

Année 2019/2020

Groupe : Licence 2^{ème} année Génie minier

Matière : Gestion de l'environnement minier

CHAPITRE I : IMPACT DE L'EXPLOITATION MINIERE SUR L'ENVIRONNEMENT

1. Les différentes techniques d'exploitation minière

L'exploitation d'une mine consiste à extraire des roches ou minerais ayant une valeur économique. Plusieurs techniques d'exploitation minière existent mais peuvent être réparties en deux grandes familles :

- la mine à ciel ouvert (Figure 1) ;
- la mine souterraine (Figure 2) ;



Figure 1 : Mine à ciel ouvert de cuivre-plomb-zinc de Las Cruces, en Espagne



Figure 2 : Entrée principale de la mine souterraine de tungstène de Mittersill, en Autriche

1.1. L'exploitation à ciel ouvert (Mine à ciel ouvert : MCO)

L'exploitation d'une mine à ciel ouvert (MCO ou open pit en anglais) consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent. Les MCO concernent l'exploitation de parties de gisement situées proches de la surface topographique (typiquement entre 0 et 400 m de profondeur). On distingue classiquement, selon la disposition des zones minéralisées :

- Exploitations en découverte (lorsque le gisement est stratiforme, peu profond et s'étend sur une grande surface horizontale) ;
- Exploitations en fosse (lorsque le gisement s'enfonce dans le sous-sol avec une extension latérale réduite). Toute exploitation en MCO comprend les étapes de travail suivantes :
 - **Décapage** : il s'agit de retirer les terrains situés en surface pour mettre à nu les niveaux à exploiter. On retire ainsi la terre végétale, les roches plus ou moins altérées et les niveaux stériles ;
 - **Abattage** : l'abattage à l'explosif et se compose dans ce cas : d'une phase de foration : à l'aide de sondeuses à percussion, marteau fond de trou, sondeuses rotatives. Le matériel est choisi en fonction de la nature du minerai à extraire, ainsi que de la vitesse et de la profondeur de foration nécessaires pour atteindre la production quotidienne visée. Cette opération doit se faire suffisamment à l'avance pour permettre la préparation du chantier en vue de l'évacuation des produits abattus ; d'une phase de tir de mine : l'explosif le plus utilisé est le nitrate-fuel (ANFO) mais l'utilisation d'unités mobiles de fabrication d'explosif (UMFE) se développent, ces dernières peuvent éventuellement constituer une alternative à la manipulation de cartouches d'explosifs et à leur transport depuis le lieu de fabrication au site de tir sont distingués les tirs d'abattage (pour disloquer le massif rocheux) des tirs de découpage (pour dessiner les gradins) ;

L'abattage mécanique : dans le cas de massifs « tendres », des pelles spécifiques extraient de manière continue les roches (pelles à câbles, pelles hydrauliques, etc.)

- **Chargement** : il s'agit de déblayer la zone de tir des roches abattues. Le chargement est effectué par des chargeuses et les excavateurs à godet.
- **Transport** : il s'agit de transporter les diverses roches déblayées vers la zone de traitement. Dans certains cas, ce transport peut se faire directement par les pelles (distance de transport très faible). Le plus souvent il est effectué essentiellement par bandes transporteuses ou par camions. Sur de très longues distances, des voies de chemins de fer peuvent être construites.

1.1. L'exploitation souterraine (Travaux miniers souterrains : TMS)

L'exploitation d'une mine souterraine consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée sous la surface du sol, elle correspond aux travaux miniers souterrains (rampes, descenderies, galeries, puits). Ces derniers permettent d'accéder au minerai et de mettre en place toutes les infrastructures afin d'assurer l'aération, l'exhaure, l'accès du personnel et l'évacuation du minerai. Les mêmes étapes qu'en ciel ouvert se rencontrent en souterrain et sont complétées par deux phases additionnelles :

- **Abattage** : il peut être à l'explosif ou mécanique (scies, machines à attaque ponctuelle ou mineur continu) ;
- **Aération** : forcée pour assurer l'évacuation de toutes les fumées liées aux tirs ;
- **Chargement** : (simple ou avec transport combiné), également dénommé marinage en souterrain ;
- **Transport** ;
- **Confortement** : il s'agit de sécuriser localement, les ouvrages souterrains les plus sensibles ou les plus utilisés. Il existe plusieurs techniques dont celle du boulonnage (pose de boulons pour fixer les éléments rocheux du toit ou des parements) et celle du gunitage (béton projeté).

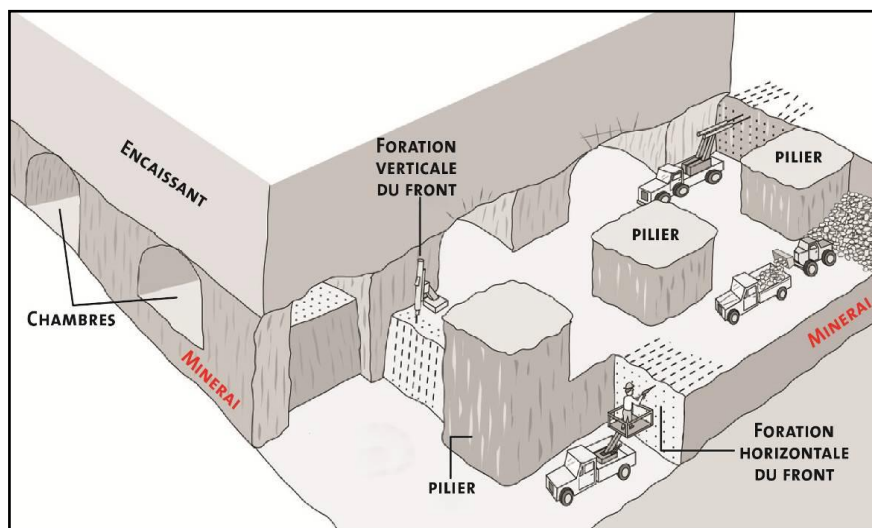


Figure 3 : La technique d'exploitation par chambres et piliers

2. Le traitement des minerais

Traitement du minerai, ou minéralurgie (mineral processing, en anglais). C'est, le passage de la mine au concentré métallique, il regroupe un ensemble de techniques de traitement physiques et physico-chimiques ayant pour objet d'obtenir des produits ayant une valeur

commerciale et transformables par la métallurgie. Le traitement du minerai s'effectue dans une usine de traitement dédiée qui peut être localisée sur le site même de la mine ou bien totalement délocalisée du site d'exploitation (Figure 4). Le traitement du minerai suit un schéma de procédé bien défini et spécifique pour chaque type de minerai.



Figure 4 : Usine de traitement de la mine d'or de Kittilä, en Finlande

Au sein du traitement du minerai (minéralurgie), il est possible de simplifier l'approche en deux grandes étapes distinctes et successives faisant appel à différentes techniques :

- Comminution (réduction granulométrique par concassage et broyage) ;
- Concentration (par flottation, concentration gravimétrique, séparation magnétique, etc.).

2.1. La comminution

La comminution est la première phase de traitement du minerai et consiste à la réduction granulométrique des matériaux extraits de la mine. Cette étape va permettre de libérer les minéraux de valeur (porteur des métaux valorisables) des minéraux de la gangue (stérile), de générer des surfaces de grain fraîches, de réduire la taille des grains. Cette réduction granulométrique passe par de multiples opérations de concassage puis de broyage avec l'utilisation de plusieurs types de machine par voie sèche et/ou par voie humide :

- **Concassage primaire**, avec notamment des concasseurs à mâchoires ou giratoires ;
- **Concassage secondaire**, avec des concasseurs à cônes pour obtenir des grains centimétriques;
- **Concassage tertiaire**, généralement effectué à l'aide de broyeurs à boulets ou à billes pour obtenir une granulométrie de l'ordre de quelques micromètres. La taille finale des particules (généralement de quelques millimètres à quelques micromètres) est déterminée à partir

d'observations minéralogiques et de tests en laboratoire permettant de déterminer la maille de libération.

2.2. La Concentration

Une fois le minerai concassé et broyé, débute alors la phase de concentration qui va permettre de séparer les particules libérées lors de la comminution, selon leurs propriétés physicochimiques et produire un concentré de minerai. Il est important de rappeler ici, que les produits issus de ces étapes minéralurgiques peuvent être directement commercialisables. Plusieurs techniques sont utilisées :

- **Séparation magnétique** : cette méthode utilise les propriétés magnétiques des minéraux et permettra par exemple de séparer le quartz (non magnétique) des oxydes de fer et de titane (magnétite, hématite et ilménite), ou encore de trier des sables à rutil, ilménite et zircon. Cette méthode s'applique particulièrement aux minéraux ferreux ;

- **Séparation par gravité** : cette méthode consiste à séparer les minéraux par gravité à l'aide d'une liqueur dense (typiquement des densités de l'ordre de 3) ou d'une suspension de solide à une densité donnée (ex. magnétite, ferro-silicium). Elle est particulièrement utilisée pour les métaux lourds (or, tungstène, titane, niobium et tantale).

- **Flottation** : la séparation des minéraux s'effectue en utilisant les différences qui existent entre leurs propriétés de surface physico-chimiques. Par exemple, après avoir été conditionnées avec des réactifs, certaines particules deviennent hydrophobes (non mouillables), tandis que d'autres restent hydrophiles. Dans le procédé de séparation sélective, les bulles d'air fixent les particules hydrophobes, soulevant celles-ci jusqu'à la surface de l'eau et formant une mousse stable qu'on enlève. Les particules hydrophiles restent à l'intérieur de la pulpe et sont évacuées. Cette méthode s'utilise pour la quasi-totalité des minerais sulfurés, mais aussi pour la plupart des métaux non-sulfurés et pour les minéraux industriels.

3. Les impacts environnementaux

3.1. La déposition des rejets miniers en surface

Les rejets miniers comprennent « Les substances minérales rejetées, les boues et les eaux, provenant des opérations d'extraction ou de traitement du minerai »
On peut classer les aires d'accumulation de rejets miniers selon les trois principaux types d'infrastructures soit:

3.1.1. Les haldes de stériles, Il s'agit de monticules générés par l'accumulation de roche extraite lors de l'exploitation et qui ne contient aucun minéral ayant une valeur économique, (figure 5).

3.1.2. Les parcs à rejets (aussi appelés parcs à résidus miniers). Les différents éléments ou substances contenus dans les minerais extraits des mines ne pouvant pas être mis en marché sans enrichissement (par méthodes minéralurgiques ou métallurgiques), Il s'agit généralement de rejets à texture fine, le broyage des particules étant généralement requis afin de libérer les minéraux que l'on désire récupérer, (figure 6).

3.1.3. Les bassins de sédimentation/polissage. Il s'agit d'étendues d'eau, aménagées au besoin, afin de permettre la dégradation des réactifs utilisés lors du traitement du minerai ou la précipitation des contaminants dissous et le dépôt des matières solides contenues dans les eaux sortant des parcs à rejets; ces bassins ont donc pour but de prévenir ou de réduire au minimum la dispersion des contaminants dans l'environnement, (figure 7).

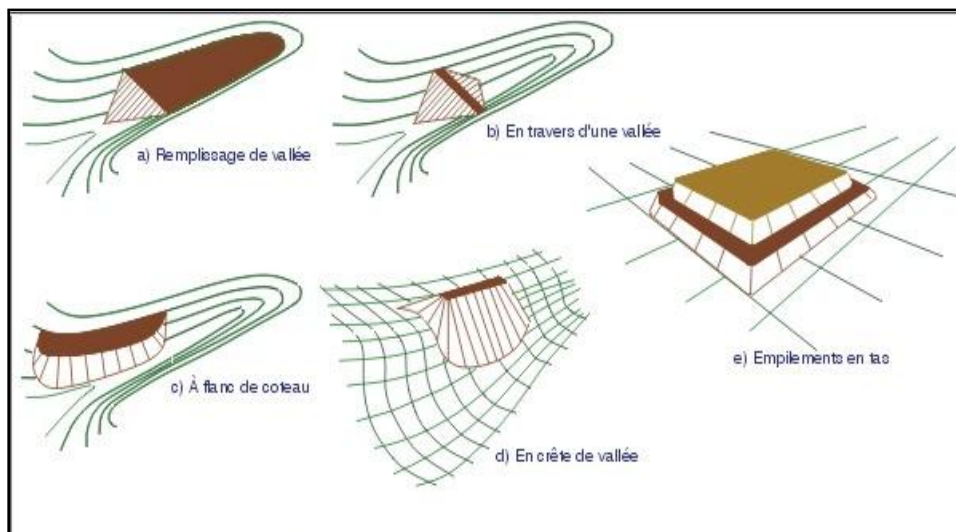


Figure 5 : Types d'empilement de roches stériles

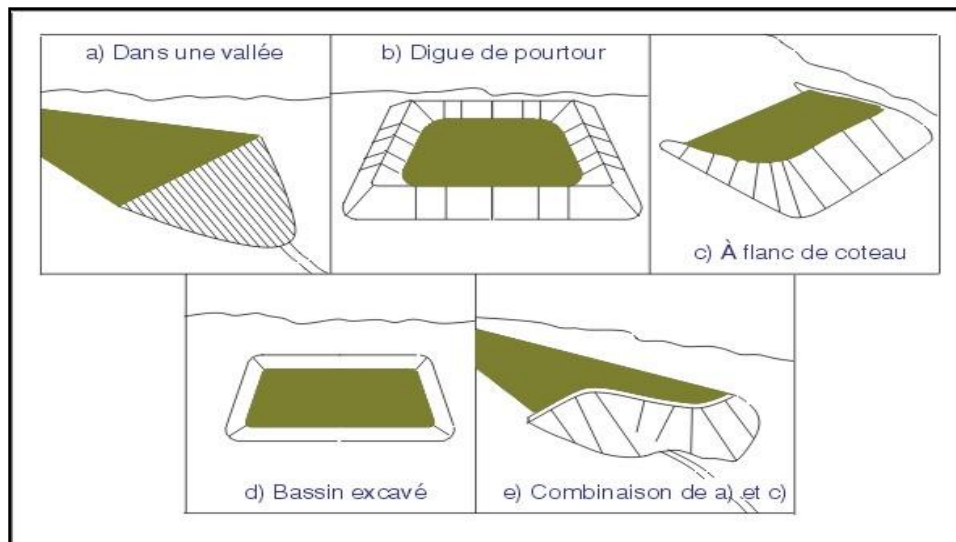


Figure 6 : Configurations usuelles pour les parcs à résidus miniers

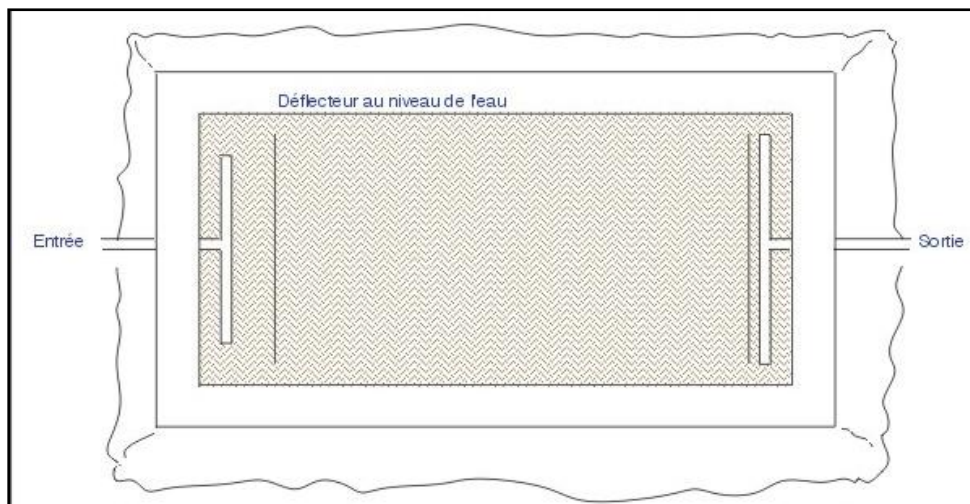


Figure 7 : Représentation schématique d'un bassin de sédimentation

3.2. Les effets sur les sols et les terrains

3.2.1. Les mouvements de terrain et les instabilités géotechniques

Les opérations d'exploitation minière (excavation, utilisation d'explosifs, augmentation progressive de la profondeur d'exploitation) sont de nature à affecter l'état d'équilibre préexistant au sein du massif rocheux vierge. On différencie classiquement la notion de stabilité en deux concepts distincts :

- **l'instabilité locale** : chutes de blocs, fissuration d'un pilier ; ravinements superficiels sur une verse de stériles ; détachements de blocs en front de mine à ciel ouvert, etc.

- **l'instabilité globale** : Affaissement et effondrement miniers, cratère et phénomènes accidentels : glissement profond sur les flancs de découvertes ou de zones de dépôts, (figure 08).

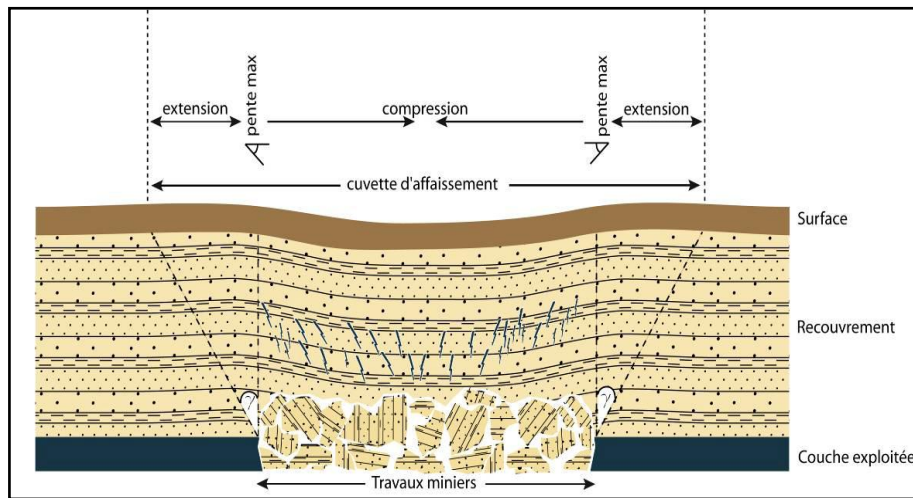


Figure 08 : Affaissement minier

3.2.2. Les pollutions des sols

Les différentes activités exercées sur un site minier pendant, voire après l'exploitation, peuvent être à l'origine de la pollution des sols. Elle se traduit par la présence, à des concentrations anormales en surface ou dans les premiers mètres de sol, d'éléments indésirables et se présentant sous forme de particules solides. Un sol peut être contaminé via différents scénarios :

- Contamination par des polluants issus de stériles ou de résidus miniers via les circulations d'eaux ;
- Contamination à la suite d'un événement accidentel de type rupture de digue, épandage de sables présentant des teneurs en métaux non négligeables pour l'environnement. Dans un même ordre d'idée, des stockages d'hydrocarbures ou d'autres produits chimiques utilisés pour le traitement de minerai, peuvent être à l'origine de la pollution d'un sol, par imprégnation, à la suite de fuites ;
- dépôt de poussières par voie éolienne. L'envol de poussières, à partir d'un dépôt de résidus miniers ou du minerai mis à nu dans une mine à ciel ouvert peut être à l'origine de la contamination de sols après dépôt et accumulation des poussières.

3.3. Les impacts sur l'air

3.3.1. La problématique des gaz et des atmosphères viciées

De par sa composition, le mélange gazeux présent dans les exploitations minières présente souvent plusieurs risques parmi lesquels :

- le risque d'asphyxie, du fait d'une trop faible teneur en oxygène ;
- le risque d'intoxication, du fait de la présence de monoxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène et, dans une moindre mesure, de dioxyde de carbone ;
- le risque d'inflammation ou d'explosion, du fait de la présence de méthane.

3.3.2. Les poussières

Trois phases principales sont sujettes aux émissions de poussières lors de l'exploitation et du traitement du minerai :

- foration et abattage du minerai. Les poussières générées peuvent nuire en premier lieu à la santé des mineurs mais elles peuvent générer des nuisances sur l'environnement extérieur à la mine.
- comminution (concassage et broyage). Ces étapes sont par nature génératrices de poussières (réduction successive de la granulométrie), toutefois de nombreux systèmes d'abattage de poussières existent ;
- stockage de stériles et de résidus de traitement de minerai. Au moment du stockage et du déversement des stériles des poussières, sont généralement créées. L'envol de poussières depuis les zones de dépôts est également un impact possible.

Notons également que la circulation des engins sur les pistes peut également contribuer à empoussiérer l'atmosphère et l'air proches.

3.4. Impacts du tir à explosif

L'utilisation d'explosifs dans les exploitations minières peut avoir diverses répercussions sur l'environnement telles que l'émission de poussières, de gaz nocifs, de vibrations, de jets d'air de bruit, de projectiles ainsi que la contamination des eaux de mine. L'importance de chacun de ces problèmes potentiels dépend du contrôle exercé lors des opérations de dynamitage. Bien que la plupart de ces effets n'affectent que les travailleurs œuvrant sur le site minier, certains peuvent aussi toucher l'environnement et la population avoisinante.

3.5. Impact des agents de traitement minéralurgique

Le procédé de traitement utilisé pour concentrer les minéraux ou pour extraire les métaux précieux peut modifier les caractéristiques des rejets liquides et, par le fait même, la qualité de l'environnement. Ces effets sont en partie reliés à l'utilisation de produits chimiques ayant un certain degré de toxicité à l'usine de traitement. Les agents chimiques les plus fréquemment utilisés dans les usines de traitement du minerai, sont les cyanures, qui sont les composés présentant le plus de danger de contamination de l'environnement.

3.6. Impacts sur les eaux

3.6.1. Le drainage minier acide

On peut définir le drainage minier comme étant le résultat de la circulation des eaux tant de surface que souterraines à travers les composantes d'un site minier (rejets du concentrateur, haldes de roches stériles, galeries de mine, etc.). Les eaux contaminées par le drainage minier acide (DMA), aussi appelé drainage rocheux acide (DRA), peuvent provenir de divers types d'exploitation, incluant des mines de métaux précieux (or, argent), de métaux de base (cuivre, nickel, zinc, plomb), de charbon et d'uranium. Le drainage minier acide se produit naturellement lorsque les minéraux sulfureux réactifs, tels la pyrite et la pyrrhotite, sont exposés à l'eau et à l'air. L'oxydation qui survient libère alors des ions H^+ qui acidifient l'eau. Ce phénomène favorise la mise en solution de divers éléments qui deviennent plus solubles à bas pH. Cette acidité, combinée à la présence de contaminants potentiellement toxiques comme divers métaux lourds (par exemple, Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Cd, Hg, Pb, Co, Ni, Ta, As) peut affecter sérieusement les écosystèmes qui reçoivent les effluents contaminés, (figure 09).



Figure 09 : le drainage minier acide (DMA)

4. Effluents des rejets miniers

Les exploitations minières génèrent une grande quantité de rejets sous formes solide, liquide et gazeuse. La disposition des rejets solides constitue en soi un problème particulièrement important, Pour l'instant, nous traitons de façon plus spécifique des effluents liquides et les effluents gazeux, qui constituent des sources de contamination susceptibles de polluer l'environnement

4.1. Effluents liquides

Un contaminant présent dans un effluent constitue une substance potentiellement nocive pour la vie aquatique ou terrestre, soit directement à cause de sa toxicité, soit indirectement, du fait qu'il élimine des éléments de la chaîne alimentaire ou qu'il entraîne des effets nuisibles à leur développement. On peut les diviser en trois groupes, soit les contaminants non solubles, les contaminants solubles et les contaminants radioactifs.

4.1.1. Les contaminants non solubles : sont constitués de particules solides en suspension dans l'eau qui résultent le plus souvent de travaux de construction ou de phénomènes d'érosion. Dans l'eau, ils entraînent une turbidité (coloration et manque de transparence) accrue ou des effets d'ensablement par sédimentation. En général, ces effets ne sont pas directement toxiques, mais ils modifient la migration des poissons en plus de nuire à leur reproduction ou à leur croissance.

4.1.2. Les contaminants solubles : comprennent à la fois les acides générés par l'exposition des sulfures à l'oxygène de l'atmosphère, les métaux lourds (Cu, Pb, Zn, Hg, etc.) et les contaminants résultant des procédés de traitement des minerais. Source du drainage minier acide (DMA). La majorité des métaux lourds sont toxiques lorsqu'ils sont sous une forme soluble, et cette solubilité dépend du pH de l'eau. Généralement, plus le pH est faible, plus la concentration en métaux lourds est grande. Les métaux lourds en solution peuvent se déplacer très loin (plusieurs kilomètres) en aval du point de déversement et abaisser la qualité des eaux de surface et souterraines.

4.1.3. Les contaminants radioactifs : principalement suite au minage ou au traitement de minerai d'uranium. Les eaux produites contiennent du radium 226, des thoriums 230 et 232 et du plomb 210, leurs effets peuvent s'avérer très dommageables, surtout à long terme.

4.2. Effluents atmosphériques

Outre les effluents liquides, l'activité minière rejette de nombreux contaminants dans l'atmosphère, à une distance plus ou moins éloignée du site. Parmi ces contaminants, on note la présence de poussières et d'autres matières particulaires, ainsi que divers contaminants gazeux.

4.2.1. Les poussières : selon leurs dimensions et leurs compositions, peuvent être inertes et peu dommageables pour l'environnement et pour la population exposée. Certaines poussières relativement fines ($< 10 \mu m$ environ) sont dites respirables et peuvent même s'avérer dangereuses, comme c'est le cas des poussières d'amiante, de béryllium et de silice qui sont à la source de pathologies du système respiratoire.

4.2.2. Les contaminants gazeux : qui constituent une source de préoccupation importante pour l'industrie minière, incluent le monoxyde de carbone (CO), le gaz carbonique (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x).

Le monoxyde de carbone, incolore et inodore, est un gaz qui peut se révéler toxique en raison de son affinité pour l'hémoglobine du sang. En présence de l'oxygène de l'air, il a toutefois tendance à se convertir en CO₂. Le CO₂ serait pour sa part peu dommageable pour l'environnement à faible altitude. Toutefois, le CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère contribue à l'effet de serre qui, estime-t-on, serait responsable d'un certain réchauffement de la planète.

La combustion de carburants fossiles est également à la source de l'émission de SO₂ et d'autres types d'oxydes de soufre (SO_x). Tous les organismes vivants, y compris l'être humain, ressentent l'effet du SO₂. Il s'agit d'un gaz irritant pour le système respiratoire. Plusieurs plantes supportent mal sa présence.

Les oxydes d'azote (NO_x) sont aussi des composés nocifs, issus de l'utilisation de carburants fossiles. Le radon, souvent associé à l'uranium mais aussi aux exploitations de phosphates et autres évaporites, constitue un autre contaminant gazeux. Sans oublier plusieurs autres types de contaminants qui méritent qu'on s'en préoccupe, comme le méthane, les solvants, les catalyseurs, les pigments et autres additifs.

