Dalley et V. S. Patel (1996). Life cycle assessment for waste management. *Waste Management*, vol. 16, nos 1 à 3, p. 35 à 50.
- Berkowitz, J. B. (1988). Environmental cost considerations and waste minimization in new plant design and process optimization. In *Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment*, R. Abbou (dir.), Amsterdam : Elsevier Science Publishers B. V.
- Brewis, T. (1995). Metal extraction by bacterial oxidation. *Mining Magazine* (octobre 1995), p. 198 à 206.
- Broad, A. (1997). Arsenic down but not out. *Metal Bulletin Monthly*, No 315 (mars 1997), p. 54 à 57.
- Crittenden, B. et S. Kolaczowski (1995). *Waste Minimization. A Practical Guide*. Rugby (Royaume-Uni) : Institution of Chemical Engineers.
- Durkin, T. V. (1995). New technology is needed to manage sulfide mine waste. *Mining Engineering* (juin 1995), p. 507 et 511.
- Eaton, P. B., A. G. Gray, P. W. Johnson et E. Hundert (1994). *State of the Environment in the Atlantic Region*, Environnement Canada.
- Greene, J. C., et J. J. Barich (1994). Biological and chemical evaluation of remediation performed on metal bearing soils. In *Tailings and Mine Waste '94*, Rotterdam : Balkema.
- Haas, C. N. (1995). Waste elimination options. In *Hazardous and Industrial Waste Treatment*, C. N. Haas et R. J. Vamos (dir.).
- Hayes, P. C. (1993). *Process Principles in Minerals and Materials Production*, Australia: Hayes Publishing Company.
- Heiskanen, K., et L. Yao (1992). Finely ground waste rock as an adsorption material for anionic collectors. *Minerals, Metals and the Environment*, M. Anthony (dir.) London: Elsevier.
- Hodges, C. A. (1995). Mineral resources, environmental issues and land use. *Science*, No 268, p. 1305 à 1312.
- Humber, A. J. (1995). Separation of sulphide minerals from mill tailings. In *Proceedings, Sudbury '95, Conference on Mining and the Environment*, Sudbury, Ontario, 28 mai-1er juin 1995.
- Klimpel, R. R. (1995). Technology trends in froth flotation chemistry. *Mining Engineering* (octobre), p. 933 à 942.
- Kovalick, W. W. (1993). Trends in implementing innovative technologies in the U.S. In *Contaminated Soil '93*, vol. II, F. Arendt, G. J. Annokké, R. Bosman et W. J. van den Brink (dir.), Kluwer Academic Publishers.
- Machingawuta, C., et C. P. Broadbent (1994). Incorporation of arsenic in silicate slags as a disposal option. *Institution of Mining and Metallurgy Abstract and Index*, No 103 (janvier-avril 1994), p. 1 à 8.
- Mitchell, P. B. (1990). Reclaiming derelict metalliferous mining land. *Land and Minerals Surveying*, vol. 8, No 1, p. 7 à 17.
- Pascoe, G. A. (1994). Role of ecological risk assessment in reducing uncertainties in remedial decisions at mining waste sites. In *Tailings and Mine Waste '94*, Rotterdam: Balkema.
- Ramadorai, G. (1994). Halogen solvents in precious metal ores processing. In *Reagents for Better Metallurgy*, P. S. Mulukutla (dir.), Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Redhead, R. J. (1996). Waste management: a materials management/product stewardship approach. *CIM Bulletin*, vol. 89, No 999, p. 47 à 51.
- SETAC (1993). *Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice*.
- Swash, P. M., et A. J. Monhemius (1994). Hydrothermal precipitation from aqueous solutions containing iron (III), arsenate and sulphate. In *Proceedings, Hydrome-*

*tallurgy '94*, Cambridge (Royaume-Uni), 11-15 juillet 1994.

Toivola, M., et A.-P. Toivola (1997). Method for producing a building material from a mixture of unscreened thermoplastic and mineral. Brevet des États-Unis, No 5676895.

USEPA (1994a). *Innovative Methods of Managing Environmental Releases at Mine Sites*. Environmental Protection Agency des États-Unis, Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington.

\_\_\_\_\_ (1994b). *Treatment of Cyanide Heap Leaches and Tailings*. Environmental Protection Agency des États-Unis, Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington.

Van Weert, G., et D. J. Droppert (1994). Aqueous processing of arsenic trioxide to crystalline scorodite. *Journal of Metals* (juin 1994), p. 36 à 38.

Warhurst, A. C., et G. Bridge (1996). Improving environmental performance through innovation: recent trends in the mining industry. *Minerals Engineering*, vol. 9, No 9.

White, T., et I. Toor (1996). Stabilizing toxic metal concentrates by using SMITE. *Journal of Metals* (mars), p. 54 à 57.

Wills, B. A. (1997). *Minerals Processing Technology*, 6e éd. Butterworth-Heinemann.

Zouboulis, A. I., K. A. Kydros et K. A. Matis (1993). Arsenic (III) and arsenic (V) removal from solutions by pyrite fines. *Separation Science and Technology*, vol. 28, Nos 15 et 16, p. 2449 à 2463.