

## Déchets miniers

### Mise à jour du document en ligne : mai 2006

1	Définition .....	1
2	Textes spécifiques de référence.....	1
3	Origine, formation et élaboration .....	3
4	Caractéristiques physico-chimiques .....	8
5	Caractéristiques géotechniques .....	15
6	Caractéristiques environnementales .....	16
7	Aspects sanitaires .....	21
8	Utilisation dans les infrastructures routières .....	22
9	Bibliographie.....	24
10	Auteurs et relecteurs.....	27

### 1 Définition

Les déchets miniers peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai. Ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits élaborés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques, ou artificiels générés lors d'une étape de fusion métallurgique (scories).

### 2 Textes spécifiques de référence

Contrairement aux matériaux issus du traitement de déchets (comme les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ou, de l'extraction des métaux, comme les scories ou, de la démolition d'ouvrages, comme les matériaux de démolition) pour lesquels il existe un savoir-faire qui a été ou sera avalisé par des guides émanant de la profession et/ou des textes réglementaires (circulaires, arrêtés) émanant des Ministères intéressés, il n'existe rien au sujet des déchets miniers sensu lato. Ainsi, ne seront présentés que des textes qui réglementent l'activité extractive et prennent en compte ses nuisances potentielles pour l'environnement. En l'état actuel de la réglementation, et dans les cas de valorisation en TP des stériles miniers bruts ou peu élaborés, il faudra se référer aux textes concernant les matériaux classiques ainsi que celui considérant les granulats hors normes présentés dans la base d'Ofrir. Dans le cas de stériles provenant de traitement pyro-métallurgiques ou physico-chimiques, il conviendra de se référer aux textes concernant les scories ou les déchets industriels tel que les guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (i.e. PREDIS Nord Pas-de-Calais).

#### 2.1 Spécificité des déchets miniers en matière réglementaire

L'exploitation des mines présente de telles spécificités que le législateur la fait dépendre d'un corpus de dispositions adaptées, baptisé code minier.

La version actuelle du code minier a intégré les dispositions, concernant l'environnement, relatives aux lois :

- sur les déchets (13 juillet 1992) ;
- [sur l'eau](#) (3 janvier 1992) ;
- [sur les carrières](#) (4 janvier 1993) ;
- sur le renforcement de la [protection de l'environnement](#) (2 février 1995) ; les modifications édictées par la loi du 15 juillet 1994 prennent largement en compte les aspects environnementaux.

Le code minier et ses décrets d'application couvrent donc tous les problèmes concernant les résidus provenant de la mine.

Une distinction est apparue, il y a quelques années, faisant rentrer les installations de concentration de minerai (laverie) ainsi que les résidus issus de cette usine dans la catégorie des installations classées pour la protection de l'environnement. Sous l'angle technique, ce changement n'a rien modifié. La différence réside dans le fait que l'ancien exploitant demeure responsable administrativement des résidus de procédés, même après la renonciation à la concession alors que les stériles provenant de la mine *sensu stricto* ne sont plus de la responsabilité administrative de l'exploitant dès lors que la concession a été renoncée.

## 2.2 Les principaux textes

Deux textes principaux concernent les sites miniers : le code minier, et la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement.

La notion d'établissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes a été instaurée par la loi du 19 décembre 1917 et la nomenclature des établissements classés a été créée par le décret du 20 mai 1953. La loi du 19 décembre 1917 a été abrogée par celle du 19 juillet 1946, mais la base de la nomenclature du 20 mai 1953 a été maintenue puis complétée. Un certain nombre de rubriques de la nomenclature concerne les activités minières, en particulier :

- n° 89 bis, broyage, concassage, criblage, tamisage mécanique de pierres, cailloux, minerais et autres produits naturels;
- n° 45 – 67, aluminium;
- n° 61, réduction des minerais d'antimoine ;
- n° 140, chlorures métalliques;
- n° 162, traitement des minerais de cuivre ou de nickel;
- n° 292, minerais carbonatés;
- n° 292bis, agglomérations de minerai de fer ;
- n° 293, laveries à minerais ou résidus métallurgiques.

[Le décret n°540-2002 du 18 avril](#) relatif à la classification des déchets (JO du 20 avril 2002) prend les résidus miniers en compte dans la rubrique, "**Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux (01)**" selon quatre sous rubriques : "**Déchets provenant de l'extraction des minéraux (01 01)**", "**Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux métallifères (01, 03)**", "**Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères (01 04)**", "**Boues de forage et autres déchets de forage (01**

05)". Par contre, les déchets provenant de ces activités, comme de la mine elle-même, ont échappé à la réglementation commune des déchets industriels. En particulier, l'arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux exclut de son champ d'application les stockages spécifiques des résidus du traitement des minerais et cela est toujours le cas depuis que cet [arrêté a été remplacé par celui du 30 décembre 2002](#).

Cependant, il faut noter que la responsabilité de l'exploitant d'une installation ayant été à l'origine d'une pollution est reconnue par le législateur [article 81 de la loi n° 95-101] et que la loi n° 94-588 du 15 juillet 1994 a introduit dans le code minier un article, le 75-2, qui prévoit l'information d'un acheteur de l'existence d'une mine et des dangers ou inconvénients résultant de son exploitation.

### **2.3 La directive européenne sur la gestion des déchets miniers (en cours d'élaboration)**

A la suite de graves pollutions régionales induites par des stockages de déchets miniers (Espagne, Roumanie), une proposition de modification de la [directive européenne 96/82/CE du conseil du 9 décembre 1996](#) concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses est actuellement en discussion, pour prévenir et réduire leurs effets négatifs sur l'environnement. Elle a été présentée au parlement européen le 26/09/02. Le texte concerne la gestion des déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et stockage de minéraux de mine ou de carrière actives ou fermées.

Parmi les prescriptions applicables, on soulignera l'obligation par l'exploitant d'établir un plan de gestion des déchets basé sur les principes suivants :

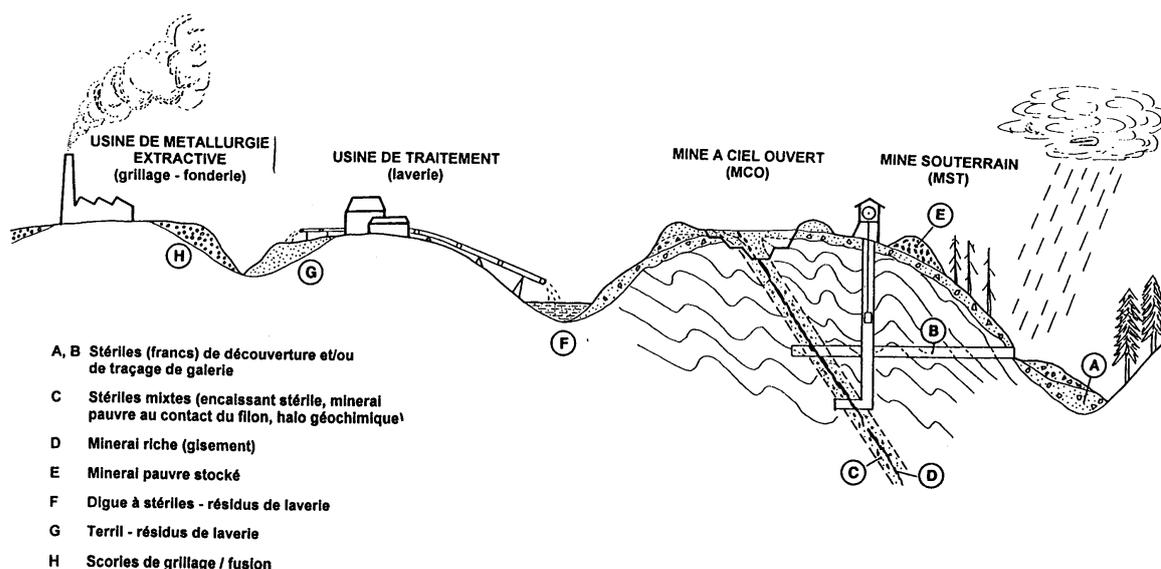
- réduire la production de déchets à la source ;
- encourager leur récupération au moyen du recyclage dans la production d'agrégats ou de matériaux de construction, ou dans des opérations analogues de recyclage (Article 5).

Un plan de prévention des accidents majeurs, l'information du public, une classification des installations d'élimination et des procédures de fermeture sont prévus dans le texte ainsi que l'obligation par les Etats membres de l'U.E. d'effectuer un inventaire exhaustif des mines et carrières fermées ou abandonnées.

## **3 Origine, formation et élaboration**

### **3.1 Les activités génératrices de déchets**

Une mine comprend tous les aménagements, ouvrages et équipements d'extraction, installations de traitement de minerai, haldes de stockage, prévisionnels et permanents, de matériaux et/ou de résidus nécessaires pour l'exploitation et la valorisation d'un gisement. Une usine de traitement ou de concentration de minerai comprend les installations nécessaires à la mise en œuvre des procédés physiques et/ou chimiques destinés à conditionner, trier ou séparer les différentes substances minérales. Une usine métallurgique correspond aux procédés de fusion (pyrométallurgie) ou de mise en solution (hydrométallurgie), mis en œuvre pour produire un métal pur (produit marchand).



**Figure 1** : Travaux et opérations d'une exploitation minière avec la typologie des produits issus des différentes activités (source, BRGM, 1997)

### 3.1.1 Gisement et stérile : deux concepts complémentaires [BRGM, 1987]

Un gisement se définit en termes relatifs à un marché économique. En effet, un gisement est une masse minérale, le minerai, ayant une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable avec profit dans un contexte économique précis. Les caractéristiques du gisement sont déterminées par les processus géologiques et/ou géochimiques responsables de sa création. En effet, un gisement représente une anomalie dans la composition chimique de la croûte terrestre : il contient bien évidemment une concentration élevée en un ou plusieurs éléments valorisables (Au, Zn, Pb, Ni, Al, etc.); il contient souvent également des concentrations élevées en minéraux ou éléments accompagnateurs pouvant présenter des risques pour l'environnement (pyrite, arsenic, métaux lourds, etc.).

Si le gisement est la cible de l'activité minière, le stérile est le concept complémentaire du gisement, utilisé souvent comme nom ou qualificatif dans le domaine minier. Il s'applique à tout résidu minier dont la teneur en élément valorisable est en dessous de la teneur de coupure. Le résidu est donc stérile en terme de valeur économique. Dans certains cas, un résidu stérile stocké à une époque peut être réexploité à une autre, suite à un changement approprié des conditions économiques (cours du marché) ou à l'émergence d'un nouveau procédé plus performant (nouvelles filières de traitement).

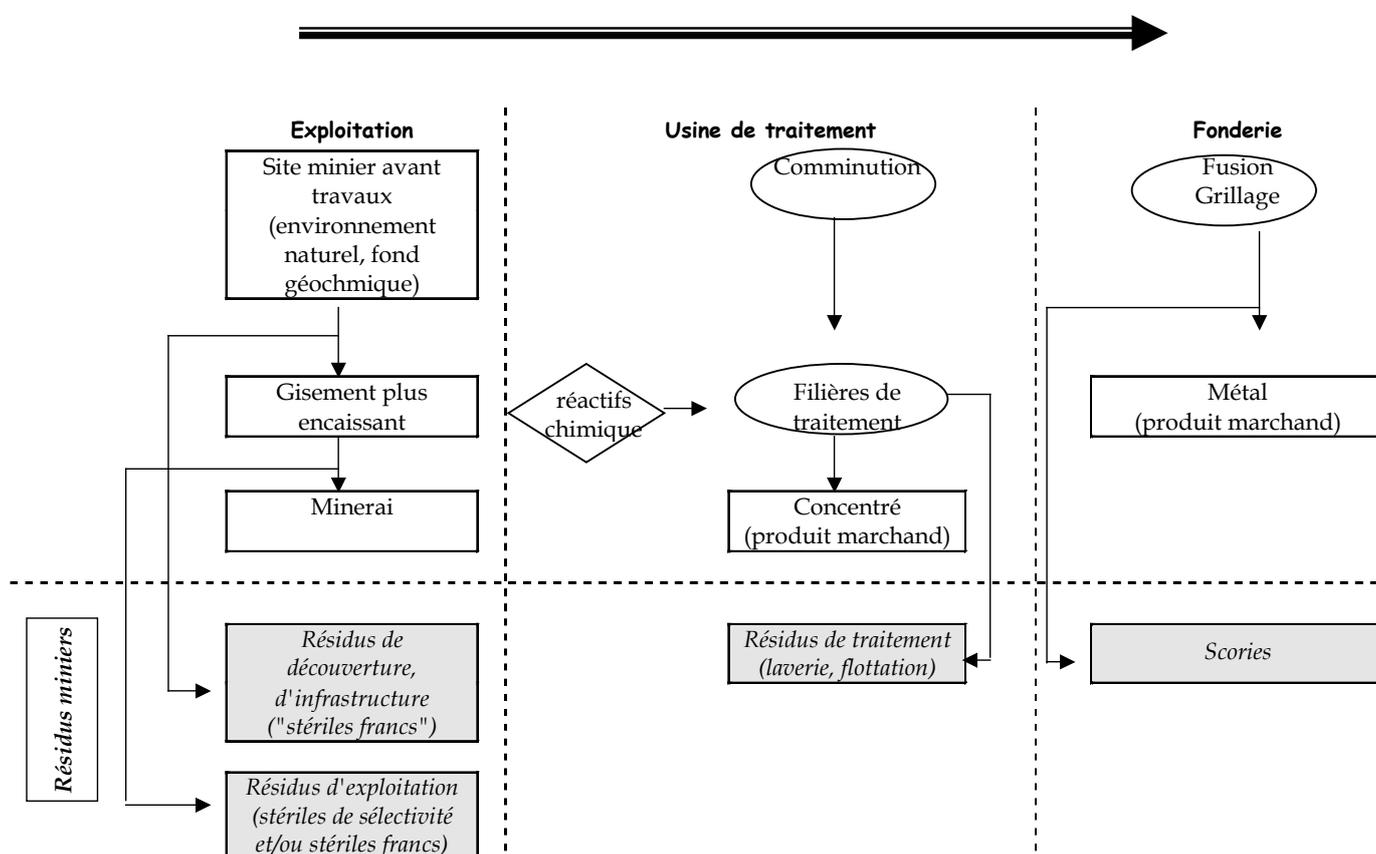
Un résidu économiquement stérile peut, par contre, contenir des concentrations en éléments ou composés chimiques polluants (phases minérales naturelles, réactifs de

traitement résiduels) élevées par rapport aux concentrations naturellement présentes dans les sols du site. Il peut aussi exister des résidus miniers dont la composition et la réactivité chimique diffèrent peu de celles des sols naturels : ce sont les stériles francs.

**Ainsi, en fonction de l'utilisation potentielle de stérile dans les infrastructures routières ou tout opération de travaux publics, la "valeur sémantique" du terme doit être jaugée au cas par cas par des essais environnementaux appropriés (études minéralogique, essais de lixiviation, analyse chimiques, comparaison avec des valeurs repères disponibles).**

### 3.1.2 Les phases et opérations d'exploitation

Comme le montre le schéma bloc si dessous (figure 2), les opérations mises en œuvre sur un site minier pour exploiter et valoriser un gisement peuvent être divisées en trois (ou parfois quatre) étapes principales :



**Figure 2 :** Les étapes d'exploitation d'un gisement métallique et les résidus miniers correspondants (source : BRGM, 1997)

1. Les travaux nécessaires pour donner accès au gisement, l'ampleur de ces travaux de déblaiement (ou de découverte) dans le cas d'une mine à ciel ouvert et de percement de galeries, puits ou descenderies pour une mine souterraine varieront énormément en fonction des caractéristiques du gisement. Les **mines à ciel ouvert** (voir détails ci-dessous) produisent en général beaucoup plus de

stériles (en moyenne de l'ordre de 10 fois plus) que les mines **souterraines davantage sélectives** (voir détails ci-dessous).

## Les différents types d'exploitation minière

La situation topographique, la géométrie et la morphologie du gisement détermineront la méthode minière utilisée pour son exploitation. Ainsi, il existe une dépendance entre les tonnages relatifs, la composition chimique des résidus générés lors des différentes phases de travaux miniers et la méthode d'exploitation choisie.

### Mines à ciel ouvert

Lorsqu'un gisement est peu profond et à faible teneur, une exploitation à ciel ouvert peut être envisagée. L'exploitation d'un minerai à ciel ouvert est décidée en fonction du taux de découverte (ratio du volume de roche stérile qui doit être enlevé par volume de minerai), et n'est réalisable généralement que pour des minerais peu profonds (< 300 m). En général, après les travaux de décapage (enlèvement du sol et des horizons superficiels), les travaux de découverte concernent la partie stérile de la roche renfermant (ou encaissant) le minerai. Cette dernière est enlevée par gradins successifs dans une excavation souvent de forme conique dont les parois découpées en banquettes sont plus ou moins redressées suivant la tenue des roches. Plus l'excavation s'approfondit, plus le volume de stérile à extraire est important. Lorsque le taux de découverte devient trop important, une exploitation à ciel ouvert n'est plus rentable.

### Mines souterraines

Dans le cas où l'ouverture d'une mine à ciel ouvert n'est pas possible, et si les teneurs du minerai le permettent, une exploitation en *mine souterraine*, méthode plus coûteuse, peut être mise en œuvre. Dans ce cas, l'accès au minerai se fait par une ou plusieurs descenderies (cf. fig. 1). Si le gisement comporte une ou plusieurs couches de minerais horizontales dans une région à paysage plat, la desserte des galeries et la ventilation sont assurées au minimum par deux puits : l'un pour évacuer le minerai (skips) et l'autre pour le personnel, l'aération et l'exhaure des eaux. Dans le cas d'un gisement très redressé en zone de montagne, plusieurs galeries horizontales peuvent être tracées à partir du flanc de la colline – les *travers bancs* – pour rejoindre le minerai.

2. Les travaux liés à l'extraction du minerai tout venant et à son tri préliminaire pour enrichir le matériau en substance exploitée (éventuellement nécessaire pour minimiser la quantité de roche stérile, ou gangue, présente dans le minerai exploité).
3. Un ensemble de filières de traitement, qui regroupé dans une usine d'enrichissement (souvent appelée la laverie), est utilisé pour séparer les phases minérales porteuses des éléments valorisables de la gangue stérile. Le produit de l'usine, enrichi en élément valorisable, s'appelle le concentré. Dans la plupart des cas, ce dernier constitue le produit marchand de la mine.
4. Dans certains cas, lors des exploitations anciennes, une fonderie ou une usine de grillage pouvait être édifiée à proximité d'un ou plusieurs sites miniers voisins

pour transformer l'élément valorisable du concentré en forme métallique, d'où il a pu résulter l'abandon de produits de grillage/fusion sur le site.

### **3.2 Les principaux types de déchets miniers**

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de résidus miniers, généralement de caractéristiques physiques et chimiques, donc d'impact environnemental potentiel, très différentes. Leurs volumes respectifs, surtout en ce qui concerne les résidus de découverte, seront fonction aussi du type d'exploitation (mine à ciel ouvert, mine souterraine) ; leur composition chimique variera en fonction de la substance exploitée et la nature du gisement. En premier lieu, nous pouvons classer les principaux types de résidu minier en quatre grands groupes qu'il est possible de classer à partir des diverses rubriques du décret n°540-2002 du 18 avril relatif à la classification des déchets :

- les stériles francs de découverte et/ou de traçage de galerie ;
- les résidus d'exploitation (stériles francs et/ou stériles de sélectivité minéralisés) ;
- les résidus de traitement (rejets de l'usine de concentration) ;
- les autres résidus (scories de grillage ou de fusion du minerai).

#### *3.2.1 Les stériles francs de découverte*

Ce sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert ou, dans le cas d'une mine souterraine, les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies.

Ces résidus contiennent, en règle générale, des teneurs en métaux et en éléments accompagnateurs faibles, de l'ordre de grandeur de l'anomalie géochimique produite par les phénomènes de dispersion naturelle, remaniement mécanique ou diffusion chimique des métaux du minerai dans sa roche encaissante. D'une certaine façon, les caractéristiques physiques et chimiques de ce genre de résidus ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction de tout autre ouvrage (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional.

#### *3.2.2 Les résidus d'exploitation (minerais pauvres)*

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique dans un tel contexte. Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal ou autre minéral d'intérêt venaient à monter.

Dans les mines anciennes, la pratique était parfois de le mettre à part, ou de le rejeter de la même façon que les autres résidus de la mine. Dans le cas de mines modernes de métaux de base, les stocks de ce type de résidus sont souvent traités en fin d'exploitation.

Le caractère plus ou moins disséminé d'un gisement conditionnera également la technique d'exploitation, donc le volume, la nature et l'importance des résidus d'exploitation. Dans un gisement de fer de type disséminé par exemple, l'exploitant placera la teneur limite d'exploitation du minerai à une valeur donnée (par exemple

28% en fer). Cette limite est opérationnelle seulement quand la masse minérale exploitée présentera une gamme continue de teneurs décroissantes en fer suivant les conditions géologiques responsables de sa formation. Le résidu minier dans ce cas aura, en effet, des teneurs en métal très voisines du minerai. Par contre, pour les gisements de type tout ou rien, il y a discontinuité géochimique brutale entre le minerai et sa gangue, celle-ci ne contenant plus que de faibles anomalies en métaux (approchant à peine le centième de la teneur du minerai). Dans ce cas, une exploitation du minerai ne laissera que des rejets pauvres, plus ou moins contaminés par des métaux et métalloïdes accompagnateurs du gisement.

### 3.2.3 Les résidus de traitement (tailings)

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré-concentration du ou des minéraux économiques. Ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un enrichi en substances valorisables (le concentré) et un ou plusieurs qui en sont appauvris. Dans le cas des métaux de base et de l'or, les résidus issus de l'usine (appelée laverie) sont généralement constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent resédimentés dans des bassins de décantation retenus par des digues à résidus (tailing dams) ou déposés en terril. Afin de réduire les coûts de transport, l'exploitant localisera la laverie en aval de la mine (transport par gravité) et les schlamms (rejets) de laverie seront décantés dans le vallon sous-jacent, à l'amont d'une digue à résidus.

Les résidus et les boues issus d'une laverie contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires tels que les sulfures de fer, d'arsenic (respectivement pyrite  $[\text{FeS}_2]$ , arsénopyrite  $[\text{FeAsS}]$ , etc.) et leurs produits d'oxydation (sulfates, oxydes métalliques hydratés -essentiellement de fer-...). Ils peuvent contenir également des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs (ex.: les molécules organiques et hydrocarbures potentiellement cancérigènes; cyanures et mercure directement toxiques par ingestion avec effet de dose – voir chapitre sur les risques sanitaires) utilisés pour la séparation et la concentration en métaux valorisables.

### 3.2.4 Autres types de résidus

Dans bon nombre d'exploitations **anciennes** polymétalliques (Fer, Cuivre, Etain, Plomb/Zinc, Or ...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand de qualité (Schéma d'exploitation). Dans ces cas, on peut retrouver sur ces sites anciens des tas de **scories** qui forment un cas particulier de rejets. Des **suies** provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées. Ces produits oxydés se retrouvent soit accumulés à proximité de la mine si le grillage était opéré sur place, soit souvent entassés à proximité de la fonderie en contrebas

## 4 Caractéristiques physico-chimiques

La grande diversité des déchets miniers produits est donc fonction des substances exploitées, des types de minéralisation et des modes de traitements qui souvent, sur un même site, ont évolué en fonction du temps. Cette variabilité pose le problème de la représentativité des caractéristiques physico-chimiques des déchets rencontrés, leurs compositions minéralogiques et chimiques devenant spécifiques des sites où ils ont été produits. Une deuxième difficulté réside dans l'absence d'inventaire systématique des dépôts de déchets et de leurs caractéristiques (composition, volume, situation...) sachant que plusieurs milliers de sites, la plupart abandonnés, existent aujourd'hui en France. En conséquence, nous proposons de donner quelques exemples types en fonction des substances exploitées.

#### 4.1 Caractéristiques minéralogiques

Un minerai est composé d'un assemblage de minéraux plus ou moins altérables une fois sortis de leur contexte géologique et soumis aux aléas climatiques et aux conditions physico-chimiques et biologiques de la biosphère. Pour certains de ces minéraux, les produits d'altération sont à la fois solubles (et/ou bioassimilables) et, au-delà d'une certaine concentration, susceptibles de poser un risque pour l'environnement (tableau 1). Les caractéristiques minéralogiques des déchets miniers traduisent en général la composition des minerais qui ont été exploités. On retrouvera donc, en plus faibles concentrations, les principales espèces minérales des minerais.

Substance principale	Minéraux	Composition majeurs	Eléments traces fréquents
Cu	chalcopirite malachite azurite pyrite	$\text{CuFeS}_2$ $\text{Cu}(\text{CO}_3)\text{Cu}(\text{OH})_2$ $2\text{CuCO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$ $\text{FeS}_2$	Mn, As, Ag, Pb, Zn Bi, Cd, Co, Sb
Zn	blende calamine smithsonite	$\text{ZnS}$ $(\text{ZnOH})_2\text{SiO}_3$ $\text{ZnCO}_3$	Pb, Ag, As, Cd, Cu, Fe, Hg, In, Mn, Sb Ge, Ga
Pb	galene cerusite anglesite	$\text{PbS}$ $\text{PbCO}_3$ $\text{PbSO}_4$	Zn, Ag, Ba, As, Bi, Sb, Se
Sb Sb-Ag Ag-As	stibine pyrargyrite proustite	$\text{Sb}_2\text{S}_3$ $3\text{Ag}_2\text{S}, \text{Sb}_2\text{S}_3$ $3\text{Ag}_2\text{S}_3, \text{As}_2\text{S}_3$	As, Ag, Au
Au	Au natif mispickel pyrite	Au FeAsS $\text{FeS}_2$	Mo, Ni, Co, As, Hg, Sb
F	fluorite	$\text{CaF}_2$	Li, Ba, Ci, Pb, Zn
Ba	barytine	$\text{BaSO}_4$	Pb, Zn, Hg, Cu, F
Sn	cassitérite	$\text{SnO}_2$	Li, Nb, Ta, W, As
W	wolframite scheelite	$(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ $\text{CaWO}_4$	As, Li, Bi Cu, S, Sn

**Tableau 1** : Principales espèces minérales des minerais français et spectre des éléments traces associés (source : BRGM, 1997 modifié)

## 4.2 Cas particulier du Drainage Minier Acide (DMA) produit par les déchets miniers de mines de sulfures métalliques [BRGM, 2002]

Les déchets miniers générés à partir de mines de sulfures métalliques présentent une grande instabilité des espèces minéralogiques (instabilité chimique). Une fois exposés à l'air libre et à l'eau, la plupart des minéraux sulfurés subissent une bio-oxydation génératrice d'acide sulfurique et de fer ferrique s'accompagnant d'une solubilisation des éléments métalliques (Zn, Pb, Cu, Fe, As, Cd etc.). Ces réactions donnent ensuite lieu à des réactions d'oxydation, de dissolution, de précipitation et de recristallisation successives qui produisent de nombreux composés minéraux secondaires (oxy-hydroxydes, oxy-hydroxysulfates complexes, etc.) [Nordstrom et al, 1982]. Ce phénomène évolutif, plus connu sous le nom de Drainage Minier Acide (DMA) (figure 3), peut être à l'origine de charges polluantes acides et/ou métalliques posant des problèmes de gestion environnementale et géotechnique lors de la mise en exploitation des ressources minérales ou la valorisation des déchets miniers [Brunet, 2000].

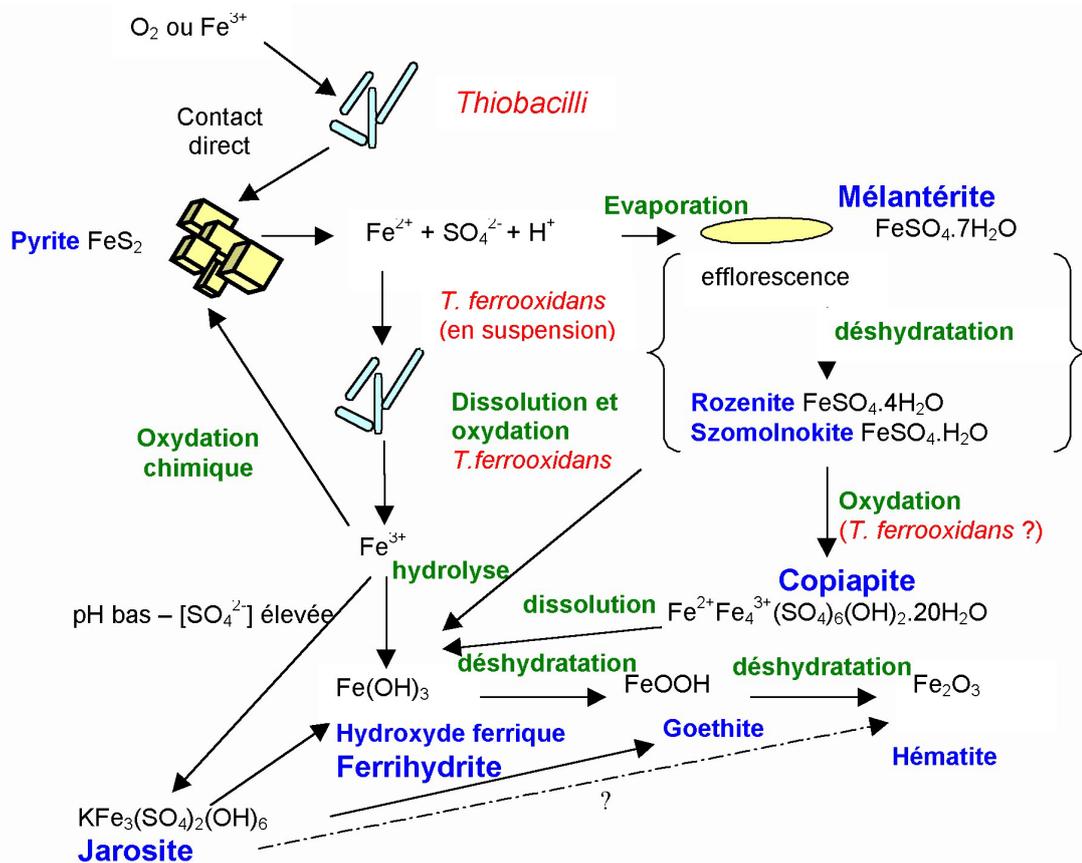


Figure 3 : Schéma récapitulatif des réactions primaires et secondaires se déroulant au cours d'un phénomène de DMA, d'après Nordstrom [1982].

## 4.3 Compositions chimiques

### 4.3.1 Les substances chimiques potentiellement toxiques présentes dans les déchets

Les déchets miniers peuvent renfermer des substances chimiques potentiellement toxiques qui proviennent de deux origines principales:

- les minéraux comprenant le minerai et sa gangue ;
- les réactifs utilisés dans les différentes filières de traitement.

Les déchets potentiellement susceptibles de poser des risques compte tenu de leur composition chimique sont décrits ci-dessous.

Le minerai pauvre

En ce qui concerne les stériles minéralisés, le risque potentiel sera déterminé surtout par la teneur en :

- **sulfures de fer** (pyrite [FeS<sub>2</sub>], pyrrhotite [FeS], marcassite [FeS<sub>2</sub>]) et autres sulfures de métaux, phases minérales à l'origine du DMA (voir infra),
- **phases minérales** comprenant des **éléments traces plus ou moins toxiques** (arsenic, métaux lourds ...).

De ce fait, nous pouvons focaliser notre attention dans la plupart des cas sur les résidus des mines métalliques, et certains minéraux industriels (fluorine [CaF<sub>2</sub>], barytine[BaSO<sub>4</sub>], pyrite, andalousite [Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>]...).

Si la composition minéralogique des principaux minerais extraits en France est relativement simple (tableau 2), le **spectre d'éléments traces** qu'ils renferment est plus large. Parmi les métaux et non métaux cités dans les normes et/ou directives européennes concernant l'évaluation de la qualité des eaux et des sols pour différents usages, 11 sont fréquents dans les gisements français (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn) soit comme constituants principaux de minerais, soit comme accompagnateurs dans la gangue.

Le tableau 2 ci-dessous donne un aperçu de la diversité et la complexité des compositions minéralogiques des principaux minerais exploités depuis le 19<sup>ème</sup> siècle en France en fonction des types de minéralisation (gîtologiques) et des modes d'exploitation.

Substance exploitée	Gîtologie		Minéralogie		Tonnage exploité	Mode d'exploitation	Exemples
	Type	Sous-type	Principale	Certains éléments traces			
<b>Métaux de base</b> Cu, Pb, Zn	amas sulfurés			Ba, Zn, Pb	25 kt Cu	MCO et MST	St Bel, Chizeuil, Pierrefite
Pb-Zn	sedex		ZnS, PbS, Pyr	Hg, As, Ba, Ni, Co, Sb	260 kt	MST	
Pb-Zn	sédimentaires	Détritiques Carbonatés	PbS, ZnS ZnS, PbS, Pyr	Ge, Ga, Cd As, In, Ge, Sb, Hg	100 – 900 kt 114 kt	MST	Largentière La Croix de Pallière
Pb-Zn (Ag)	filons	Carbonatés	PbS (ZnS) ZnS, PbS	Cu, W, Po Py, Pyrh, Cu	55 kt	MST	La Loubatière Rabasse, La Loubatière
		Plutoniques	ZnS, PbS ...	Cd, Gs, Ag	20 – 120 kt	MST	St Salvy, Peyrebrune
					100 – 290 kt Zn	MST	

Substance exploitée	Géologie		Minéralogie		Tonnage exploité	Mode d'exploitation	Exemples	
	Type	Sous-type	Principale	Certains éléments traces				
<b>Or</b> Au(Ag,Cu,BI,As)	filons	Chapeau de fer Filons	Py, Asp	Cu, As, S ...	5 – 20 t	MST et MCO	Le Bourneix	
Au (Fe)				Pb,Zn,Cu	Cu, Pb, Zn, Mo, Sb	2,4 t Au	MCO	La Lucette
Au-Sb				Py, Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , Asp		8 t Au ; 42 t Sb 97 t Au	MST MCO et MST	Rouez Salsigne
<b>Étain</b> Sn Sn + Kaol.	résiduels	Placers Disséminés	SnO <sub>2</sub> SnO <sub>2</sub>	Tml Nb, Ta	5,2 kt 20 - 50 kt/an	MCO MCO	St Renan Echasières	
<b>Tungstène</b> W	filons, stockwercks skarns		(Fe,Mn)WO <sub>4</sub>	Cu, As, Bi, B	1000 – 1500 t	MST	Enguiales	
			CaWO <sub>4</sub>	Pyr, Cu, Zn, Bi, Asp	5000 – 10000 t	MST	Salau	
			Py			MST	Montredon	
<b>Antimoine</b> Sb	filons		Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Au Cp, ZnS, Py, Asp	0,9 kt Sb 1 à 18 kt Sb	MCO et MST MST	Les Brouzils Rochetrejou x	

Substance exploitée	Géologie		Minéralogie		Tonnage exploité	Mode d'exploitation	Exemples
	Type	Sous-type	Principale	Certains éléments traces			
<b>Pyrite</b> FeS <sub>2</sub>	amas sulfurés		Py, CuFeS <sub>2</sub>	Mg, Pb, Zn, As Co, Ni	10 – 20 Mt	MCO MST	Saint Bel Chessy
<b>Fluorine</b> CaF <sub>2</sub>	amas filon	BPGC  socle F-U	CaF <sub>2</sub>	Fe, Pb, Ba Cu, Pb, Zn, As, Bi Cu, Bi, As U,Pb	1,1 Mt CaF <sub>2</sub> 5 à 430 kt 50 à 800 kt 30 kt	MCO MST et MCO MST MST	Escaro LeBurg, Montroc Fontsante Cros Blanc
<b>Barytine</b> BaSO <sub>4</sub>	filons sédimentaires		Ba	Pb, CaF, Zn CaF <sub>2</sub> ,HgS	10 à 680 kt 1 – 3 Mt	MST MCO et MST	Les Porres Chaillac, Pessens
<b>Fer</b> minette	couche	détritique	HFeO <sub>2</sub> , FeO OH	TiO <sub>2</sub>	3 Milliards T	MST	Lorraine
<b>Aluminium</b> bauxite	couche	détritique carbonaté	Al(OH) <sub>3</sub> ,AlO- OH,H-AlO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , Ga, V,P, Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	85 Mt	MCO et MST	Provence
<b>Sels</b> Sel gemme et potasse	couche	précipitation	NaCl, KCl, KClMgCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> , MgSO <sub>4</sub> , NaSO <sub>4</sub> , As	450 000 t	MST	Lorraine

BPGC : Blende, Pyrite, Galène, Chalcopyrite ; F-U : Fluorine-Uranium ; Pyr : pyrrhotite ; Py : pyrite ; Cp : chalcopyrite ;  
Asp : Arsénopyrite ; Tml : Tourmaline ;  
MCO : mine à ciel ouvert ; MST : mine souterraine

**Tableau 2** : Typologie de certaines substances industrielles exploitées, en termes de caractéristiques minéralogiques des gisements et d'exploitation (source : BRGM, 1997 modifié).

#### 4.3.2 Les résidus de l'usine de traitement

Peu utilisés comme matière premières secondaires, n'ayant fait l'objet d'aucune évaluation et déconsidérés a priori par ce fait, tous les résidus miniers peuvent être actuellement considérés comme source de matériaux. Ainsi, il est nécessaire de donner un panorama exhaustif sur les données disponibles.

La composition chimique des rejets issus du ou des traitements du minerai dépendent du minerai (éléments chimiques majeurs ou mineurs, minéraux présents dans le minerai de départ et se retrouvant dans les résidus...), mais également du procédé utilisé lors du traitement.

Avant le XIXème siècle, les procédés de concentration de minerai ont peu évolué et les rejets, bien que souvent riches en métaux ou fortement pollués (cas du mercure dans les anciennes exploitations d'or où le minerai était traité par amalgamation), ont eu un impact relativement limité sur l'environnement, car les volumes en jeu étaient très réduits et les minerais traités souvent déjà oxydés. Par contre, l'utilisation à partir des années 1920 de procédés industriels combinant l'utilisation de réactifs chimiques et des broyages fins, comme par exemple la flottation des sulfures, a augmenté considérablement les risques pour l'environnement.

La finesse et l'homogénéité de la taille des particules des **résidus de l'usine de traitement** les rendent particulièrement susceptibles à une dispersion dans l'environnement (dans le cas d'un lieu de stockage mal conçu et non réaménagé).

#### 4.3.3 Les principales techniques et filières de traitement

##### - Procédés de tri physique :

Basés sur les techniques utilisant la densité des particules ou leur susceptibilité magnétique, leur conductivité, etc., ces procédés se caractérisent d'une part par un broyage assez grossier du minerai (les tailles des particules vont de quelques mm jusqu'à 0,2 mm environ) et d'autre part par une absence de réactifs.

##### - Procédés physiques de séparation :

La flottation est la principale technique de séparation physico-chimique. Elle utilise une grande variété de réactifs chimiques, principalement pour modifier les états de surface (hydrophobie, hydrophilie) des particules. Elle nécessite également des particules suffisamment petites, de taille inférieure à 0,2 mm. Les rejets de tels traitements, au départ liquides, sont donc des produits fins (boues) renfermant des réactifs organiques et minéraux résiduels.

Les réactifs utilisés en flottation sont utilisés à des doses allant de quelques dizaine de grammes à quelques kg par tonne de minerai et se classent en :

- *moussants* (tensioactifs organiques),
- *collecteurs* (tensioactifs organiques de type xanthates et dithiophosphate),
- *agents modifiant le pH* (acide sulfurique, chaux...),
- *activants et dépresseurs* (produits minéraux de type sels métalliques: bichromate,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  etc., ou produits organiques de type cyanure de sodium ou amidon).

Ces réactifs de flottation se retrouvent, au moins en partie dans les résidus issus de ces traitements.

Réactifs	Consommation en g/t de minerai de Pb-Zn	
	(ex: Les Malines)	(ex: La Croix de Pallières)
<b>Acides:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></li> </ul>		
<b>Alcalins:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Chaux</li> <li>• Carbonate de sodium</li> <li>• Hydroxide de sodium</li> </ul>	1000	
<b>Dépresseurs/activants:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfate de cuivre</li> <li>• Sulfate de zinc</li> <li>• Sulfure de sodium</li> <li>• Silicate de sodium</li> <li>• Dioxyde de soufre</li> <li>• Cyanure de sodium</li> </ul>	200 143    28	620 620    40
<b>Collecteurs :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• X-Amyl-xanthate</li> <li>• X-Iso-propyl-xanthate</li> <li>• X-Ethyl-xanthate</li> <li>• Gaz oil</li> <li>• Amine</li> <li>• Phosphorésols (esters aromatiques de l'acide dithiophosphorique)</li> <li>• R-242 (Antiline Discrisyl dithiophosphate + thiocarbonylure)</li> </ul>	45  5   25	790
<b>Moussants :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dowfroth 250</li> <li>• Alcool Hexylique</li> <li>• Huile de pin</li> <li>• HBTA frother</li> <li>• Charbon</li> </ul>	40	

**Tableau 3** : Principaux réactifs de flottation utilisés dans le traitement de minerai sulfuré avec leur consommation dans le cas de deux mines françaises de Pb-Zn (source : BRGM, 1997 modifié).

**- Procédés chimiques d'extraction/concentration :**

De tels procédés recouvrent à la fois les techniques de lixiviation (*dissolution*) et celles de *recupération des éléments dissous (précipitation, cémentation...)* et se caractérisent par une utilisation importante de réactifs chimiques (acides, bases, oxydants, complexants...). En France, ces procédés chimiques ont principalement été employés pour l'uranium et pour l'or. Pour ce dernier, ils correspondent aux procédés de cyanuration et d'amalgamation.

- *La cyanuration* repose sur une mise en solution de l'or et de l'argent, par complexation par du cyanure de sodium ou de potassium. Ce réactif très toxique est utilisé à des teneurs de 0,02 à 0,08% et se retrouve dans les résidus (tailings). En contact avec l'atmosphère, il se détruit par action photochimique.
- *L'amalgamation* consiste à utiliser du mercure pour fixer de l'or. La présence de ce réactif dans les rejets solides constitue l'un des principaux dangers associés aux anciens résidus d'exploitation de l'or.
- *Les procédés thermiques* consistent principalement en grillages (oxydation à haute température) en présence de chlore, de minerais ou de concentré de minéraux. Ces procédés engendrent non seulement des produits de grillage (scories), mais également des suies et nécessitent parfois l'ajout de réactifs (fondants : fluorine, borax  $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ , cryolite  $[\text{Na}_3\text{AlF}_6]$  ...).

## 5 Caractéristiques géotechniques

Issus du milieu naturel, le "déchet minier" peut être une roche simplement excavée, ou faire l'objet d'un certain degré d'élaboration : produit broyé puis traité par voie chimique, ou par voie pyro-métallurgique. Il peut donc être traité comme un matériau naturel classique, un Déchet Industriel Banal (déchet non dangereux au sens de la classification des déchets) ou un Déchet Industriel Spécial (déchet dangereux au sens de la classification des déchets). Ainsi, dans le cas de valorisation en BTP des stériles miniers bruts ou peu élaborés, on devra se référer aux textes concernant les matériaux classiques, ainsi que **celui considérant les granulats hors normes** présenté dans le site Ofrir. Dans le cas de stériles provenant de traitement pyro-métallurgiques ou physico-chimiques, il convient de se référer aux textes concernant les scories ou les déchets industriels aussi présentés dans le site OFRIR.

De manière générale, les déchets miniers étant dans la grande majorité des cas des matériaux naturels comparables aux sols et roches classiquement utilisés pour la construction des ouvrages routiers en terre les essais de caractérisations géotechniques ainsi que les conditions de mises en œuvre figurant dans le GTR (Guide Technique Route) peuvent s'appliquer.

Leur caractérisation en vue de leur classification s'effectuera par détermination:

- de leurs paramètres de nature, à savoir granularité [normes NF P 94-056 et 057], argilosité [normes NF P 94-051, NF P 946-68, NF P], masse volumique [norme NF P 94-064];
- de leurs paramètres d'état tel que l'état hydrique [NF P 946050, NF P 94-078];
- de leurs paramètres mécaniques et autres comme le coefficient Los Angeles [NF P 18-573], le Micro Deval Humide [NF P 18-572], la fragmentabilité [NF P 94-066], la dégradabilité [NF P 94-067], la teneur en éléments solubles ou organiques [NF P 18-586, NF P 94-055].

Pour leur réemploi, on appliquera les conditions de la classe de sols à laquelle ces matériaux sont assimilables compte tenu de leur nature et état.

Cependant, compte tenu de l'origine diverse de ces déchets miniers (issus du décapage, de découverte, d'excavation, de traitements physiques ou chimiques, ...), il y a lieu de vérifier par une étude spécifique, au cas par cas, que certains éléments

particuliers en forte proportion ne viennent pas perturber le comportement géotechnique normalement attendu pour un sols naturel classique. En particulier on vérifiera:

- que la présence de résidus de produits de traitement par flottation (collecteurs, déprimants, moussants, ...) ou autres ne viennent pas modifier le comportement général du matériau vis à vis de l'eau;
- que la répartition granulométrique ne présente pas d'aberration;
- que la présence de sulfures, d'éléments solubles (chlorures, sulfates, nitrates) ou organiques ne viennent pas engendre des risques de gonflement, de déstabilisation d'ouvrage ou perturber les prises dans le cas de traitement à la chaux, au ciment ou aux liants hydrauliques;
- etc.

## 6 Caractéristiques environnementales

En l'absence de données disponibles sur les caractéristiques environnementales d'un résidu minier utilisé en T.P., seuls les aspects ayant trait à l'exploitation minière seront présentés.

### 6.1 Les facteurs déterminants

La plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement, résulte d'une combinaison de l'éventuel mouvement dans l'espace de ses particules solides et de la potentielle capacité polluante de ses composants chimiques par transport en solution.

Un contaminant peut être soit un élément ou phase minérale présent d'origine dans le minerai, soit un réactif chimique ajouté lors des filières d'enrichissement. Les composés contaminants dépendront donc de la **substance exploitée** et de la **nature minéralogique** du minerai. Dans le cas des phases minérales contaminantes, l'éventuel impact environnemental sera fonction des différences en ce qui concerne la quantité et la réactivité des phases minérales d'un résidu stocké dans l'environnement par rapport à la composition et la réactivité des sols du site. Par exemple, les éventuelles **haldes de minerai pauvre** de certaines mines de métaux de base et d'or, et davantage encore *les résidus de l'usine de traitement (laverie)*, peuvent contenir des quantités de pyrite et de métaux lourds beaucoup plus élevées que le sol. En contact avec l'oxygène atmosphérique et soumis à la lixiviation par les eaux de pluie, ces résidus peuvent réagir chimiquement et biologiquement et provoquer le **D M A**.

#### Voici plus de détails sur les facteurs déterminants

Les caractéristiques physiques (distribution et taille des particules, stabilité géotechnique d'un terril), etc. et la composition chimique (contenu en éléments toxiques, carence en substances essentielles pour la colonisation végétale, etc.) d'un résidu, forcément très différentes de celles du système naturel sol/végétation du site, peuvent rendre le résidu plus susceptible d'être physiquement mobilisable dans l'environnement, ou d'agir comme source de contamination chimique de la chaîne

biologique ou encore tout simplement de ralentir sa réintégration par sa colonisation par les espèces botaniques de l'environnement du site.

En ce qui concerne la mobilité, les particules constituant un résidu minier peuvent être déplacées dans l'environnement en tant que matières en suspension dans les cours d'eau à la suite d'une érosion par les eaux de ruissellement ou en tant que poussières portées par le vent. La quantité de matériel déplacé, la vitesse d'érosion, l'étendue environnementale affectée dépendront à la fois des caractéristiques du résidu (taille des particules, humidité, etc.) et du lieu de stockage (forme, positionnement dans un bassin versant, etc.), ainsi que de l'intensité des éléments climatiques auxquels ils sont soumis (pluies, vents, régime de température, etc.).

La combinaison des deux facteurs, quantité et réactivité, déterminera en grande partie la quantité totale d'un composé contaminant qui sera transformée en forme soluble (et/ou biodisponible) par unité de temps. Il est important de rappeler que, pour un même élément contaminant (métal lourd, par exemple), la vitesse de solubilisation, sa réactivité, peut varier énormément en fonction de la nature de la phase minérale porteuse (cas des minerais oxydés ou sulfurés des métaux de base). La vitesse de solubilisation peut aussi être fortement ralentie par la présence dans le minerai de certaines phases minérales (par exemple, l'effet d'un excès de phases carbonatées sur l'oxydation de pyrite). En l'absence d'autres processus de transfert, ce taux de solubilisation, multiplié par le flux d'eau percolant à travers un résidu, contribuera largement à la détermination de la concentration dissoute du composé polluant dans les eaux sortant du résidu.

Il est important de signaler que la quantité totale, et souvent la réactivité, des composés et éléments contaminants d'un résidu diminuent naturellement avec le temps. **L'âge** d'un résidu, le temps depuis lequel il est sujet aux processus de solubilisation et de lixiviation, sera donc également un facteur important; en général, on peut s'attendre à ce que le taux de solubilisation des éventuels contaminants chimiques s'estompe progressivement avec le temps suite à l'épuisement de la masse de composants chimiques susceptibles d'être solubilisée et/ou à leur transformation en composés secondaires moins réactifs.

## 6.2 Les principaux modes de transfert des pollutions

Les réactifs chimiques consommés par les différentes techniques de traitement d'un minerai, s'ils ne sont pas dégradés lors de ces procédés, se retrouveront en sortie de l'usine soit dans un circuit d'eau usée, soit déposés dans un lieu de stockage de résidus solides (généralement humides).

Pour évaluer l'impact potentiel des résidus miniers, des typologies sont proposées (tableau 4). La typologie proposée traite plus particulièrement des résidus résultant des exploitations de substances métalliques, exception faite de Fe et Al.

Il faut néanmoins souligner le fait que, dans le cadre d'une synthèse, seul un niveau typologique assez superficiel peut être présenté. En effet, la nature hautement complexe à la fois des caractéristiques des sites miniers anciens et modernes, de leurs situations environnementales, de l'âge de leurs résidus, etc. rend difficile l'utilisation d'une telle typologie à des fins décisionnelles. Comme cela a été signalé à

plusieurs reprises, les particularités de chaque site et de chaque type de résidu peuvent être appréciées correctement seulement au moyen d'un constat direct, soit l'évaluation de pollutions ou d'instabilités physico-chimiques avérées sur le site où sont stockées les haldes susceptibles de fournir des matières premières secondaire, puis par caractérisation des résidus par analyses chimico-minéralogiques (identification des polluants potentiels, spéciation, susceptibilité à être mobilisés,...).

L'objectif des tableaux ci-dessous est soit de donner une vue d'ensemble des facteurs et phénomènes susceptibles d'influencer le degré d'impact environnemental des différents types de résidus miniers (quelle que soit la substance exploitée), soit d'indiquer la nature des impacts potentiels par type de substance exploitée.

TYPE DE RESIDU	Caractéristiques contribuant à la mobilité (distribution des tailles des particules) <i>Impact potentiel</i>	Caractéristiques contribuant à la capacité polluante chimique (teneur en contaminants / réactivité) <i>Impact potentiel</i>
<b>Résidus de découverte</b> (stériles francs)	Moyen à grossier Hétérogène ↓ grossier homogène <i>résidu a priori peu mobile</i>	Teneur en éléments et réactivité chimique égaux ou inférieurs au fond géochimique et "réactivité" naturels  <i>résidu a priori à faible capacité polluante</i>
<b>Résidus d'exploitation</b> ("stériles" au sens économique, éventuellement contaminants à cause de leur contenu en divers éléments/phases minérales (métaux lourds, pyrite, arsénopyrite ...))	Moyen à grossier Hétérogène ↓  <i>résidu a priori peu mobile</i>	Variable en fonction du type de gisement et de la méthode minière utilisée  Teneurs en réactivité proches des niveaux naturels  ↓ significativement plus élevées <i>capacité polluante = fonction du minerai + gangue, temps</i>
<b>Résidus de traitement</b>	Fine Homogène (humide lors de la mise en dépôt)  <i>résidu éventuellement assez mobile en fonction de la stabilité du stockage et du contexte environnemental</i>	Teneurs éventuellement élevées en phases minérales et éléments polluants (pyrite, métaux lourds, arsénopyrite)  et/ou en réactifs chimiques de traitement (CN, Hg, dépresseurs) Réactivité potentiellement très élevée <i>capacité polluante = fonction du minerai + gangue, procédés de traitement, temps</i>

**Tableau 4** : Typologie des résidus miniers en termes de caractéristiques globales (source: BRGM, 1997)

Deux sources potentielles d'éléments et/ou de composants contaminants ont été évoquées :

- les *phases minérales* présentes naturellement dans le minerai et sa gangue;
- les *réactifs* introduits lors des diverses filières de traitement mises en œuvre dans une usine d'enrichissement.

Ces éléments et/ou composants contaminants peuvent être éventuellement retrouvés principalement dans deux types de résidus miniers :

- les *résidus minéralisés* mais non traités (stériles pauvres) – phases minérales seulement;
- les *résidus issus de l'usine de traitement* – phases minérales et réactifs.

La **substance valorisable** et son **contexte minéralogique**, c'est-à-dire la composition du minerai et sa gangue, auront un effet déterminant sur la nature des impacts générés, par la réactivité et la quantité des phases minérales résiduelles et réactifs chimiques employés. Ces paramètres peuvent varier énormément dans le temps suite à des variations dans la nature du gisement et les procédés de traitement utilisés.

Les **quantités** (absolues et relatives) des différents types de résidus miniers seront fonction des caractéristiques du gisement et de la méthode d'exploitation utilisée (mine à ciel ouvert, mine souterraine). Cette dernière, en conjonction avec le contexte environnemental particulier du site minier, déterminera en grande partie les **impacts esthétiques** que les résidus miniers peuvent potentiellement présenter pour l'environnement.

Pour conclure, les données qui ont été rassemblées sur *la réactivité potentielle* des résidus miniers (évaluée en première approche par les résultats de l'essai de lixiviation NF X31-210) montrent pour certains de ces matériaux des anomalies en sulfates et en métaux lourds qui les rendraient impropres à toute utilisation en techniques routières.

Voici quelques cas d'essais de lixiviation et résidus miniers

### Stériles

Faciès analysés 2 échant. composites	Fe total Solide (%)	Fe Lixiviat (mg/kg)	Al Solide (%)	Al Lixiviat (mg/kg)	As Solide (mg/kg)	As Lixiviat (mg/kg)	Cu Solide (mg/kg)	Cu Lixiviat (mg/kg)	Pb Solide (mg/kg)	Pb Lixiviat (mg/kg)	Zn Solide (mg/kg)	Zn Lixiviat (mg/kg)	Cd Solide (mg/kg)	Cd Lixiviat (mg/kg)
S 1	10.2	30.6	11.4	49.7	16 327	5.8	328	3.6	257	0.5	74	3.8	< 2	< 0.06
S 2	6.8	56.4	13.4	26.4	5 858	101	62	2.3	1 154	17.4	45	10	< 2	0.21

Tableau 5

### Résidus de traitement (flottation / cyanuration)

5 Faciès Analysés	Fe total Solide (%)	Fe Lixiviat (mg/kg)	Al Solide (%)	Al Lixiviat (mg/kg)	As Solide (mg/kg)	As Lixiviat (mg/kg)	Cu Solide (mg/kg)	Cu Lixiviat (mg/kg)	Pb Solide (mg/kg)	Pb Lixiviat (mg/kg)	Zn Solide (mg/kg)	Zn Lixiviat (mg/kg)	Cd Solide (mg/kg)	Cd Lixiviat (mg/kg)
FC 5	19.7	134	6.4	187	36 480	502	1 799	42.3	1 063	1.4	132	13.3	7	0.48
FC 3	13.5	68	9.2	2	14 675	113	483	0.7	479	0.6	621	41.6	7	0.21
FC 2	15.8	9.9	8.1	8	19 872	150	616	1.5	562	0.3	478	5.5	7	0.16
FC 1	19.9	565	7.4	483	25 098	572	2 074	107	995	0.8	181	12.5	9	0.79
FC 4	26.5	165	3.5	19.1	> 50 000	85.2	445	0.8	1 050	0.8	184	13.3	2	< 0.06

Tableau 6

### Scories

3 Faciès analysés	Fe total Solide (%)	Fe Lixiviat (mg/kg)	Al Solide (%)	Al Lixiviat (mg/kg)	As Solide (mg/kg)	As Lixiviat (mg/kg)	Cu Solide (mg/kg)	Cu Lixiviat (mg/kg)	Pb Solide (mg/kg)	Pb Lixiviat (mg/kg)	Zn Solide (mg/kg)	Zn Lixiviat (mg/kg)	Cd Solide (mg/kg)	Cd Lixiviat (mg/kg)
SC 3	21.6	< 0.6	8.4	1.1	> 50 000	1 205	708	0.3	1 576	< 0.1	837	1.9	10	< 0.06
SC 2	19.1	4.9	6.1	1	23 411	12.7	513	0.4	891	< 0.1	320	1.1	4	< 0.06
SC 4	18.9	0.7	7.0	8.3	10 725	7.7	589	6.2	834	0.1	190	1.6	5	0.37

Tableau 7

Tableaux 5, 6, 7 : Résultats des analyses chimiques réalisés sur solides et sur lixiviats des différents types de résidus miniers (stérile, tailings et scories) de l'ancienne mine d'or de Malabau (Aude).

Les études de caractérisation menées récemment sur plusieurs anciens stockages de déchets miniers [Cottard et al, 2001; Cottard et al, 2002] révèlent une grande variabilité des compositions chimiques des déchets dans une même filière de traitement (ex: filière Pb/Zn, filière Or ...) et, à l'intérieur d'un même dépôt.

Plusieurs exemples sont présentés ci-après.

- **Exemple d'une ancienne mine de cuivre et d'or (Malabau, district de Salsigne, Aude)**

Les tableaux présentés ci-dessous correspondent aux compositions chimiques de 3 types de déchets existant sur l'ancien site minier de Malabau exploité pour l'or et le cuivre (concession de La Messette dans le district de Salsigne, Aude). Dans chaque tableau figurent les résultats correspondant à la fois aux analyses effectuées sur solide et sur lixiviats (réalisées selon la norme Afnor X 31210). Les résultats des tests de lixiviation (exprimés en mg mobilisable par kg de matière sèche) sont censés mettre en évidence la mobilité des éléments concernés.

- **Exemple d'une ancienne mine de tungstène (Engualès, Aveyron)**

N° échantillon	Localisation	Description	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	F
900/E1R	Est du dépôt	Sables pyriteux	41,3	1,6	2,5	9,2	-1	-30	5,7	2,6	2845	2,3	1
			<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
			-0,05	9,5	23,7	1,11	0,88	-0,02	1,08	-0,05	0,67	449	1,63
			<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>
			-0,1	0,43	16,1	-0,05	-0,1	70,7	-0,1	0,25	-0,1	-0,2	1,39
<b>Cr6</b>	<b>U</b>												
			-0,1	-0,01									
N° échantillon	Localisation	Description	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	F
901/E2R	Centre du dépôt	Sable ferrugineux	170	9,9	3,5	11,2	-1	-30	8,3	2,4	3408	1,1	1,2
			<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
			-0,05	29,6	0,62	1,06	0,16	-0,02	0,47	0,11	0,62	118	4,21
			<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>
			-0,1	0,3	3,39	-0,05	-0,1	99,8	-0,1	0,23	-0,1	-0,2	2,74
<b>Cr6</b>	<b>U</b>												
			-0,1	-0,01									
N° échantillon	Localisation	Description	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	F
902/E3R	Partie ouest du dépôt	Résidu sablo-ferrugineux ocre	88,7	37,3	3,4	17	-1	-30	9,7	1,5	3400	-1	2,5
			<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
			-0,05	93	0,16	1,04	0,1	-0,02	0,42	0,11	20,56	30,7	12,5
			<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>
			-0,1	0,98	0,2	-0,05	-0,1	100,9	-0,1	0,12	-0,1	-0,2	5,66
<b>Cr6</b>	<b>U</b>												
			-0,1	0,14									

**Tableau 8** : Résultats des analyses chimiques sur les lixiviats des résidus de traitement (gravimétrie et flottation) de l'ancienne mine de tungstène d'Engualès (Aveyron).

- **Exemple d'une ancienne mine de Plomb / Zinc (Pierrefite, Htes Pyrénées)**

N° échantillon	Localisation	Description	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	F
P1R	Terril n°1	Résidu sablo-limoneux	370	93,5	3	8,6	4,3	-30	14	1,5	8 400	-1	2,1
			<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
			-0,05	49,3	-0,1	-0,2	0,34	6,42	2,39	0,23	4,48	39,4	14,8
			<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>
			-0,1	1,04	32,4	-0,05	-0,1	69,6	-0,1	0,29	-0,1	-0,2	2 683
<b>Cr6</b>	<b>U</b>												
			0,11	-0,01									
N° échantillon	Localisation	Description	Ca	Mg	Na	K	NH <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	PO <sub>4</sub>	F
P2R	Terril n°2	Résidus sableux ocre	9 370	59	4	118	9,8	141	4,3	1,1	17 800	-1	-1
			<b>Ag</b>	<b>Al</b>	<b>As</b>	<b>B</b>	<b>Ba</b>	<b>Cd</b>	<b>Co</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
			-0,05	-0,3	0,26	-0,2	0,52	0,94	11,3	-0,05	0,33	6,63	180
			<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>W</b>	<b>Zn</b>
			-0,1	6,24	1,11	-0,05	0,1	56,7	-0,1	9,55	-0,1	-0,2	150
<b>Cr6</b>	<b>U</b>												
			-0,1	-0,01									

**Tableau 8** : Résultats d'analyses chimiques (en mg/kg) sur les lixiviats des résidus de traitement (flottation) de l'ancienne mine de Pb-Zn-Ag de Pierrefite (Htes Pyrénées).

## 7 Aspects sanitaires

Les effets toxiques des déchets miniers restent encore aujourd'hui mal connus, principalement à cause du manque de données épidémiologiques. Les impacts potentiels sur la santé humaine sont en grande partie causés par la bioaccumulation des métaux lourds ou autres éléments toxiques dans la chaîne alimentaire. **Le risque sanitaire induit par la bioaccumulation dans la chaîne alimentaire** dépend spécifiquement de chaque métal ou de l'association des métaux en question. Il peut ensuite être modifié ultérieurement par d'autres facteurs liés au contexte géologique (acidité, dureté de l'eau, etc.) qui affecte l'évolution du métal. L'environnement biologique peut également avoir une influence sur la toxicité : à noter en particulier la méthylation de certains métaux (surtout le mercure) en condition anaérobie qui produit des composés extrêmement toxiques [Moore et Ramamoorthy, 1984].

### 7.1 Facteurs influençant l'absorption et la bio-disponibilité des métaux dans l'environnement

Les dangers que posent les métaux pour la santé reposent dans une grande mesure sur la forme sous laquelle les cellules cibles des organismes vivants les absorbent. Par exemple, le mercure organique présent dans le poisson sous forme de méthylmercure consommé tous les jours pendant une longue période, est beaucoup plus dangereux que le mercure inorganique à la même concentration. Par contre, l'arsenic inorganique semble plus dangereux que certains composés méthylés d'arsenic, comme ceux trouvés dans les organismes marins. L'arséniate ou l'arsénite, que l'on peut trouver dans les vins provenant de régions où le sol est riche en arsenic, est très toxique. En raison de leurs propriétés chimiques, les métaux ou composés métalliques peuvent se lier à divers ligands pour former des complexes ayant une activité biologique propre. En général, les ions des métaux lourds sont plutôt réactifs et peuvent former des complexes avec un certain nombre de ligands inorganiques ou organiques contenant des résidus sulfhydrylés ou un groupement carboxyle ou phosphate. Dans l'eau, l'adsorption de métaux sur des particules en suspension influe sur la teneur en métaux, mais la présence de substances humiques ou de composés organiques libérés par des algues planctoniques modifie considérablement la forme sous laquelle les métaux se manifestent. La salinité de l'eau influe également sur la différenciation des métaux (c'est-à-dire la nature des différentes formes chimiques qu'un métal peut prendre dans un milieu donné et les proportions de ces formes) et sur leur solubilité. Par conséquent, dans les écosystèmes aquatiques, la biodisponibilité des métaux repose non seulement sur la charge externe de métaux, mais également sur les caractéristiques chimiques de l'eau dans laquelle ils sont déversés. De même, dans les produits alimentaires, les métaux se lient surtout à des ligands organiques (acides aminés et peptides courts) et se manifestent sous forme de divers complexes chimiques. La cinétique de l'absorption des cations métalliques ne reflète pas nécessairement le comportement de la totalité du métal qui se trouve dans un milieu, car le taux d'absorption peut

varier considérablement selon le composé métallique ou la forme du métal. Après l'absorption, la diffusion dans l'organisme des métaux qui sont parvenus au plasma, ainsi que les interactions des métaux absorbés par les cellules avec les composantes intracellulaires, reposent aussi dans une grande mesure sur la forme chimique de ces métaux.

## 7.2 Exemples d'éléments chimiques relargués par les déchets miniers

A titre d'exemple, nous citerons quelques éléments le plus souvent rencontrés à l'aval hydraulique de dépôts de déchets miniers.

### L'arsenic

Les concentrations en arsenic peuvent être élevées près des mines, des fonderies et des usines de traitement de minerais [Libaude et al, 1992]. D'après les études épidémiologiques, l'arsenic figure dans la classe 1 ou A des substances cancérigènes [CIRC, **classe** 1, 1980, US-EPA, **classe** A, 1988; <http://epa.gov/iris/subst/0278.htm>].

### Le cadmium

Le cadmium est classé B1 parmi les substances cancérigènes, selon des études sur les animaux dans lesquelles le métal avait été soit inhalé, soit injecté en intramusculaire ou en sous-cutané.

### Le plomb

Le plomb est considéré comme un produit cancérigène de classe B2. Les eaux d'exhaure des mines ou les déchets miniers relarguent des composés inorganiques du plomb, mais à la fois les composés organiques et inorganiques posent de sérieux risques pour la santé.

## 8 Utilisation dans les infrastructures routières

L'étude menée en 1983 par le BRGM en collaboration avec l'ANRED (aujourd'hui l'ADEME) sur les expériences nationales de réutilisation des déchets miniers (Carly, 1983) souligne l'existence de trois grands types de valorisation:

- en cimenterie, les déchets (huit dépôts identifiés) ont été réutilisés comme correctifs chimiques, notamment en fonction de leur contenu en fer, ou comme matière première par cette branche industrielle ;
- en travaux public et travaux routiers, la réutilisation la plus fréquente en empierrement de chemins (plusieurs dizaines de cas répertoriés) et en enrobés ;
- en remblayage, sous forme de plate forme, de tranchées EDF - GDF ou d'adduction d'eau (plusieurs dizaines de cas connus).

Il existe à notre connaissance peu d'études et pas d'inventaires récents des retours d'expérience concernant la réutilisation de déchets miniers. Quelques inventaires ont été réalisés par le BRGM au début des années 80 [Carly, 1983 ; Rougeaud et Sauter, 1984]. Ce manque de données est dû :

- à l'absence de documentation spécifique (tests, quantification, destinations...) relative aux expériences de réutilisation concrètes ou projetées ;

- aux difficultés d'obtenir de la majorité des organismes officiels ou des exploitants particuliers, les renseignements en leur possession.

Les travaux faits, inventaire en cours de réalisation des anciens sites miniers de la région Midi-Pyrénées [Bouroullec et al, 2001; expérience qui sera étendue en 2003-2004 à tout le territoire métropolitain], et la base DECHMINUE [Thomassin et al., 2001], révèlent cependant que de nombreuses réutilisations existent dans le domaine des travaux publics, mais que la plupart a été faite sans les caractérisations préalables et autorisations nécessaires (traces d'emprunts sur les dépôts de matériaux) [Cottard et al., 2002].

### **8.1 Déchets provenant de mines métalliques (métaux non ferreux)**

D'une manière générale la réutilisation de déchets (stériles, résidus de traitement et scories) générés par les mines métalliques de non ferreux (Plomb-Zinc, Cuivre, Etain-Tungstène, Or-Argent, Antimoine, etc.) est prohibée, compte tenu de la présence dans les déchets de sulfures résiduels et d'éléments potentiellement toxiques. Comme nous l'avons vu précédemment, ces déchets chimiquement instables, une fois exposés à l'air libre, présentent en effet la particularité de générer de l'acide sulfurique et des métaux solubilisés et une grande quantité de sulfates de métaux. Ces caractéristiques chimiques en font des matériaux évolutifs qui pour de multiples raisons (risques de gonflement, dispersion de contaminants dans le milieu naturel pouvant présenter un risque pour les eaux de surface ou souterraines et donc pour la santé) ne peuvent être valorisés en techniques routières.

### **8.2 Déchets provenant de mines de fer**

Les déchets générés par les mines de fer ne contiennent pas de sulfures et peuvent présenter des caractéristiques de matériau de substitution en construction routière, en remblais, ou pour d'autres utilisations.

Plusieurs emplois sont répertoriés en Loire Atlantique (ancienne mine de Rouge), dans le Calvados (ancienne mine de Soumont) et en Lorraine (ancienne exploitation de Metzange d'Usinor).

### **8.3 Déchets provenant de mines ayant exploité d'autres substances (fluorine, barytine, andalousite, potasse...)**

Ces déchets contiennent peu ou pas de sulfures, ce qui peut les rendre éventuellement utilisables comme matériaux de substitution en construction routière ou en remblais. Plusieurs cas de réemploi ont été répertoriés à partir des mines de fluorine ( $\text{CaF}_2$ ) et d'andalousite ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

- Certains déchets de ce type issus d'exploitations générant de très grandes quantités de stérile ont fait l'objet, il y a déjà plusieurs dizaines d'années, d'études spécifiques ou de chantiers pilotes pour mieux connaître leurs conditions de valorisation et les risques posés par leur emploi dans la route. A l'exception des stériles provenant de l'exploitation du charbon (voir rubrique schistes houillers), aucune de ces études ou de ces tentatives expérimentales n'a débouché sur un réemploi à grande échelle.

Citons par exemple les déchets des mines de potasse d'Alsace (30 millions de tonnes). Le traitement de ce minerai, dont l'objectif principal était la production de potasse pour la fabrication d'engrais, comporte l'extraction dans un premier temps du chlorure de potassium puis du chlorure de sodium. Le résidu issu de ce traitement a fait l'objet de diverses appellations (schistes des mines de potasse selon le GTR, résidus R2 selon le producteur, ...). Il a l'aspect d'un sable limoneux 0/5mm à grains anguleux constitué de 30 % à 40 % d'éléments silicatés, de 30 % d'éléments carbonatés et de 20 à 30 % d'anhydrite. La teneur en chlorure de sodium est de 5 % à 10 %. En quelques semaines, l'anhydrite de ces "schistes" se transforme en gypse et s'accompagne d'une prise en masse du matériau avec un faible gonflement (2 % environ). Il est à noter que la présence de chlorure de sodium donne à ce matériau un caractère non gélif selon les conditions de l'essai de gonflement au gel [NF P 18-593 et NF P 98-234-1].

Le LRPC de Strasbourg a suivi divers chantiers expérimentaux d'utilisation de ces schistes de mine de potasse en remblai et couche de forme. Ces opérations ont montré:

- que la mise en œuvre se faisait sans difficulté particulière;
- que la prise en masse du matériau frais permettait de réaliser des couches de forme se rigidifiant avec le temps et capable de supporter un trafic lourd.

De son côté, la DDE du Haut Rhin a utilisé à titre expérimental plus de 20 000 m<sup>3</sup> de ce matériau en noyau de remblai pour une voie rapide. Ces travaux ont confirmé les constatations précédentes.

L'obstacle essentiel à l'utilisation intensive à l'heure actuelle de ces schistes des mines de potasse réside plus dans l'incertitude quant aux risques de pollution (en particulier par les sulfates) qu'à d'éventuels problèmes de nature géotechnique.

## 9 Bibliographie

### 9.1 Publications

ADEME, 2002. « Evaluation de l'écocompatibilité de scénarios de stockage et de valorisation des déchets » - Editions– Réf. 4445.

Allan R.J. and Salomons W., 1995. "Heavy metal aspects of mining pollution and its remediation." *Journal of Geochemical Exploration Spec. issue*, vol. 52, n° 1 and 2, 284 p.

Baroudi H., Troly G., 1996. « L'environnement dans les mines », chapitre X dans le "Mémento des Mines et Carrières – 1996, p. 505-525.

Chermette A., 1960. « Les ressources de la France en Spath Fluor. » Ed. Technip, BRGM, 52 p.

Davies B.E., 1983. "Heavy metal contamination from base metal mining and smelting: implications for man and his environment." In: *Applied environmental geochemistry*, Academic Press, I. Thronton Ed., 501 p.

Fortescue J.A., 1980. « Environmental Geochemistry. A Holistic approach. » Ed. Springer Verlag, Ecological studies, vol. 25, Ed. Billings Durham, USA, 347 p.

Honma Y., 1988. "Dace (*Leuciscus* spp.) and other syprinid fish as biological indicators of Hg pollution" in: Yasuno M. and Whitton B.A. (eds.), *Biological Monitors of Environmental Pollution: Tokai University Press, Tokai*, pp. 49-84.

Les ressources minières françaises. Annales des mines. Juillet-août 1980, 186<sup>ème</sup> année, n° 7-8, 191 p. Actes du XXVIème Congrès Géologique International, Paris.

Ministère de l'Industrie et de la Recherche. « Statistiques de l'Industrie Minérale 1960 – 1977. » Annales des Mines.

Moore J.W. and Ramamoorthy S., 1984. "Heavy metals in natural waters – Applied monitoring and impact assessment." *Springer-Verlag, New York*, 268 p.

Nordstrom D.K., Alpers C.N., Ptacek C.J., Blowes D.W. , 2000. "Negative pH and extremely acidic mine waters from iron Mountain, California". *Environment Science and Technology*. Vol. 13 n° 5, p. 254-258.

Pasava J., Kribek B., Zak K., 1995. "Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts." *Proceedings of the Third biennial SGA meeting (Prague, République Tchèque)*, août 1995 ; A.A. Balkema (Rotterdam), p. 1018.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 1993. "Integrated Risk Information System (IRIS)."

## 9.2 Documents techniques

Barrès M., 1979. « Comportement hydrodynamique et évolution chimique des déchets miniers fins en décharge (effets sur l'environnement). Etude de la digue à stériles de St Salvy-de-la-Balme (Tarn). » *Rapport BRGM 79 SGN 662 HYD*, 91 p.

Béziat P., Bornuat M., 1995. « Carte minière de la France métropolitaine. Echelle 1/1 000 000. Notice explicative. » *Rapport de Service Public, BRGM, Service Minier National*, 102 p.

Bourdier G., Lambert J., Sionneau J.P., 1981. « Mine d'or du Bourneix (Haute-Vienne). Etude d'impact pour les installations classées. » *Rapport BRGM 80 SGN 867 ENV*, 65 p.

Bouroullec I., Cottard F., Dutartre Ph., Fleury L., 2001. « Notice d'explication de la base de données sur les anciens sites miniers de Midi-Pyrénées. » *Rapport BRGM/RP-51211-FR.*, 30p., 2 ann.

BRGM, 1997. « Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels ». *Rapport R39503*, 85 p.

BRGM, INERIS, MATE, 2000. « Gestion des sites pollués - Diagnostic approfondi, Evaluation détaillée des risques. »

Brunet J. F., 2000. « Drainages Miniers Acides - Contraintes et Remèdes - Etat des Connaissances. » BRGM/RP-50504-FR, 299 p., 15 fig., 36 tabl., 19 phot., 10 ann.

Carly R., 1981. « Inventaire des dépôts et rejets miniers. » Compte rendu de l'activité 1980. Rapport BRGM 81 SGN 208 ENV, 76 p. (112 mines métalliques et 86 mines F, Ba, amiante répertoriées).

Carly R., 1983. « Expériences nationales de réutilisation des déchets miniers. » Convention ANRED-BRGM n° 82.54.064. Rapport BRGM 83 SGN 839 ENV, 20 p, 2 ann.

Carly R., 1983. « Recueil de données sur le réaménagement des sites miniers. » Rapport BRGM 83 SGN 582 ENV, 269 p.

Chambre Syndicale des Mines de fer de France. « Les mines de fer françaises 1876 – 1991 ». Rapports d'activité de la Chambre Syndicale des Mines de fer de France.

Collectif, 1972 – 1986. Cartes des gîtes minéraux de la France au 1/500 000. 8 feuilles. Ed. BRGM.

Cottard F., Bouroullec I., Dutartre Ph. Fleury L., 2002. « Audits environnementaux de six mines fermées ou abandonnées de la région Midi-Pyrénées. » BRGM/RP-51538-FR, 76 p., 8 fig., 20 tabl., 3 ann.

Cottard F., Marroncle J.L., 2001. « Evaluation environnementale du site de l'ancienne mine d'or de La Messette (Aude). Concession de Malabau. » BRGM/RP-50675-FR, 160 p., 8 fig., 14 tabl. 2 ann.

Devaux P., 1980. « Utilisation des déchets miniers en terrassement. Les stériles des Mines de potasse d'Alsace. » Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement. Laboratoire régional de Strasbourg., gcs. 36, faer 1.36.06.7.

Devaux P., 1983. « Les remblais expérimentaux en résidus des Mines de Potasse d'Alsace de Marie-Louise et d'Aspach-le-Bas. » Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Laboratoire régional de Strasbourg, faer 1.36.18.0.

Devaux P., 1984. « Utilisation de déchets miniers en terrassement. Mines de potasse d'Alsace. Etude de mélange R<sup>2</sup> + 6/20. » Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Laboratoire régional de Strasbourg, faer 1.36.06.1.

Lajoinie J.P., Laville P., 1979. « Les formations bauxitiques de la Provence et du Languedoc. Dimension et distribution des gisements. » Mémoire du BRGM n° 100.

Lansart M., Sauter M., 1983. « Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 2. Le cas de Cheni (Haute-Vienne). » Rapport BRGM 83 SGN 721 ENV, 69 p.

Laville-Timsit L., Bonnefoy D., 1985. « Valorisation des données de l'Inventaire géochimique pour la définition de pollutions métalliques dans les Vosges, le Massif central et le Massif armoricain. » Rapport 85 DAM 030.

Libaude J., Maroncle J.L., Morin D., Védrine H., 1992. « Haldes aurifères de l'ancienne mine du Châtelet (Creuse). Caractérisation et évaluation des risques liés au dépôt. » Rapport BRGM R35105, 52 p.

Margron P., Maubert F., Sionneau J.M., 1983. « Etude technico-économique pour l'implantation d'une digue à stérile à Rouez (Sarthe). » Rapport BRGM 83 SGN 096 GEG, 64 p.

Maubert F., 1982. « Constat d'impact de trois mines souterraines : 2. Le cas de la mine de Salau (Ariège). » Rapport BRGM 82 SGN 866 ENV, 81 p.

Maubert F., 1983. « Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 1. Le cas de la mine de La Croix de Pallières (Gard). » Rapport BRGM 83 SGN 583 ENV, 55 p.

Maubert F., Sauter M., 1983. « Impacts résiduels d'anciennes mines. » Rapport BRGM 82 SGN 249 ENV, 16 p. 22 fiches de constats sur 22 exploitations du Massif central.

Maubert F., Sauter M., Carly R., 1983. « Inventaire des expériences de réaménagement de mines. » Rapport BRGM 83 SGN 241 ENV (15 sites réaménagés décrits).

PNUE, 1991. « Environnement et exploitation minière de certains métaux non ferreux (Cu, Ni, Pb, Zn, Au) : guide technique. » PNUE, Paris, p. 122.

Rougeaud J., Sauter M., 1984. « Evaluation des possibilités de réutilisation des déchets miniers de la division minière du Massif central. » Rapport BRGM 84 SGN 095 ENV (229 sites visités dont 103 sites de déchets miniers répertoriés, localisés : Division minière Massif central, 87 000 km<sup>2</sup>).

## 10 Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Auteurs : Nelly Vulcano (LRPC Autun)
Relecture d'experts OFRIR1	Guillaume Gay (INERIS), Benois Schnuriger INERIS), Vincent Lédée (LCPC), Michel Legret (LCPC), Patrice Piantone (BRGM), Yves Brosseau (LCPC), Jean-Claude Auriol (LCPC), Agnès Jullien (LCPC), François De Larrard (LCPC)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Frédéric Leray (Ministère de l'équipement), Pierre Dupont (SETRA), Alain Millote (ADP), Jean-Pierre Lemesle (FNTF), Daniel Berrebi (FNTF/USIRF), Jacques Vecoven (UNPG/HOLCIM)
Date de mise en ligne, version finale	Ofrir1-Juillet 2004, révision Mai 2006