

Collection « La mine en France »

*Exploitation minière
&
Traitement des minerais*



TOME 6

Collection « La mine en France »

Exploitation minière et traitement des minerais

Tome 6

Février 2017

Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryska Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J., Save M.



Comité de rédaction de la collection

Ministère de l'Économie et des Finances

Coordination : Alain Liger, Rémi Galin

Rédacteurs : Rémi Galin, Jean-François Moras, Diana Guillon.

BRGM – Bureau de Recherches Géologiques et Minières / Service Géologique National

Coordination : Nicolas Charles, Jean-Jacques Dupuy

Rédacteurs : Nicolas Charles, Laurent Bailly, Gaël Bellenfant, Francis Blanchard, Stéphane Chevrel, Patrice Christmann, Francis Cottard, Patrick D'Hugues, Jean-Jacques Dupuy, Jean-Claude Guillaneau, Jean-François Labbé, Bernard Lamouille, Maurice Save, Jean-François Thomassin, Pol Urien, Laure Verneyre, Guillaume Vic.

INERIS – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques

Coordination : Frédéric Poulard

Rédacteurs : Frédéric Poulard, Philippe Gombert, Xavier Daupley, Christophe Didier, Zbigniew Pokryszka.

Réseau d'Excellence Mine & Société (Mines ParisTech, Mines Nancy, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Mines d'Alès)

Coordination : Philippe Kister

Rédacteurs : Hossein Ahmadzadeh, Jean-Alain Fleurisson, Damien Goetz, Philippe Kister, Yann Gunzburger, Michel Jébrak, Brice Laurent, Jack-Pierre Piguet, David Salze.

Mots-clés : exploitation minière, traitement des minerais, méthodes, techniques, impacts, solutions, bonnes pratiques.

En bibliographie, ce document sera cité de la façon suivante :

Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryszka Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J., Save M. (2017) – Exploitation minière et traitement des minerais. Collection « La mine en France ». Tome 6, 77 p., 43 fig., 2 ann.

Sommaire

1. Les différentes techniques d'exploitation minière.....	9
1.1. L'EXPLOITATION A CIEL OUVERT (MINE A CIEL OUVERT : MCO)	11
Exploitation en découverte	13
Exploitation en fosse.....	13
1.2. L'EXPLOITATION SOUTERRAINE (TRAVAUX MINIERES SOUTERRAINS : TMS)	14
Méthodes conservant des vides résiduels après exploitation.....	15
Méthodes supprimant les vides résiduels après exploitation souterraine.....	17
1.3. L'EXPLOITATION PAR DISSOLUTION	18
1.4. L'EXPLOITATION PAR LIXIVIATION <i>IN-SITU</i>	22
1.5. AUTRES METHODES.....	22
1.6. LES ACTIVITES CONNEXES A L'EXPLOITATION MINIERE	22
Les techniques d'aérage.....	22
La mise en œuvre de l'exhaure	24
La gestion des stériles miniers	26
2. Le traitement des minerais.....	27
2.1. LA COMMINATION	29
2.2. LA CONCENTRATION	30
2.3. LA TRANSFORMATION METALLURGIQUE.....	33
2.4. LES MODES DE GESTION DES STERILES ET DES RESIDUS MINIERES	33
Stériles miniers	34
Résidus miniers	35
3. Les impacts socio-économico-environnementaux de l'exploitation minière et du traitement des minerais	39
3.1. LES IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES	39
Les retombées positives	39
Les freins socio-économiques	39
3.2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	40
Les effets sur les sols et les terrains.....	40
Les répercussions sur les eaux	44
Les impacts sur l'air	47
Les autres impacts environnementaux	48

4. Les solutions et les bonnes pratiques.....	49
4.1. LES BONNES PRATIQUES SOCIO-ECONOMIQUES	50
4.2. LES BONNES PRATIQUES RELATIVES A LA STABILITE GEOTECHNIQUE.....	51
Etude et caractérisation amont.....	51
Gestion et traitement	52
Suivi et information	52
4.3. LES SOLUTIONS POUR LIMITER LES VOLUMES DE STERILES ET DE RESIDUS MINIERS PRODUITS.....	53
4.4. LES SOLUTIONS POUR LIMITER LES REPERCUSSIONS SUR LES EAUX	53
Généralités	53
Limiter les effets des méthodes par dissolution	55
Réduire les impacts des méthodes par lixiviation	55
Supprimer ou réduire le drainage minier acide	57
4.5. LES BONNES PRATIQUES RELATIVES AUX PROBLEMATIQUES D'AERAGE.....	58
Etude et caractérisation amont.....	58
Gestion et traitement	58
Suivi et information	58
4.6. LES AUTRES BONNES PRATIQUES	58
Limiter les impacts sur la biodiversité.....	59
Diminuer les nuisances liées aux émissions de poussières.....	59
Minimiser les vibrations liées à l'exploitation	60
Réduire l'impact visuel	60
Réduire la consommation en énergie et les émissions de gaz à effet de serre	61
Gérer les produits dangereux de manière responsable	61

Liste des figures

Figure 1 : Mine à ciel ouvert de cuivre-plomb-zinc de Las Cruces, en Espagne (Cliché : www.cobrelascruces.com).....	9
Figure 2 : Entrée principale de la mine souterraine de tungstène de Mittersill, en Autriche (Cliché : Wolfram Bergbau und Hutten AG).....	10
Figure 3 : Moyennes des coûts d'extraction du minerai en fonction de la technique d'exploitation (Source : BRGM).....	11
Figure 4 : Unité mobile de fabrication d'explosif (UMFE, Cliché : www.sfepa.com).....	12
Figure 5 : Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en découverte (Source : http://ticri.univ-lorraine.fr).....	13
Figure 6 : Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en fosse (Source : http://ticri.univ-lorraine.fr).....	14
Figure 7 : La technique d'exploitation par chambres et piliers (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).....	16

Figure 8 : Foration horizontale dans la mine de sel de Varangéville exploitée en chambres et piliers, en France (Cliché : Comité des Salines de France).....	16
Figure 9 : Technique d'exploitation par tranches montantes remblayées (Source : BRGM).....	18
Figure 10 : Technique d'exploitation du sel par dissolution in situ par forage isolé (Source : modifié d'après CSME).	19
Figure 11 : Méthodes extensives en gisements peu profonds (< 300 m) (Source : INERIS).	20
Figure 12 : Méthode intensive – piste et sondages (Source : INERIS).....	21
Figure 13 : Technique d'exploitation par lixiviation in situ (Source : BRGM).	22
Figure 14 : Ventilateurs principaux couplés en carrière souterraine, Isère (Source : INERIS, SAMIN).	24
Figure 15 : Impact de travaux miniers souterrains sur l'hydrodynamique : (1) niveau hydrostatique avant exploitation, (2) pendant l'exploitation, (3) après abandon (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).....	25
Figure 16 : Impact de travaux à ciel ouvert sur l'hydrodynamique : (1) niveau hydrostatique avant exploitation, (2) pendant l'exploitation, (3) après abandon (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).....	26
Figure 17 : Usine de traitement de la mine d'or de Kittila, en Finlande (Source : www.agnicoeagle.com).	27
Figure 18 : Procédure du traitement du minerai de nickel (Source : SLN).	28
Figure 19 : Procédure du traitement du minerai de cuivre (Source : http://copperalliance.fr/le-cuivre).	29
Figure 20 : Broyeur à boulets de la mine d'or de Kittila, en Finlande (Source : www.agnicoeagle.com).	30
Figure 21 : Principe de fonctionnement d'une colonne de flottation (Source : Thèse F.-O. Verret, 2006).	31
Figure 22 : Cellules de Flottation de l'ancienne usine de traitement de la mine d'or du Bourneix, Haute-Vienne (Source : BRGM).	32
Figure 23 : Lixiviation en tas, mine de nickel en Finlande (Source : www.womp-int.com).	33
Figure 24 : Stockages des stériles (Source : www.rgc.ca).....	35
Figure 25 : Techniques de construction de digues à résidus miniers (Source : modifié d'après Aubertin et al. (2002). Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur CD-ROM, Presses internationales Polytechnique).....	37
Figure 26 : Chutes de toit (instabilité locale), Mine de calcaires asphaltique, Gard (Source : INERIS).	41
Figure 27 : Principe d'une cuvette d'affaissement et de ses conséquences sur le bâti de surface (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).....	42
Figure 28 : Effondrement généralisé sur le périmètre de l'ancienne mine de fer d'Hussigny, 54 (Source : BRGM).	43
Figure 29 : Pompage d'exhaure des eaux de mine sulfatées, bassin ferrifère du Nord (galerie de la Paix à Knutange), 57 (Source : INERIS).	45
Figure 30 : Conséquences du drainage minier acide à Carnoulès, Gard (Source : INERIS).	46
Figure 31 : Différentes mises en oeuvre de remblais en mines souterraines allemandes à gauche et américaines à droite (Source : www.victaulic.com/ et www.asse-archiv.de).....	52
Figure 32 : Bio-lixiviation pour traiter le minerai de cuivre en Ouganda (Source : http://promine.gtk.fi/about/WorkPackage4.html).....	56
Figure 33 : Zones humides ou wetlands, mine de cuivre, de zinc, d'or, d'argent et de cadmium d'East Sullivan au Canada (Source : www.mern.gouv.qc.ca).	57
Figure 34 : Gauche : Découpe de grès des Vosges par jet d'eau haute pression (Source : www.carriere-logel-rothbach.fr). Droite : Dispositif expérimental de découpe de roches avec des jets d'eau à haute pression (Source : www.geosciences.mines-paristech.fr).....	60

Figure 35 : La technique d'exploitation par chambres-magasins (Source : BRGM)	65
Figure 36 : La technique d'exploitation par sous-niveaux abattus (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).	67
Figure 37 : La technique d'exploitation par sous-niveaux abattus par charges concentrées (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).	67
Figure 38 : La technique d'exploitation par sous-niveaux foudroyés (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).	68
Figure 39 : La technique d'exploitation par tranches descendantes sous dalle (Source : BRGM).....	69
Figure 40 : La technique d'exploitation par blocs foudroyés (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).	69
Figure 41 : La technique d'exploitation par tailles (modifié d'après Brady and Brown (1985), Rock mechanics for underground mining).	70
Figure 42 : Modélisation des zones de plastification par cisaillement des dans piliers d'une exploitation sur deux niveaux en fonction de différents paramètres géotechniques (Source : INERIS). Gauche : les différentes couleurs représentent différents matériaux.	74
Figure 43. Gauche : Centrale autonome d'acquisition surveillance de surface en Isère (Source : INERIS). Droite : Suivi de la convergence de piliers de sel au Maroc (Source : INERIS).....	74

Liste des annexes

Annexe 1 Autres méthodes d'exploitation souterraine	63
Annexe 2 Calcul de dimensionnement et stabilité.....	71

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 trois grandes familles :

- la mine à ciel ouvert (Figure 1) ;
- la mine souterraine (Figure 2) ;
- l'exploitation par dissolution et la lixiviation *in situ*.

En complément, une quatrième famille peut être définie elle concerne l'exploitation des placers qui est très spécifique même si elle reste du type ciel ouvert (l'exploitation de ce type de gisement n'est pas envisagée en France métropolitaine tandis qu'elle est courante en Guyane (Cf. Tome 8).



Figure 1 : Mine à ciel ouvert de cuivre-plomb-zinc de Las Cruces, en Espagne (Cliché : www.cobrelascruces.com).



Figure 2 : Entrée principale de la mine souterraine de tungstène de Mittersill, en Autriche (Cliché : Wolfram Bergbau und Hutten AG).

De nombreux ouvrages se sont attachés à recenser, en les classifiant, les différentes méthodes d'exploitation mises en œuvre en France et à l'étranger. Ils mettent en évidence la très grande diversité des techniques développées relatives aux spécificités des mines. Chaque site d'exploitation est unique et se trouve dans une configuration et un environnement qui lui sont propres, il serait donc illusoire, voire dangereux, de transposer, de manière directe et sans une analyse circonstanciée, une méthode d'exploitation d'un site à l'autre.

Le retour d'expérience montre que certains paramètres jouent un rôle décisif sur le choix de la méthode d'exploitation à appliquer (Cf. Tome 5 relatif à la phase de phase de construction du projet minier). Parmi ces paramètres, le principal est la géologie, au sens large, du corps minéralisé (nature, morphologie, profondeur, épaisseur, extension, fracturation, etc.). En complément, l'occupation de la surface et la géographie du site, le savoir-faire de l'exploitant (ou l'historique minier du site) et les objectifs économiques peuvent également intervenir dans le choix de la méthode d'exploitation (Figure 3).

Dans certains cas, la seule prise en compte des critères géologiques ne permet pas de choisir la méthode (cas des gisements peu profonds et épais qui peuvent être exploités à ciel ouvert ou en souterrain), c'est donc sur la base de ces paramètres complémentaires que le choix final sera fait.

Rappelons pour information que les mines et carrières partagent les mêmes techniques d'exploitation (exception des méthodes de dissolution qui sont spécifiques aux mines).

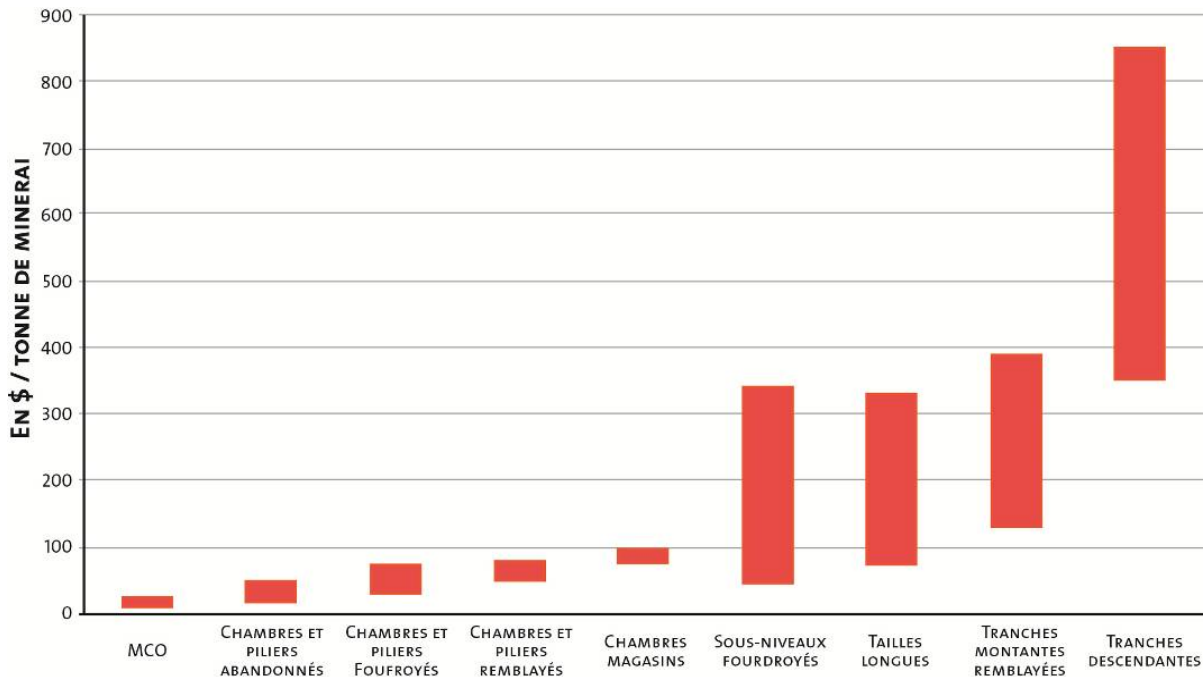


Figure 3 : Moyennes des coûts d'extraction du minerai en fonction de la technique d'exploitation (Source : BRGM).

1.1. L'EXPLOITATION A CIEL OUVERT (MINE A 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).

Les exploitations à ciel ouvert requièrent généralement des engins de chantier aux gabarits imposants et peu communs aux autres secteurs de l'industrie (pelles, roues-pelles, draglines, tombereaux, foreuses).

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** :
 - 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 visée¹. 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 (Figure 4). Sont distingués les tirs d'abattage (pour disloquer le massif rocheux) des tirs de découpage (pour dessiner les gradins) ;
 - abattage mécanique : dans le cas de massifs « tendres », des pelles spécifiques extraient de manière continue les roches (pelles à câbles, pelles hydrauliques, pelles en butte, décapeuses ou « scrapers », roues-pelles, etc.) ;
- **Purge** : il s'agit de sécuriser le site après les tirs afin de faciliter les étapes suivantes (via des pinces à purger notamment) ;
- **Chargement** (simple ou avec transport combiné) : il s'agit de déblayer la zone de tir des roches abattues. Dans le cas d'un tir à l'explosif, le chargement est dit simple et il est effectué² par pelles sur chenilles (en butte ou en rétro) ou par chargeuses frontales sur pneumatiques (dit loader). Dans le cas d'un abattage continu, le chargement est combiné à la phase d'abattage puisque les pelles utilisées déblaient directement les roches.
- **Transport** : il s'agit de transporter les diverses roches déblayées vers la zone de traitement (primaire ou secondaire). 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 tombereaux (rigides ou articulés) ou par bandes transporteuses. Sur de très longues distances, des voies de chemins de fer peuvent être construites.



Figure 4 : Unité mobile de fabrication d'explosif (UMFE, Cliché : www.sfepa.com).

¹ Cette profondeur est limitée en France à 15 m.

² Les chargeuses permettent un chargement en masse et des déplacements fréquents et rapides. Les pelles seront préférées pour leur capacité de tri et de travaux en toutes circonstances (terrains humides, terrassements...), leur coût sera moindre pour des rendements équivalents

Exploitation en découverte

La découverte commence par une tranchée ouverte dans le recouvrement stérile sur toute la largeur du panneau à exploiter jusqu'au toit de la minéralisation puis elle est élargie progressivement vers les extrémités du panneau (front de découverte, Figure 5). L'exploitation du minerai se fait de la même façon, à partir d'une tranche initiale qui progresse parallèlement à la découverte (front d'exploitation), les stériles étant généralement remis en place au fur et à mesure pour combler l'excavation (front de remblayage).

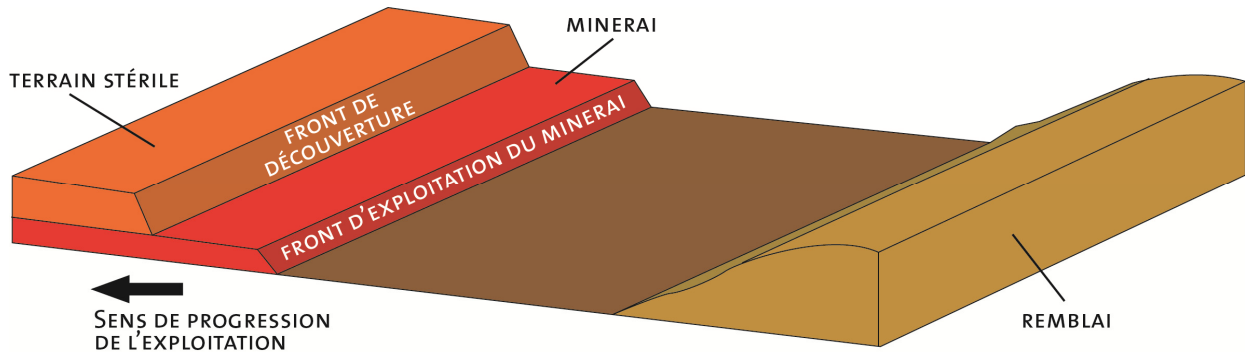


Figure 5 : Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en découverte (Source : <http://ticri.univ-lorraine.fr>).

Exploitation en fosse

La découverte porte alors sur tout le volume du cône qui constitue la fosse. Tous les matériaux stériles sont évacués hors de la fosse et stockés (pour remblayage éventuel du trou, Figure 6). Cette méthode est réservée aux filons, aux couches fortement pentées et aux amas. Le taux de découverte s'accroît très vite avec la profondeur, ce qui limite l'intérêt économique de la méthode.

En zone plane, cette fosse correspond à une excavation fermée plus ou moins évasée vers le haut dont les dimensions peuvent être importantes (hectométriques à kilométriques). En zone montagneuse, la fosse est généralement creusée à flanc de coteau et ouverte sur une de ses faces.

La fosse s'étage selon une succession de gradins et de banquettes dont la pente assure la stabilité locale et globale de l'excavation (30° à 75° , selon la nature des roches). Le maintien d'une pente régulière demeure complexe puisque les massifs rocheux traversés sont souvent hétérogènes et fracturés.

Le choix de la méthode à ciel ouvert porte sur :

- l'extension de la fosse (hauteur ou profondeur, longueur et largeur) ;
- la géométrie des flancs en gradins plus ou moins hauts et pentés et banquettes plus ou moins larges, afin de limiter le volume de stériles et d'assurer la stabilité des pentes (éviter les flancs trop pentus favorables aux ruptures).

Généralement, on différencie les fosses creusées au sein de massif de roches dures de celles creusées au sein de massif de roches tendres ou de terrains meubles. Les pentes de ces fosses ne sont pas les mêmes, le maintien d'une pente régulière dans un massif rocheux demeure complexe compte tenu de leur hétérogénéité et de leur fracturation, les massifs meubles sont relativement plus sensibles à une mauvaise gestion des eaux.

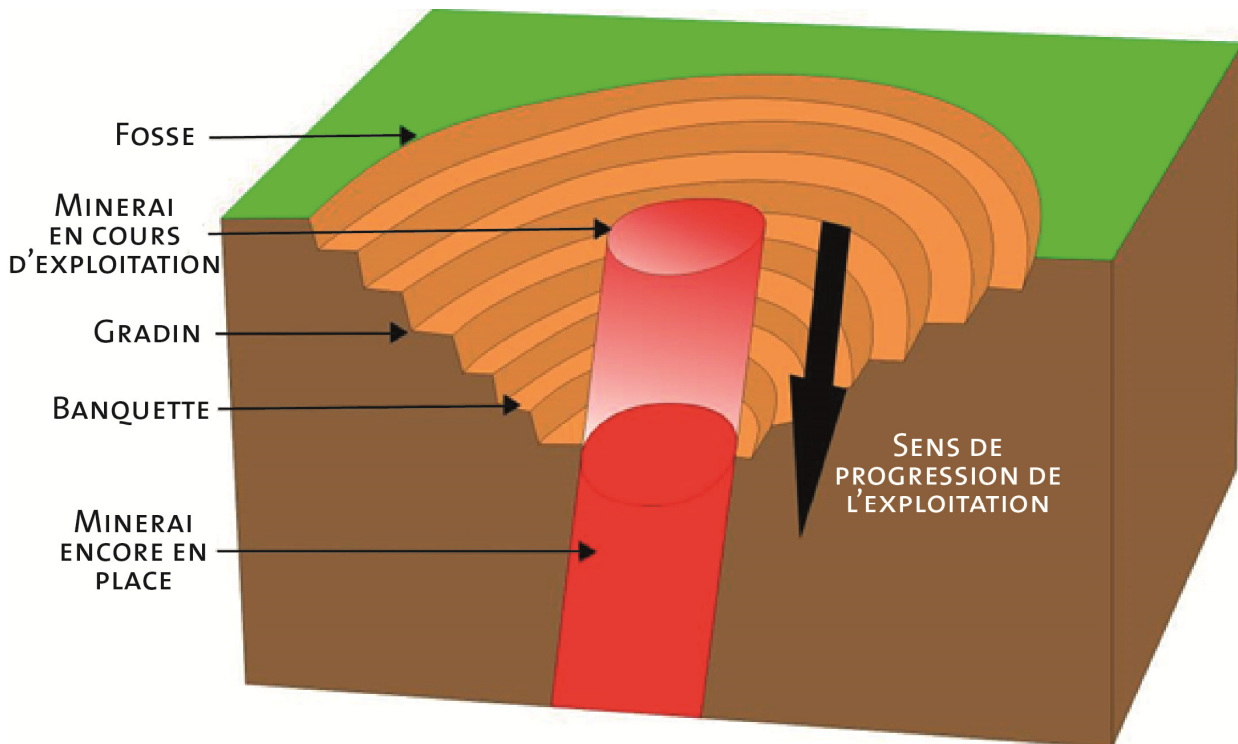


Figure 6 : Schéma d'une exploitation à ciel ouvert en fosse (Source : <http://ticri.univ-lorraine.fr>).

1.2. 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, en souterrain, sans avoir à enlever l'intégralité des matériaux stériles qui le surmontent. Pour une exploitation souterraine, une quantité minimale de morts-terrains est donc enlevée pour accéder au gisement, elle correspond aux travaux d'ossature (ex. 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. Bien que chaque mine soit un cas particulier, toutes ont en commun la recherche de la rentabilité et de la sécurité à travers un ensemble de techniques pour procéder à l'abattage du minerai dans le respect de l'environnement. Comme précédemment, le choix entre les différentes techniques d'exploitation souterraine est conditionné principalement par la géologie au sens large et notamment par :

- Géométrie du corps minéralisé (couche, amas, filon, subhorizontal, subvertical, épais, mince, profondeur) ;
- Compétence du minerai (friable, résistant) ;
- Nature de l'encaissant et sa délimitation avec le minerai (épontes franches avec coupe argileuse, éponte diffuses) ;
- Fracturation.

En complément, l'occupation de la surface et la géographie du site, le savoir-faire de l'exploitant (ou l'historique minier du site) et les objectifs économiques peuvent également intervenir dans le choix de la méthode d'exploitation souterraine.

On distingue classiquement, selon le type de traitement de zones excavées après exploitation :

- Méthodes d'exploitation souterraine laissant des vides résiduels ;
- Méthodes visant à supprimer les vides résiduels après exploitation, soit par remblayage, soit par foudroyage (éboulement de roches, épontes et recouvrement au sein de la cavité).

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 ;
- Purge : il s'agit de sécuriser le site après les tirs afin de faciliter les étapes suivantes (via des pinces à purger notamment) ;
- 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).

Méthodes conservant des vides résiduels après exploitation

Plusieurs méthodes peuvent être rattachées à cette famille, notamment celles :

- par chambres et piliers abandonnés ;
- par chambres-magasins (vides) ;
- par sous-niveaux abattus.

Une des méthodes les plus emblématiques de cette famille est celle des chambres et piliers abandonnés, elle est décrite ci-après. Le descriptif des autres méthodes est renvoyé en annexe.

L'exploitation par chambres et piliers (« *room and pillar* » en anglais) (Figure 7) s'applique pour tous les types de gisements mais principalement aux formations d'origine sédimentaire (ex. potasse, sel, fer, bauxite), dont le pendage ne dépasse pas une vingtaine de degrés. L'abattage du minerai se fait le plus souvent par foration puis tirs de mine pour fragmenter et ébouler la partie qui va être extraite (Figure 8). Des vides (ou chambres) sont ainsi créés et séparés par des piliers de minerai laissés en place qui supportent, au moins temporairement, le poids des terrains sus-jacents et assurent la stabilité globale de la mine. Les chambres servent ensuite de voies de roulage pour le transport du minerai par camions ou par bande transporteuse. La mécanisation est très importante dans ce type d'exploitation et les volumes créés permettent l'utilisation d'engins de chantier classiques (camions à benne basculante, jumbos, chargeuses). Dans le cas de galeries de faible hauteur (3 m), des chargeuses et des camions spécialement adaptés seront utilisés. Le taux de défruitement (rapport entre la quantité de minerai laissée en place et celle extraite) d'une exploitation par chambres et piliers varie généralement entre 40 et 75% mais reste dépendant de la compétence du minerai vis-à-vis de la profondeur : le taux diminuant lorsque le minerai est peu résistant (piliers plus importants) et/ou lorsque la mine s'approfondit. En outre, le toit des chambres et des galeries peut être boulonné si la stabilité locale n'est pas assurée.

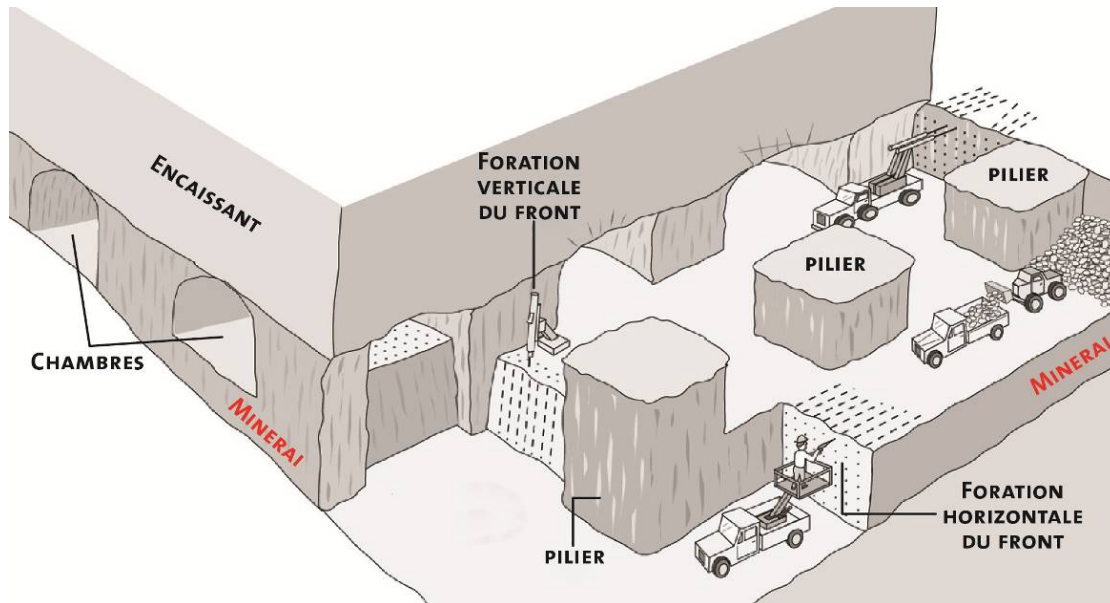


Figure 7 : La technique d'exploitation par chambres et piliers (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).

Le dimensionnement des ouvrages souterrains (piliers notamment) est essentiel (Cf. annexe 2).

Dans le cas de piliers instables (fracturation, vieillissement, effet de l'eau, etc.) leur renforcement, par remblayage des chambres notamment, est parfois nécessaire pour remédier à cet impact. Une autre solution consistant à détruire les piliers (foudroyage) est parfois envisagée selon les cas d'occupation de la surface.

En France, la mine de sel de Varangéville est actuellement exploitée en partie selon la méthode des chambres et piliers abandonnés (Figure 8).



Figure 8 : Foration horizontale dans la mine de sel de Varangéville exploitée en chambres et piliers, en France (Cliché : Comité des Salines de France).

Méthodes supprimant les vides résiduels après exploitation souterraine

Plusieurs méthodes peuvent être rattachées à cette famille, notamment celles :

- par chambres remblayées et piliers abandonnés ;
- par chambres et piliers foudroyés ;
- par chambres-magasins remblayées ;
- par tranches montantes remblayées ;
- par sous-niveaux foudroyés ;
- par blocs foudroyés ;
- par tailles.

Seule la méthode par tranches montantes remblayées sera détaillée ici, les autres sont décrites en annexe 1.

L'extraction par tranches montantes remblayées (« *cut and fill* » en anglais, Figure 9) est particulièrement adaptée à l'exploitation des filons de faible puissance et à fort pendage, encaissés dans un massif rocheux stable. Le minerai est abattu et déblayé par tranches horizontales, prises en montant. Cette technique permet généralement une bonne sélectivité du minerai et un excellent taux de récupération. Les vides sont remblayés progressivement (avec les stériles des galeries d'ossature ou résidus de l'unité de traitement) pour permettre d'élaborer un plancher de travail à la tranche suivante. L'abattage du minerai peut se faire par :

- Gradins renversés : les vides sont remblayés avec des matériaux secs ou humides. Le minerai est abattu en montant, par tranches de 3 à 4 m d'épaisseur et par des trous de mine verticaux forés à l'aide de perforatrices montées sur chariot ;
- Abattage du front : les vides sont remblayés avec du sable, de façon quasi complète, le sable formant une surface suffisamment dure pour la circulation des engins sur pneus à la tranche suivante. L'exploitation est entièrement mécanisée, avec forage par jumbos et déblocage par chargeuses.

L'ancienne mine de zinc et germanium de Saint-Salvy (Tarn) a été exploitée en utilisant deux techniques d'extraction par tranches remblayées et par tranches descendantes sous dalle.

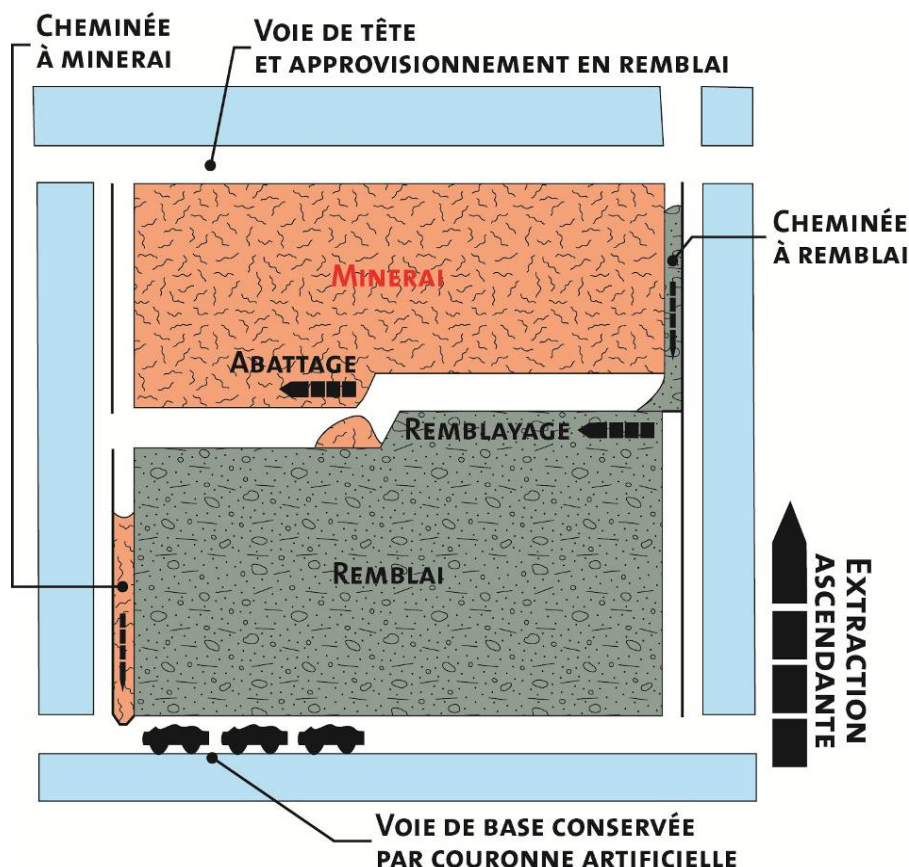


Figure 9 : Technique d'exploitation par tranches montantes remblayées (Source : BRGM).

1.3. L'EXPLOITATION PAR DISSOLUTION

Cette technique est spécifique aux minerais solubles et concerne donc particulièrement les exploitations de sel gemme (notamment en France). Actuellement, les exploitations actives de ce type se situent notamment en Lorraine, en Rhône-Alpes et en Provence

Le principe consiste en la création d'un ou plusieurs conduits artificiels (puits ou sondages) à travers les terrains de recouvrement jusqu'au niveau de sel à exploiter (Figure 10). De l'eau douce est injectée à travers ces conduits. Au contact de l'eau, le sel se dissout puis il est extrait vers la surface, sous la forme de mélange aqueux saturé en sel dissout (saumure). La dissolution du gisement crée une, ou un ensemble de, cavité(s) dont la forme, les dimensions et le devenir sont dépendants de la méthode d'exploitation mise en œuvre. Selon la nature et la profondeur du gisement, on retiendra les caractéristiques d'exploitation suivantes :

- Gisements profonds

Lorsque le gisement à dissoudre est situé à grande profondeur, de l'ordre de 1000 m et jusqu'à plus de 2000 m, la méthode mise en œuvre consiste à dissoudre le sel à partir d'un sondage isolé. L'extension et la forme de la cavité créée sont liées aux paramètres d'injection d'eau douce et de pompage de la saumure (positions et débits) et à la mise en œuvre d'un matelas inerte au sommet de la cavité (en général de l'air ou de l'azote, voire du fuel) pour contrôler et limiter l'extension verticale de la dissolution (Figure 10). Une garde ou planche de sel d'épaisseur suffisante est maintenue au toit de la cavité pour en assurer sa stabilité. Ces

opérations peuvent être répétées à partir de plusieurs sondages pour créer un champ de cavités isolées les unes des autres.

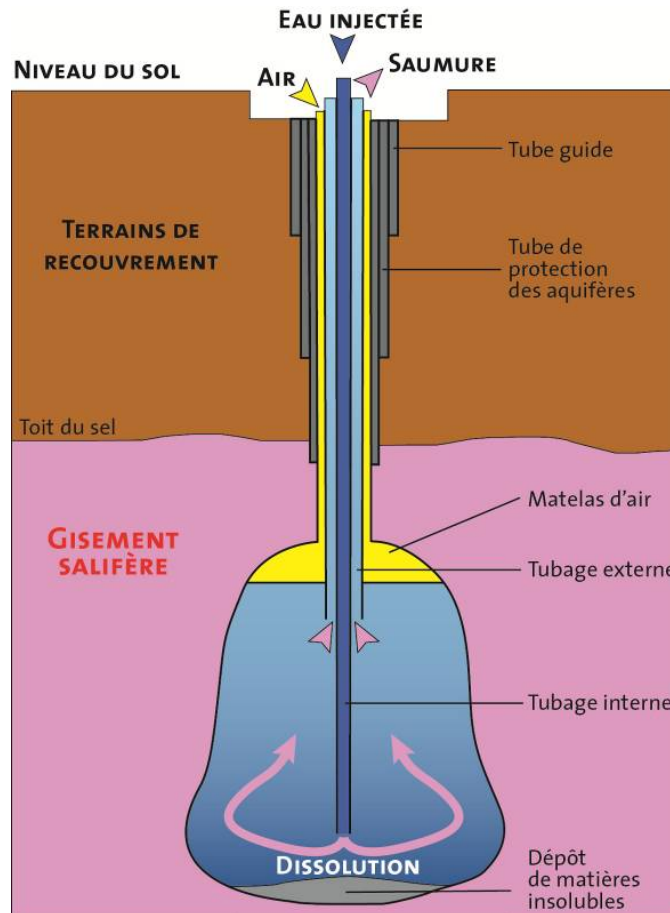


Figure 10 : Exemple de technique d'exploitation du sel par dissolution in situ par forage isolé (Source : modifié d'après CSME).

À signaler que cette méthode pour les gisements profonds de sel gemme est utilisée pour l'exploitation de la substance elle-même mais aussi, à des fins, dans un second temps, de stockage de produits pétroliers (ex. gaz naturel) dans les cavités créées.

- Gisements peu profonds

L'exploitation des gisements peu profonds de sel gemme a été réalisée dans de nombreuses régions françaises (Franche-Comté, Aquitaine, Lorraine) et reste toujours très active dans le bassin salifère de Dombasle, près de Nancy. Actuellement, parmi les méthodes modernes d'exploitation par dissolution des gisements à faible profondeur (de l'ordre ou inférieur à 200-300 m de profondeur), on distingue :

- Les méthodes extensives

Il s'agit d'exploiter partiellement le gisement à partir de sa base (mur) ou dans la masse à partir d'un ou plusieurs sondages avec pour objectif de créer des cavités stables (Figure 11).

La méthode mise en œuvre pour la création de cavités isolées est globalement identique à celle déployée pour les gisements profonds.

Pour les cavités connectées, leur mise en communication s'effectue par dissolution latérale en imposant un plan d'air en partie haute des vides créés. Une fois cette communication réalisée, l'eau douce est injectée à partir d'un sondage afin d'agrandir la cavité et la saumure saturée pompée à partir d'un autre sondage (Figure 11).

Pour ces méthodes, une garde de sel d'épaisseur suffisante doit être maintenue pour assurer la stabilité et l'étanchéité des cavités sur le long-terme.

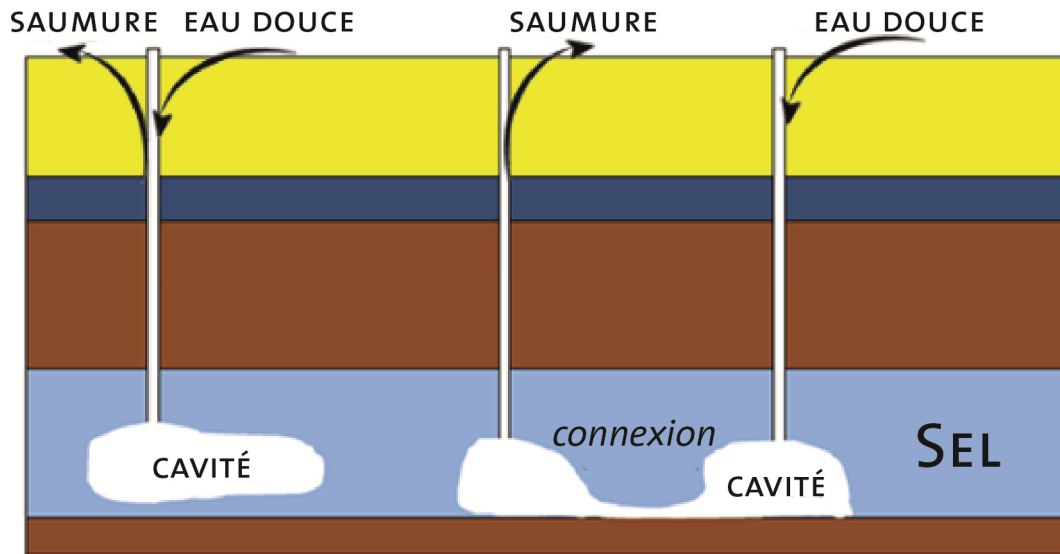


Figure 11 : Méthodes extensives en gisements peu profonds (< 300 m) (Source : INERIS).

- La méthode intensive

Cette méthode est qualifiée d'intensive car elle vise au défrèvement total du gisement du mur au toit. La conséquence est une fermeture de la cavité par éboulement, créant en surface des mouvements de terrains de type affaissement ou effondrement. La méthode mise en œuvre est dénommée « piste et sondages » car elle consiste à exploiter le gisement de sel par dissolution selon un alignement (piste) de sondages foncés jusqu'au mur du gisement. L'exploitation se décompose en trois phases successives (Figure 12) :

- la phase de foration : elle consiste à créer la piste constituée de l'alignement des sondages forés jusqu'au mur du gisement ;
- la phase de formation : il s'agit de connecter par dissolution la base de chaque sondage et de créer ainsi un chenal de communication reliant tous les sondages. À ce stade, la dissolution est stoppée verticalement par l'imposition d'un plan d'air ;
- une fois le chenal créé, la piste peut être mise en exploitation. De l'eau douce est injectée dans les sondages situés à une extrémité de la piste et la saumure est extraite par des sondages extracteurs à l'autre extrémité. La dissolution progresse selon l'alignement de la piste et sur la totalité de l'épaisseur du gisement. Lorsque toute l'épaisseur du gisement est dissoute, les cavités créées deviennent instables et

s'écroulent occasionnant en surface des affaissements ou alors des effondrements selon la nature des terrains de recouvrement et la dimension des cavités créées.

Cette technique impose de disposer de la maîtrise foncière des terrains à l'aplomb des zones exploitées.

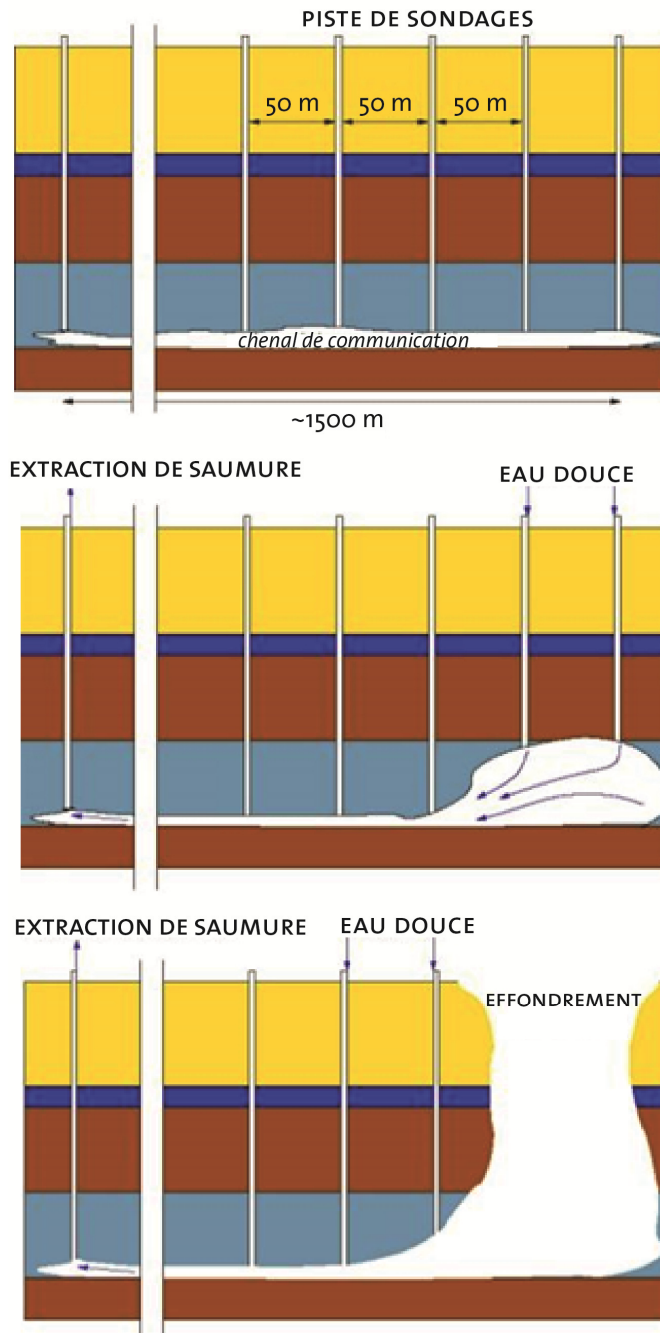


Figure 12 : Méthode intensive – piste et sondages (Source : INERIS).

1.4. L'EXPLOITATION PAR LIXIVIATION *IN-SITU*

Cette technique (« *in situ leaching* » en anglais) permet d'exploiter des gisements à basse teneur minérale, stratiformes, encaissés dans des horizons gréseux perméables et encadrés par des horizons très peu ou pas perméables (ex. grès rouges à cuivre ou « *red-beds* »). A l'aide d'une série de puits injecteurs et producteurs, une circulation de solution lixiviante (souvent de l'acide sulfurique ou du carbonate de soude) est établie, permettant l'attaque du minerai (Figure 13). La solution est, par la suite, récupérée pour la phase de traitement. Le principal avantage de cette technique est de pouvoir récupérer des métaux ou minerais de valeur sans avoir recours aux techniques minières traditionnelles impliquant : explosions, découverte coûteuse ou infrastructures souterraines. Cette technique a donc une faible empreinte en surface et ne crée aucune versée à stérile. Toutefois elle présente un risque de contamination des eaux souterraines. Aucune mine en France n'a eu recours à cette méthode et sa mise en œuvre future n'est pas envisagée.

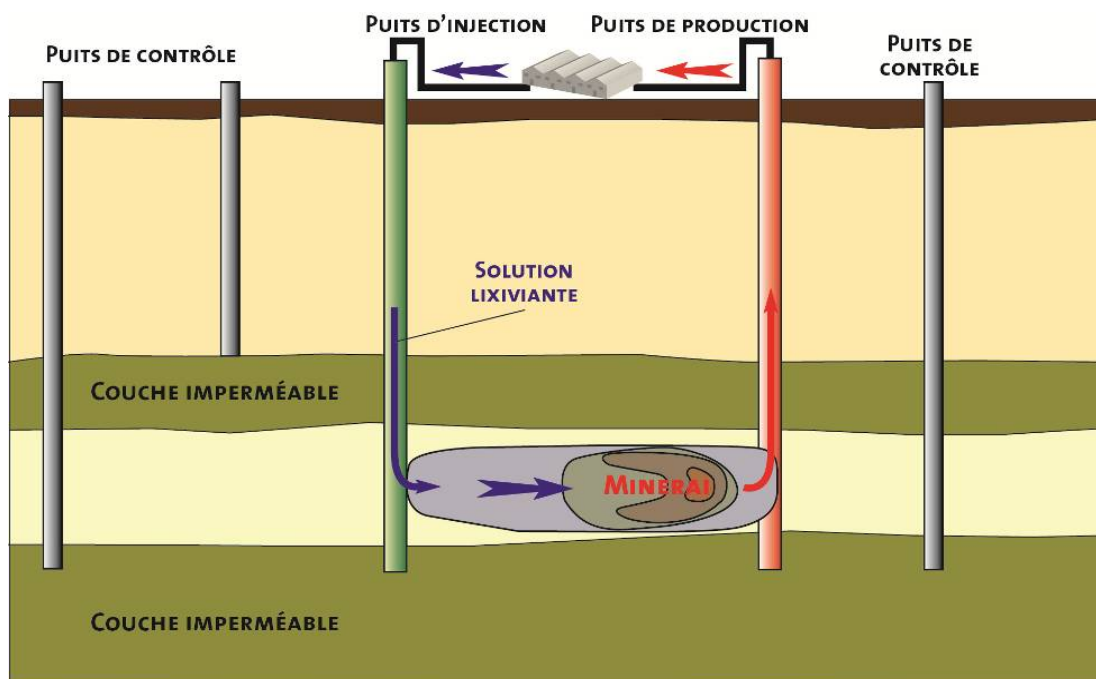


Figure 13 : Technique d'exploitation par lixiviation *in situ* (Source : BRGM).

1.5. AUTRES METHODES

Les compagnies minières et les bureaux d'études cherchent continuellement de nouvelles méthodes d'exploitation minimisant leurs impacts et augmentant les taux de récupération. Il ne faut donc pas considérer les descriptions précédentes comme une liste figée, elles reflètent l'état de l'art actuel sans préjuger des découvertes et avancées scientifiques futures.

1.6. LES ACTIVITES CONNEXES A L'EXPLOITATION MINIERE

Les techniques d'aérage

À l'exception de situation très particulière, la problématique d'aérage ne concerne que les exploitations souterraines dans lesquelles l'atmosphère est confinée et fortement exposée à l'influence des conditions locales du massif rocheux (gaz, température, humidité...) et de

l'exploitation elle-même (émission de chaleur, gaz, vapeurs...). Notons néanmoins qu'il y a des latitudes où l'inversion de température provoque l'accumulation de gaz en MCO. En phase d'exploitation, il y a nécessité d'évacuer ces gaz et donc d'aérer les chantiers pour permettre le travail des mineurs dans de bonnes conditions :

- assurer la qualité convenable de la composition de l'atmosphère au sein de la mine, en termes de teneur en oxygène et de dilution de gaz nocifs ;
- assurer les conditions climatiques suffisantes, en termes de température et d'humidité.

Par ailleurs, les techniques et les moyens d'aérage mis en œuvre doivent prendre en compte la lutte contre les poussières émises par l'exploitation.

Globalement, les mélanges gazeux présents dans les exploitations minières peuvent avoir deux origines :

- une origine endogène : il s'agit de gaz contenus dans le gisement et/ou dans les roches encaissantes avant l'exploitation. Il s'agit classiquement du méthane, de ses homologues supérieurs, du dioxyde de carbone, du radon et bien plus rarement d'autres gaz (azote, hydrogène, argon, sulfure d'hydrogène, etc.). La composition de ces mélanges gazeux est liée à la nature et à l'environnement géologique des matériaux extraits. Par exemple, on s'attendra à la présence de CH₄ et de CO₂ dans les gisements de potasse et de sel ou dans les exploitations avec des encaissants comportant des composés hydrocarbonés tandis que les atmosphères de mines métalliques présenteront plutôt un appauvrissement en oxygène avec la production éventuelle de certains gaz nocifs (CO₂, H₂S, etc.). Ces gaz se libèrent continuellement en cours de l'exploitation, par un mécanisme de détente, et migrent vers l'atmosphère des travaux souterrains ;
- une origine exogène : ce sont des gaz produits par des réactions chimiques spécifiques, pendant l'activité minière. Il s'agit le plus souvent de :
 - o monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène libérés suite à la perturbation de l'équilibre géochimique initial provoquée par l'exploitation (ventilation, fracturation du massif rocheux, modifications hydrologiques, etc.). Ainsi du monoxyde de carbone est produit par l'oxydation de certains minerais et du sulfure d'hydrogène est produit par décomposition de matières contenant du soufre comme les bois de soutènement ;
 - o gaz divers liés à l'utilisation des explosifs et des engins à moteurs à combustion.

Par le passé, dans les mines peu profondes et peu étendues, un aérage naturel pouvait suffire. Aujourd'hui, cet aérage est systématiquement mécanisé. Sans entrer dans les détails, le principe général est d'amener de l'air frais en quantité suffisante vers toutes les parties de la mine restant en activité et d'évacuer l'air usé vers la surface. La ventilation de la mine est classiquement réalisée grâce :

- à un aérage principal qui assure l'introduction en continu de l'air atmosphérique et le refoulement de l'air usé vers la surface via les ouvrages (puits) de retour. La circulation d'air est assurée par des ventilateurs principaux de puissance et débit variables installés sur les ouvrages d'entrée ou de retour. L'aérage principal est le plus souvent aspirant, plus rarement soufflant (Figure 14) ;

- à un aérage secondaire qui récupère de l'air frais dans les circuits d'aérage principal et assure une ventilation locale dans des endroits spécifiques (ex. ouvrages borgnes). Il est réalisé au moyen des ventilateurs secondaires et des gaines de circulations (ou ventubes).



Figure 14 : Ventilateurs principaux couplés en carrière souterraine, Isère (Source : INERIS, SAMIN).

Les principaux facteurs permettant de dimensionner l'aérage sont connus des spécialistes, notamment :

- Géométrie du réseau minier ;
- Méthode d'exploitation minière et mode d'abattage (par explosifs ou mécanisé) ;
- Nature et volumes des gaz présents (caractérisation minéralogique et Géochimique du gisement et des roches encaissantes) ;
- Nombre de personnes en poste.

Ces facteurs varient d'une mine à l'autre et parfois même d'un quartier d'une même mine à l'autre, il est donc illusoire d'imaginer dupliquer un réseau d'aérage d'un site à l'autre.

A noter que dans le cas de certaines mines profondes, l'aérage seul peut s'avérer insuffisant pour assurer des conditions climatiques adaptées (température, humidité, etc.). Il sera nécessaire dans ce cas de faire appel à des techniques de climatisation.

La mise en œuvre de l'exhaure

En souterrain, du fait de l'extension considérable des galeries minières, qui peut atteindre plusieurs centaines ou milliers de kilomètres pour une seule mine, le potentiel de drainage est très important, même en terrain peu aquifère (Figure 15). Ainsi, pour que les travaux souterrains soient maintenus hors d'eau et que les travaux d'exploitation puissent être réalisés, il est le plus souvent nécessaire d'évacuer l'eau souterraine soit directement dans la

mine, soit à ses alentours immédiats. Si par le passé, cette évacuation (ou exhaure) pouvait être réalisée gravitairement, elle est le plus souvent aujourd'hui mécanisée et nécessite l'emploi d'une ou plusieurs pompes.

À ciel ouvert, l'accumulation des eaux dans les fosses est principalement due à l'extension de la mine qui crée un réservoir d'accumulation préférentiel des eaux de pluie (Figure 16). Une fosse peut également recouper des sources et des aquifères souterrains. Comme pour le souterrain, l'exploitation à ciel ouvert peut nécessiter la mise en œuvre d'une exhaure. Dans ce cas, divers pompes, conduites et bassins sont créés pour gérer ces eaux.

Ces eaux peuvent générer des volumes importants qui ne peuvent pas être stockés « indéfiniment ». Les compagnies minières mettent en place des solutions de traitement, actives ou passives, qui permettent de vérifier et de rendre ces eaux compatibles avec les usages des eaux souterraines et superficielles à proximité. In fine les eaux d'exhaure sont ensuite restituées à l'environnement via le réseau hydrographique de surface.

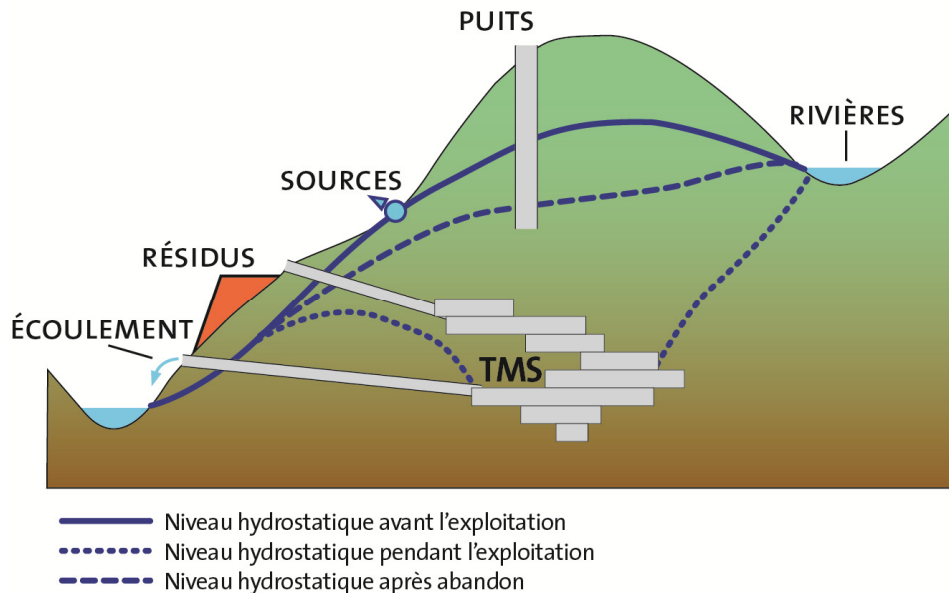


Figure 15 : Impact de travaux miniers souterrains sur l'hydrodynamique (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).

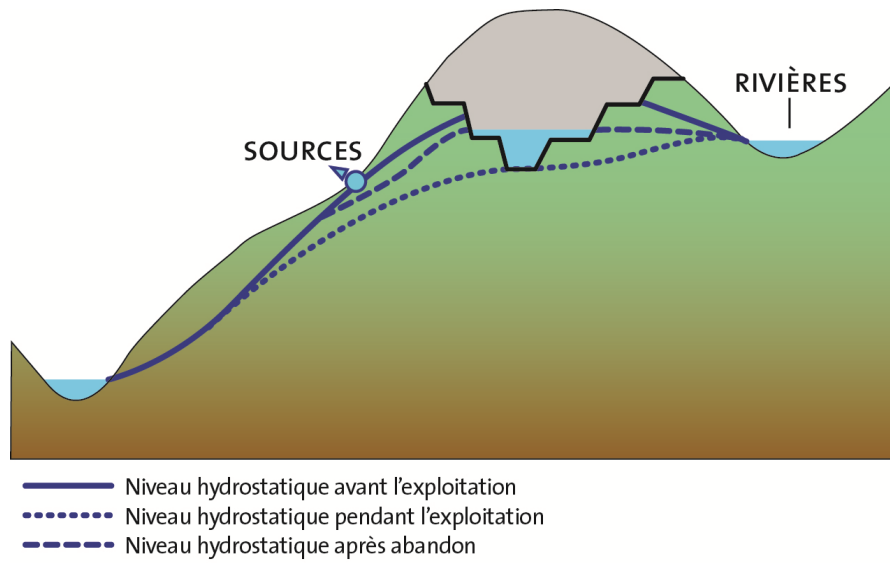


Figure 16 : Impact de travaux à ciel ouvert sur l'hydrodynamique (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).

La gestion des stériles miniers

Cf. paragraphe 2.4.

2. Le traitement des minerais

Si des roches ont été extraites dans le cas d'une exploitation minière, c'est pour leur richesse en minerais valorisables. Cependant, même à des concentrations intéressantes, les minerais ont rarement une pureté suffisante pour pouvoir être transformés directement en produits finis (souvent de type métaux). Il est donc nécessaire de modifier l'état du minerai extrait. Le passage de la mine au métal peut se décomposer en deux grandes étapes :

- 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 ;
- Métallurgie (« *metallurgy* » en anglais) regroupe quant à elle l'ensemble, des procédés et techniques d'extraction, d'élaboration, de mise en forme et de traitement des métaux et de leurs alliages à partir du minerai concentré.

À noter qu'en anglais la terminologie « *extractive metallurgy* » regroupe les 2 étapes. La frontière entre la minéralurgie (*mineral processing*) et la métallurgie (*metallurgy*) est parfois moins marquée.

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 17). Le traitement du minerai suit un schéma de procédé (« *flow sheet* » en anglais) bien défini et spécifique pour chaque type de minerai, faisant souvent l'objet d'une forte concurrence entre les entreprises du secteur (Figure 18 et Figure 19). Ces procédures de traitement sont la base du savoir-faire de chaque compagnie minière et industrielle.



Figure 17 : Usine de traitement de la mine d'or de Kittila, en Finlande (Source : www.agnicoeagle.com).

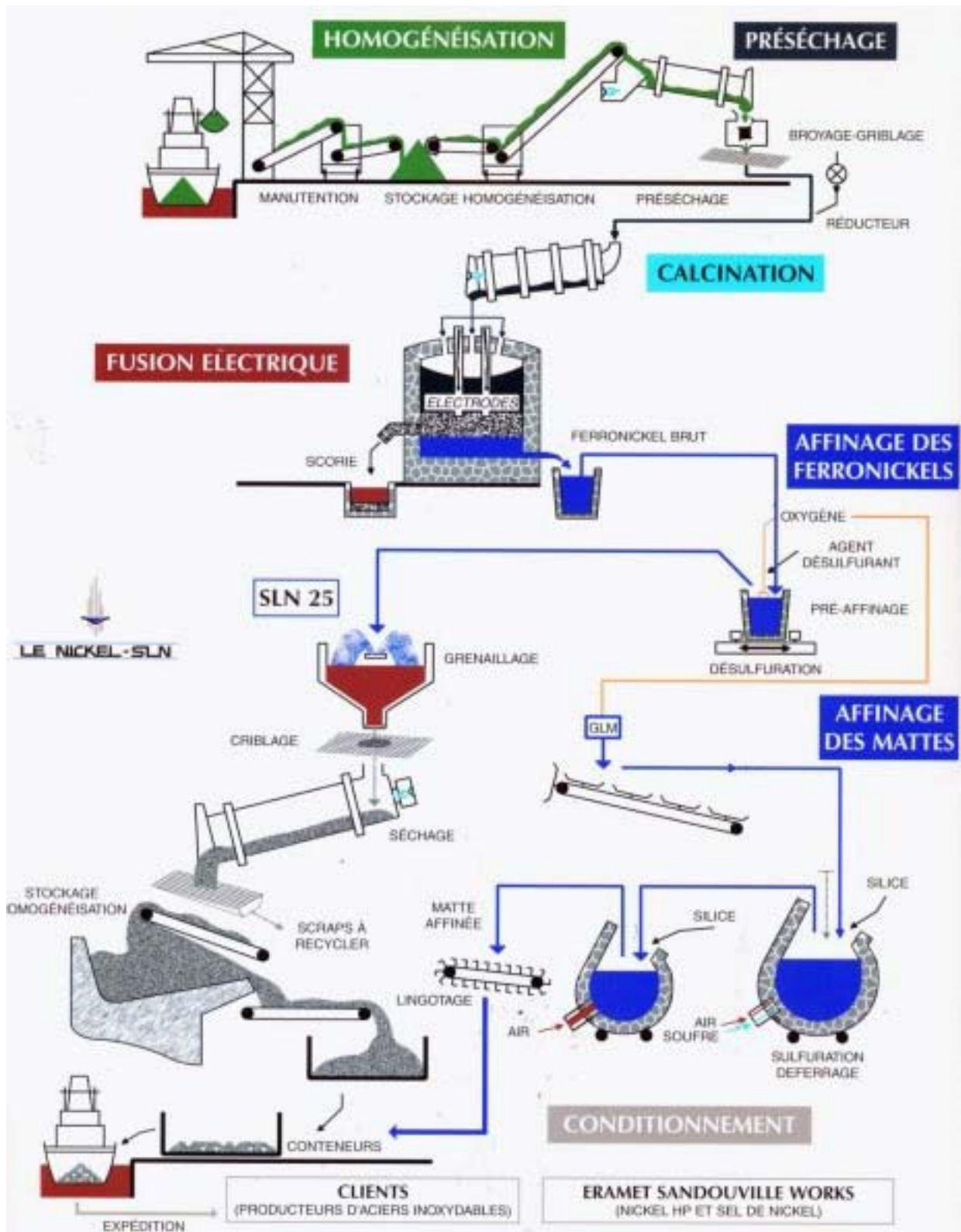
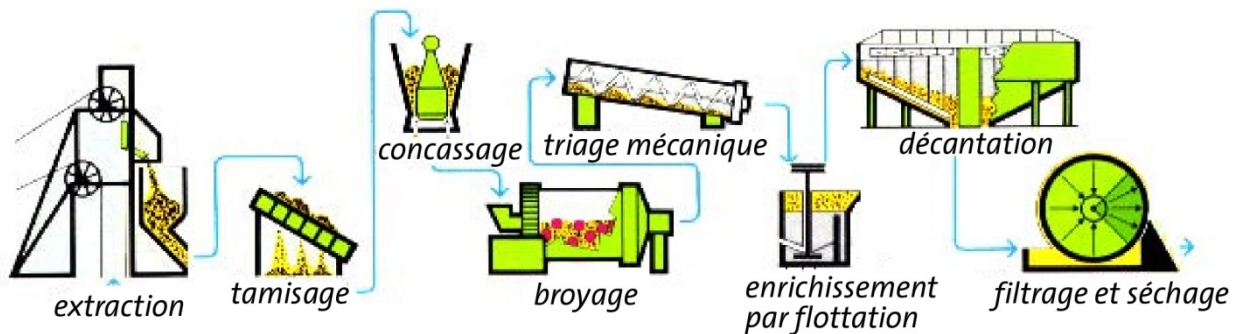


Figure 18 : Procédure du traitement du minerai de nickel (Source : SLN).

TRAITEMENT DU MINERAI



ELABORATION ET AFFINAGE

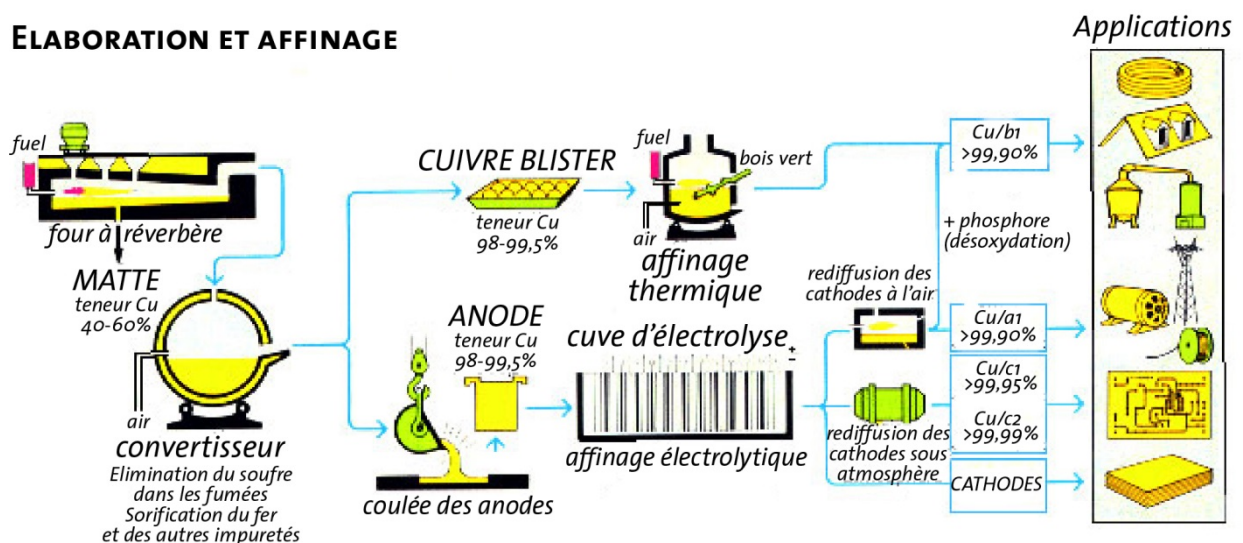


Figure 19 : Procédure du traitement du minerai de cuivre (Source : <http://copperalliance.fr/le-cuivre>).

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.).

La transformation métallurgique se divise en deux grandes solutions techniques : l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie. Elles peuvent être mises en œuvre de manière indépendante ou complémentaire.

2.1. LA COMMUNITION

La comminution est la première phase de traitement du minerai et consiste en la réduction granulométrique des matériaux extraits de la mine, à savoir le « minerai tout-venant » (« run of mine » en anglais). 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 afin d'augmenter leur surface spécifique pour améliorer les cinétiques (vitesses) de transformation des procédés hydrométallurgique et

pyrométallurgique. 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 (verticaux, agités) pour obtenir une granulométrie de l'ordre de quelques micromètres (Figure 20).

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 ».



Figure 20 : Broyeur à boulets de la mine d'or de Kittila, en Finlande (Source : www.agnicoeagle.com).

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 physico-chimiques 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 rutile, ilménite et zircon. Cette méthode s'applique particulièrement aux minéraux ferreux ;
- séparation par milieu dense : 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, etc.) ;

- Séparation par gravité : cette méthode consiste à séparer les minéraux par gravité de façon mécanique grâce à des appareils spécifiques (tables à secousse, spirales, sluices ou rampes de lavage, jigs, etc.) ;
- 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. Ce traitement est effectué :
 - soit dans des cellules mécaniques (cuves en acier équipées d'une turbine à entraînement mécanique qui disperse l'air sous forme de fines bulles et agite la boue, Figure 22) ;
 - soit dans des cellules pneumatiques généralement sous forme de colonnes de flottation (cylindres d'acier verticaux, élevés (de 9 à 15 m de haut) pouvant mesurer jusqu'à 3 m de diamètre, à la base desquels de l'air est injecté par un aérateur, la mousse chargée est ensuite récupérée en passant par-dessus le bord supérieur et la pulpe est évacuée en souverse, (Figure 21)).

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.

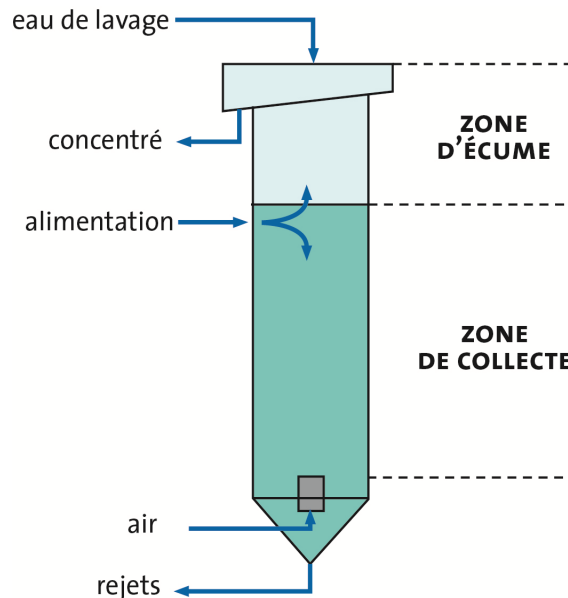


Figure 21 : Principe de fonctionnement d'une colonne de flottation (Source : Thèse F.-O. Verret, 2006).



Figure 22 : Cellules de flottation de l'ancienne usine de traitement de la mine d'or du Bourneix, Haute-Vienne (Source : BRGM).

- Lixiviation. Comme détaillée précédemment pour la méthode d'exploitation par lixiviation in-situ, la lixiviation est un processus simple d'extraction par dissolution basé sur le fait que tous les minerais ont des coefficients de dissolution différents et peuvent donc se retrouver séparés par la circulation d'un solvant. Ce principe est mondialement utilisé pour extraire l'or (le solvant étant majoritairement le cyanure), mais d'autres métaux comme le cuivre et l'uranium peuvent être extraits ainsi. Les différentes techniques mises en œuvre dépendent de la granulométrie, de la minéralogie et des teneurs des minerais :
 - Lixiviation en colonnes ou en cellules. Le minerai est placé dans des cuves ou des colonnes. La solution de cyanure se lixivie à travers le minerai et dissout l'or, qui est ensuite retiré de la solution lixivante par adsorption sur le carbone ou les résines. Puis, l'or métallique est généralement récupéré par électrolyse après élution du charbon ;
 - Lixiviation en tas (Figure 23). Préalablement à la lixiviation en tas, le minerai tout venant ou le minerai concassé est chargé sur des dépôts (ou tas ou pile) de 10 à 20 m de hauteur qui sont empilés sur une couche imperméable. Une solution de cyanure diluée est pulvérisée sur le tas, se lixivie à travers la pile puis dissout l'or disponible. La solution est ensuite dirigée dans un bassin. La solution de cyanure, qui est dite être « sursaturée » d'or, est ensuite pompée vers des colonnes à résine où l'or est récupéré. Une lixiviation en tas rentable offre un certain nombre d'avantages, y compris :
 - coûts de broyage réduits puisque l'or est uniquement concassé, non meulé ;
 - solution de cyanure recyclée à travers le tas, réduisant la quantité de cyanure utilisée dans l'exploitation ;
 - processus particulièrement adapté aux minerais à plus faible teneur et à ceux ayant une teneur élevée en argile ;

- Autres méthodes telles que la séparation électrostatique (propriété électrique des particules) ou le tri optique (par couleur), plus rare.



Figure 23 : Lixiviation en tas, mine de nickel en Finlande (Source : www.womp-int.com).

2.3. LA TRANSFORMATION METALLURGIQUE

Cette dernière étape consiste en la transformation de la matière première ou du concentré en produit fini, à plus haute valeur ajoutée (en comparaison des concentrés) : métaux (ex. lingots), alliages, oxydes, sels, etc. Deux principales techniques existent, elles peuvent être mises en œuvre de manière indépendante ou complémentaire :

- la pyroméallurgie, la plus ancienne. Elle consiste en un traitement thermique (grillage) pour homogénéiser la source de métal. Cette étape est combinée avec une réaction chimique d'oxydation permettant la séparation des métaux et l'affinage ;
- l'hydroméallurgie (par voie électrochimique), la plus récente (début de XX^e siècle). Elle comporte une étape où le métal est solubilisé (d'où le préfixe « hydro ») pour permettre sa purification et elle peut faire appel, en dernière étape, à l'électrolyse). Au cours de cette phase un courant électrique de forte puissance passe entre une anode et une cathode au sein d'une solution contenant l'élément à extraire. Le métal valorisable est ensuite récupéré sur l'anode ou la cathode.

D'autres étapes que l'électrolyse peuvent être ajoutées en fin du cycle d'hydroméallurgie, il s'agit d'étapes de purification avec des procédés d'échange ionique liquide ou solide (solvants ou résines).

2.4. LES MODES DE GESTION DES STERILES ET DES RESIDUS MINIERES

En mines souterraines comme à ciel ouvert, l'exploitation génère la production d'une quantité importante de roches et de terres qui ne peuvent pas directement être valorisées dans le cadre de l'exploitation du minerai concerné. En outre, le traitement du minerai produit tout au long des étapes du procédé de valorisation différents types de résidus, minéralurgiques et

métallurgiques, non valorisables dont la gestion constitue un réel défi pour les mines responsables.

Il y a donc lieu de préciser la différence entre deux types de produits non valorisables :

- les stériles d'exploitation (en général, matériaux sols ou roches grossiers). Il s'agit des terrains de recouvrement (stériles francs), d'une partie du minerai abattu jugée insuffisamment riche (stériles de sélectivité) ou un mélange des deux précédents (stériles mixtes) ;
- les résidus de traitement minier résultants des opérations de traitement (en général matériaux fins mêlés à différentes solutions aqueuses).

La gestion de ces produits constitue un enjeu majeur pour une exploitation minière responsable car ils ont été à l'origine d'accidents et de désastres environnementaux majeurs.

Stériles miniers

Les stériles miniers produits sont :

- généralement déversés et mis en dépôts « à sec » dans des verses à stériles (ou haldes ou terrils), Figure 24. La stabilité des ouvrages est assurée par le respect de l'angle de « talus naturel » de chaque matériau déposé (angle que suit le matériau naturellement lors de son déversement). Localement des remodelages de pentes peuvent être entrepris ;
- localement mêlés à des résidus de traitement minier et mis en dépôt (« *co-disposal* » en anglais). Cette technique permet d'augmenter la stabilité géotechnique et géochimique des verses à stériles ;
- utilisés, seuls ou en mélanges cimentés, pour remblayer les excavations minières ;
- réutilisés sur la mine elle-même pour enrochements divers (pistes, merlons et talus) ;
- valorisés en termes de granulats pour répondre à des demandes locales.

Les opérations de verse sont relativement simples et réalisées à l'aide d'engins de chantiers (pelles et camions) ou de bandes transporteuses. Toutefois, cette simplicité apparente de mise en œuvre ne doit pas masquer la gestion cruciale des eaux (ruissellement et infiltration) sur ces ouvrages réalisée à l'aide de drains, de canaux de dérivation, de couverture, etc.



Figure 24 : Stockages des stériles (Source : www.rgc.ca).

Remarques : Notons que les résidus de traitement pyrométallurgique, sous forme de diverses scories, sont généralement « gérés » comme des stériles miniers et non comme des résidus miniers (même s'ils sont issus d'une opération de traitement). Les cendres, du fait de leur finesse, sont plus souvent traitées comme des résidus miniers (Cf. ci-après).

Résidus miniers

Les résidus miniers sont des matériaux artificiels fins produits sous forme liquide ou de boue souvent en grande quantité. Ces résidus sont enrichis en minéraux de gangue et minéraux résiduels non économiques ainsi qu'en réactifs chimiques. Ils sont déversés sous forme liquide, boueuse ou pâteuse et doivent donc souvent être retenus derrière des digues ou déposés dans des bassins. Il est également possible de mélanger ces résidus (les parties inertes) aux stériles miniers pour constituer des ouvrages de dépôts de meilleure stabilité. Compte tenu de la forme de ces résidus (semi-liquide), leur dépôt nécessite le recours à des infrastructures plus lourdes que la mise en dépôts à sec des stériles : pompes spécifiques, dessiccateurs, réseaux de canalisations, cyclones...

En règle générale, une digue de retenue se compose de trois parties :

- une partie amont, qui est capable de retenir les résidus sans pénétration ou érosion excessive, qui est composée des résidus proprement dits (par exemple du sable compacté) ;
- une partie centrale ou cœur qui ne peut ni s'effondrer ni être bouchée par des fines (roche ou pierre à filtre concassée) ;
- une partie aval, qui assure la solidité et la stabilité du pied, qui va rester « sèche » en toutes circonstances.

Une digue peut être construite avec des matériaux externes au process minier (granulats, béton, etc.) ou avec des stériles ou de résidus miniers. Les digues de retenue de résidus miniers ne sont généralement pas construites en une fois (signifiant que l'ouvrage de retenue est terminé avant le premier versement de résidus miniers) mais par étapes (signifiant que la construction de l'ouvrage de retenue est réalisée simultanément au stockage des résidus miniers). Ce principe permet de commencer la production minière et de dégager des bénéfices pour financer les étapes suivantes de la construction de la digue. Ce principe permet également de limiter l'empreinte du site en cas d'arrêt rapide de l'activité.

Lorsqu'on envisage la construction d'une digue avec une partie des résidus miniers, celle-ci se fait par phases. La partie grossière des résidus est utilisée pour constituer le cœur de la digue tandis que les résidus plus fins sont déposés en amont de celle-ci. Pour une construction par étapes d'une digue, il existe trois méthodes principales de construction (Figure 25) :

- la méthode ascendante ou amont ;
- la méthode descendante ou aval ;
- la méthode longitudinale ou centrale.

La méthode amont est la technique de construction traditionnellement utilisée lorsque les rejets de concentrateur sont déposés à l'aide de lances à robinet (« *spigotting* ») ou avec des hydrocyclones. Cette méthode s'applique lorsque les résidus possèdent les caractéristiques géotechniques et physicochimiques nécessaires à la construction des digues, quand la région est à faible risque sismique et pour des digues de faible hauteur. La construction des digues par la méthode amont est relativement simple, ce qui expliquerait son utilisation régulière malgré les limitations qui y sont rattachées. Un inconvénient inhérent aux digues construites selon la méthode amont réside dans le fait que les petites digues construites successivement à partir de résidus miniers peuvent reposer sur des matériaux relativement fins, peu consolidés, qui ont été mis en place au cours des étapes précédentes.

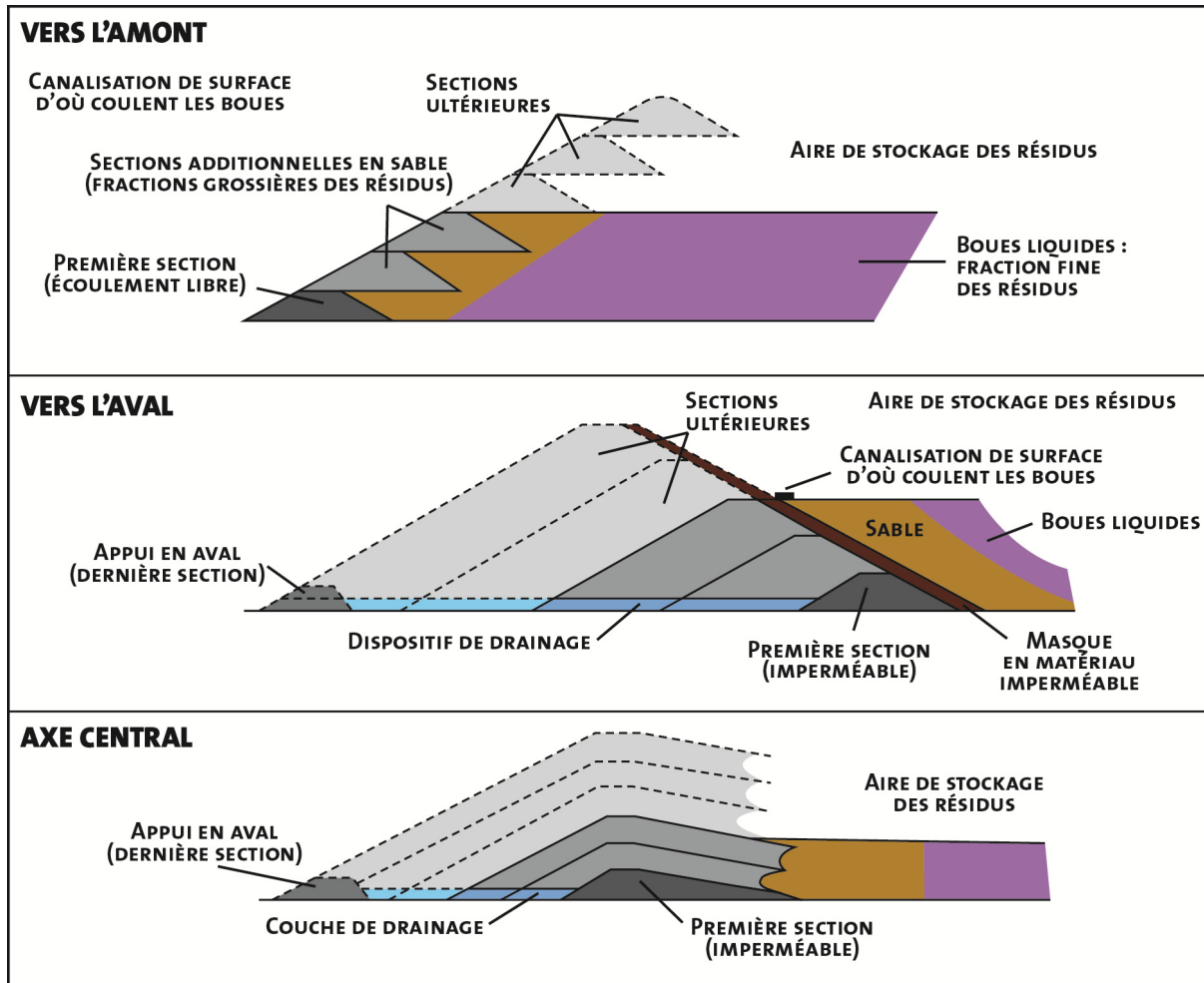


Figure 25 : Techniques de construction de digues à résidus miniers (Source : modifié d'après Aubertin et al. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers, Manuel sur CD-ROM, Presses internationales Polytechnique*).

Comme son nom l'indique, la digue de retenue en méthode aval est construite à l'aval de la digue d'amorce, généralement à partir des rejets grossiers. La crête de la digue se déplace ainsi vers l'extérieur du parc à résidus. Cette méthode engendre typiquement une meilleure stabilité que la méthode amont et elle génère, de plus, un bilan d'entreposage positif puisque le volume disponible dans le bassin augmente progressivement avec la hauteur de la digue. En revanche, un espace important est nécessaire en pied de la digue initiale.

La méthode de l'axe central représente une solution de compromis entre les deux méthodes précédentes. Il s'agit de maintenir la crête de la digue à la même position horizontale, avec une élévation qui se fait selon un axe vertical. Cette méthode confère une meilleure stabilité que la méthode amont, et elle demande moins de matériaux grossiers que la méthode aval.

3. Les impacts socio-économico-environnementaux de l'exploitation minière et du traitement des minerais

L'histoire minière est malheureusement entachée d'accidents et de désastres qui ont eu des conséquences dommageables sur l'environnement et les hommes à proximité des exploitations concernées. Il s'agit de les lister et de les analyser, afin que toute mine responsable prenne les mesures adéquates pour éviter qu'ils ne se reproduisent. Tous les impacts listés par la suite dépendent des spécificités de chaque site minier (géologie, environnement et techniques) et ne se rencontrent évidemment pas sur une même mine.

3.1. LES IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

Les retombées positives

Les phases de production minière (exploitation et traitement de minerai) sont celles qui favorisent le plus le tissu économique local et régional relativement aux autres phases de la vie d'une mine : Exploration minière (Tome 4), Développement-Financement-Construction (Tome 5) et Fermeture-Reconversion-Gestion de l'après-mine (Tome 7). En exploitation, une mine est :

- pourvoyeuse d'emplois directs et indirects. Les métiers de la mine en exploitation font appels à des compétences diverses et variées à différents niveaux (ingénieurs et techniciens) : géologue, hydrogéologue, géomètre, foreur, mineur boutefeux, mécanicien d'engins, agent de maintenance de matériels, conducteur d'engins, pilote d'installation de traitement, animateur environnement sécurité, chef ou responsable d'exploitation, etc. Un site minier est donc un site où s'expriment de très nombreuses compétences et expertises techniques et pratiques particulières mais également celles de la vie courante : mécanique, cuisine, secrétariat, ménage, etc. ;
- génératrice de bénéfices pour la compagnie minière et de retombées économiques locales dues à la présence du personnel de l'exploitation (jusqu'à une centaine de personnes en fonction de l'importance de la mine, Cf. Tome 10) qui « vit » et utilise les services des communes concernées. L'activité minière peut ainsi tripler le nombre d'emplois indirects locaux.

Les freins socio-économiques

Les éventuelles craintes des parties prenantes apparaissent souvent dès les phases initiales du projet minier : Exploration minière et Dimensionnement (Cf. Tomes 4 et 5). Néanmoins, elles se cristallisent souvent à la phase d'exploitation.

La problématique des conflits d'usage d'eau (et des sols) est généralement mise en avant par les opposants au projet minier. En effet, les pompages nécessaires à l'exploitation minière induisent un rabattement des nappes souterraines au droit et à proximité de la mine qui peut être préjudiciable à leur intégrité, au moins localement. Des assèchements de sources ou de captages sont envisageables et potentiellement dommageables relativement aux usages qui en sont fait (eau potable, agriculture ou industriel). De plus, certaines techniques de traitement du minerai sont consommatrices d'eau (la concentration et l'hydrométallurgie requièrent environ 3

m³ d'eau par tonne de minerai traité, Cf. paragraphe 3.2.2). Toutefois, ces besoins en eau ne sont pas cumulatifs, les procédés de traitement notamment développent des solutions de recyclage interne pour minimiser les consommations d'eau.

Les nuisances sonores et vibratoires (tirs de mines, circulation d'engins, etc.) sont parfois mis en avant par les opposants locaux aux exploitations mais leur ressenti n'en demeure pas moins local (ordre de grandeur kilométrique).

Enfin, de par leur emprise géographique, les projets miniers peuvent susciter des rejets marqués du projet par les populations du fait de la nature des terrains qui seront exploités (friche industrielle, exploitations agricoles, zones naturelles protégées, tourisme, etc.) et sur lesquelles des projets autres que miniers auraient pu être développés (Cf. Tome 5).

Il faut également tenir compte de la médiatisation des accidents miniers, actuels ou passés, qui peut susciter chez certaines parties prenantes des réactions hostiles au projet minier.

3.2. LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les effets sur les sols et les terrains

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. La notion de « stabilité/instabilité » ne constitue toutefois pas, en tant que telle, une contrainte insurmontable. Elle dépend étroitement des choix effectués en termes de méthode d'exploitation. Ainsi, certains chantiers sont dimensionnés pour garantir une stabilité pérenne des structures rocheuses (piliers abandonnés au sein d'exploitations dites partielles) là où d'autres sont conçus pour évoluer jusqu'à la rupture au cours du temps (tailles foudroyées au sein d'exploitations dites totales ou cavités de dissolution intensive).

Néanmoins, dans tous les cas, l'exploitant minier se doit de comprendre et de prévoir aussi finement que possible le comportement du massif rocheux en réaction aux modifications auxquelles il le soumet du fait des travaux d'extraction entrepris en son sein.

L'objectif est d'éviter toute évolution non maîtrisée du milieu pouvant contribuer au développement d'instabilités non prévues et susceptibles de mettre en danger la sécurité des mineurs, des machines, du bon fonctionnement de l'exploitation ou l'intégrité des terrains de surface et des infrastructures ou enjeux qui y sont présents. Les principaux modes de rupture des massifs rocheux sont connus des spécialistes (compression, traction, cisaillement, flexion, écaillage, etc.). Les experts géotechniciens se basent sur une caractérisation amont précise (sondages, essais de laboratoires, modélisations, etc.) des massifs objets de l'exploitation afin de déterminer les cas d'instabilité envisageable et de proposer des dimensionnements permettant de les minorer. Ces études n'en demeurent pas moins basées sur des hypothèses géologiques et géotechniques qu'il convient d'intégrer aux différents calculs (Cf. annexe 2).

Les modes de rupture varient d'une mine à l'autre et parfois même d'un quartier d'une même mine à l'autre. Ils dépendent, entre autres paramètres, de la nature et du comportement des roches concernées, de la géométrie des travaux, des paramètres environnementaux (présence d'eau, de failles, variations de température, etc.) ainsi que de la présence éventuelle d'exploitations préexistantes.

On différencie classiquement la notion de stabilité en deux concepts distincts :

- l'instabilité locale ;
- l'instabilité globale.

Dans certaines configurations spécifiques, un troisième concept peut être introduit pour tenir compte des spécificités du phénomène dynamique de type « coups de terrain » (ou *rockburst* en anglais), Cf. annexe 2.

▪ Les instabilités locales

Il s'agit de phénomènes corrélés à des désordres géotechniques d'extension limitée localisés au sein de zone de travail particulière :

- chutes de blocs au toit d'une galerie (Figure 26) ;
- écaillage ou fissuration d'un pilier ;
- ravinements superficiels sur une verse de stériles ;
- détachements de blocs en front de mine à ciel ouvert, etc.

La stabilité locale concerne donc essentiellement la sécurité immédiate des mineurs et relève principalement du dimensionnement adéquat des chantiers (largeur, hauteur, formes, etc.) ainsi que du choix approprié des méthodes de soutènement des terrains (boulonnage, grillage, béton projeté, remblayage...). Ces phénomènes pourront être traités par des mesures « légères » mises en œuvre par l'exploitant (complément de soutènement, armement de pilier, etc.).

Ces phénomènes n'ont généralement aucune conséquence dommageable sur les terrains extérieurs à l'exploitation minière puisqu'ils sont rapidement traités et stoppés par l'exploitant avant toute extension.



Figure 26 : Chutes de toit (instabilité locale), Mine de calcaires asphaltique, Gard (Source : INERIS).

▪ Les instabilités globales

Il s'agit de phénomènes d'ampleur qui concernent tout ou partie d'une exploitation minière :

- Phénomènes « visés » par l'exploitation :

- Affaissement minier suite à l'exploitation totale d'une mine souterraine (par tailles ou par chambres et piliers foudroyés) ;
- Affaissements ou effondrements suite à la mise en œuvre d'une méthode de dissolution intensive et à l'effondrement généralisé de la cavité de dissolution ;
- Cratère suite à une exploitation de type *Block Caving* (Cf. annexe 1) ;
- Phénomènes accidentels :
 - glissement profond sur les flancs de découvertes ou de zones de dépôts ;
 - effondrement généralisé et brutal au sein d'une exploitation souterraine par chambres et piliers abandonnés ou par chambres magasins vides.

Dans le cas de phénomènes accidentels, ces événements peuvent mettre en péril, en plus de la sécurité immédiate des mineurs, l'intégrité des terrains de surface, la sécurité des enjeux de surface à proximité et également condamner tout ou partie du gisement exploitable. Ces phénomènes, une fois initiés, ne sont généralement pas maîtrisables. Cette stabilité relève principalement d'un choix adapté de la nature et du dimensionnement de la méthode d'exploitation globale, en tenant compte :

- de la résistance des terrains et des contraintes qui s'appliquent en leur sein ;
- des incertitudes sur ces facteurs au travers de la définition de facteurs de sécurité adaptés (Cf. annexes 1 et 2).

Les phénomènes globaux « visés » par la méthode d'exploitation ne sont généralement pas dommageables pour la sécurité des mineurs ni pour les enjeux vulnérables de surface, car la rupture est prévue et planifiée.

- L'affaissement minier : se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction ou de la disparition (dissolution, combustion) de minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette (Figure 27).

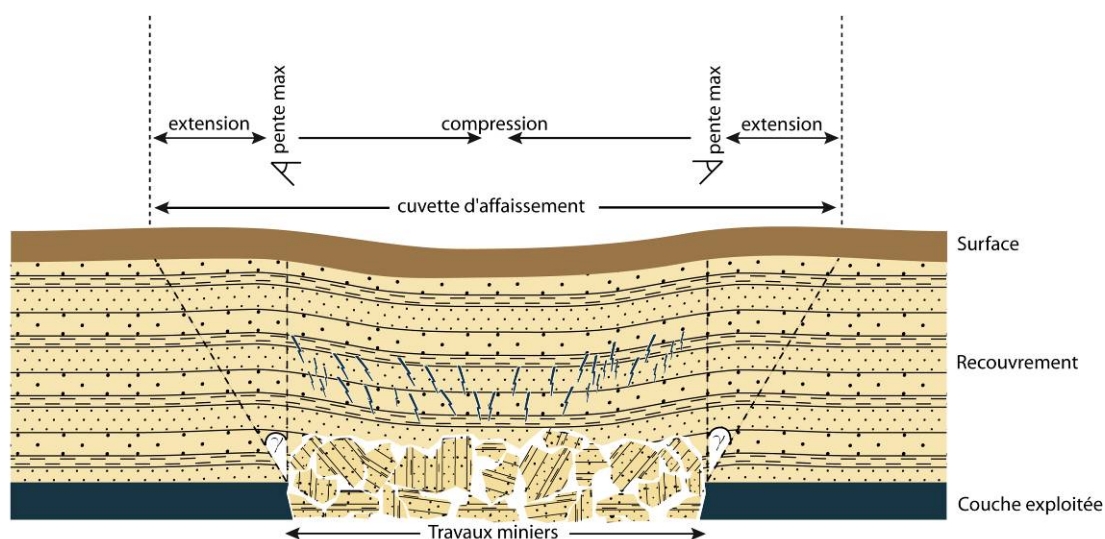


Figure 27 : Principe d'une cuvette d'affaissement et de ses conséquences sur le bâti de surface (Source : www.ineris.fr/guide-pprm).

- L'effondrement généralisé : également appelés effondrements en masse, se manifestent par la rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale peut atteindre plusieurs mètres (Figure 28) et même plusieurs dizaines de mètres quand c'est une cavité de dissolution du sel qui s'effondre. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, subverticales, délimitant des « marches d'escalier ». Ils traduisent une instabilité d'ensemble d'une partie de l'exploitation résultant généralement d'une extraction trop intensive. Ce sont des phénomènes heureusement très rares mais ils génèrent une quantité considérable d'énergie. Ils peuvent ainsi s'accompagner de secousses sismiques, parfois détectables jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres du secteur concerné. Les effondrements généralisés exigent une extension horizontale des travaux suffisante au regard de leur profondeur et la réunion de conditions spécifiques :
 - une rupture simultanée des piliers et des terrains du toit et du recouvrement ;
 - une rupture du toit d'une cavité de dissolution au-delà de sa taille critique.
 - **Les ruptures des ouvrages de dépôts des stériles ou de retenue de résidus de traitement minier** : La nature et la granulométrie des matériaux constituant ces ouvrages peuvent être très variables, depuis de gros blocs pierreux, jusqu'à des silts et des argiles en passant par des sables et graviers. La rupture ou la déformation des ouvrages de dépôt résultent généralement de l'évolution défavorable d'un ou plusieurs facteurs gouvernant le comportement mécanique des matériaux et notamment les circulations d'eau. Les désordres les plus dommageables susceptibles d'affecter ces ouvrages sont les glissements profonds et les coulées. En novembre 2015, la rupture soudaine de deux barrages retenant des résidus miniers d'une mine de fer au Brésil a entraîné le déversement d'une coulée de 60 millions m³ de boue s'étendant sur plus de 500 km.



Figure 28 : Effondrement généralisé sur le périmètre de l'ancienne mine de fer d'Hussigny, 54 (Source : BRGM).

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 sédiments et des sols. Elle se traduit par la présence, à des concentrations anormales (différentes de celles naturellement présentes), en surface ou dans les premiers mètres de sol, d'éléments indésirables et se présentant sous forme de particules solides.

Un sol ou des sédiments peuvent être contaminés 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, etc. 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.

Les répercussions sur les eaux

Les aspects quantitatifs

- Les besoins en eaux

La problématique des conflits d'usage d'eau est à prendre en compte.

- Les eaux d'exhaure

Les pompages d'exhaure peuvent collecter des quantités d'eau parfois importantes (Figure 29). Après vérification de leur qualité, ces volumes d'eau peuvent rejoindre le réseau hydrographique superficiel où ils sont susceptibles de modifier les écoulements naturels (débordement de cours d'eau en crue ou en hautes eaux, écoulement pérenne de certains cours d'eau normalement asséchés pendant une période de l'année).



Figure 29 : Pompage d'exhaure des eaux de mine sulfatées, bassin ferrifère du Nord (galerie de la Paix à Knutange), 57 (Source : INERIS).

Les aspects qualitatifs

- Les eaux d'exhaure

À la suite d'une défaillance des systèmes de vérification de la qualité des eaux d'exhaure, l'eau rejetée en surface pourrait ne pas être de bonne qualité (peu oxygénée et souvent ferrugineuse ou chargée en différents éléments). Elle perturberait alors le milieu récepteur sur le plan physico-chimique (teneur en oxygène, pH, concentration en certains ions, notamment en éléments traces métalliques...) et physique (température, couleur et turbidité). Les usages des eaux et la biodiversité des milieux pourraient alors être mis en danger.

- Le drainage minier acide

Le Drainage Minier Acide ou DMA (*AMD* en anglais) est un des défis environnementaux majeurs de l'industrie minière. Le DMA est un impact lié à l'eau dans l'activité minière. Il s'agit du lessivage par l'eau météorique de certains dépôts miniers (stériles, verses, terrils, etc.) ou de travaux miniers ou d'affleurement naturels.

Les réactions chimiques principales qui donnent lieu à un DMA sont l'oxydation du fer, du soufre et surtout de la pyrite, le minéral sulfuré le plus commun. Sous l'action de l'eau et de l'oxygène, les sulfures peuvent alors se transformer en acide sulfurique et attaquer les roches, diminuant drastiquement le pH (pH < 3,5 comparé à un pH neutre égal à 7) et faisant passer en solution des éléments traces métalliques (métaux lourds notamment). La particularité de cette réaction est d'être auto-catalysée, ce qui permet au phénomène de production de DMA de se propager de façon similaire à un incendie (la combustion est une réaction chimique exothermique qui déclenche la combustion d'autres matériaux, l'oxydation des sulfures produit du fer ferrique, qui entraîne l'oxydation d'autres sulfures).

L'écoulement de ce DMA vers le réseau superficiel ou souterrain est une cause fréquente de pollution dans les anciennes zones minières :

- pollution des eaux (et des sédiments en métaux lourds) ;

- effets néfastes sur la biodiversité des eaux (acidification et pollution des eaux).

Les métaux des effluents miniers acides sont généralement des poisons du métabolisme, en particulier les métaux lourds. L'acidification est directement à l'origine d'une mortalité importante des populations de poissons. Presque aucune espèce ne survit à des pH inférieurs à 5. Dans les régions constituées de terrains acides, l'acidité des eaux est conservée et les métaux sont transportés sous forme soluble à grande distance. Dans les régions constituées de terrains calcaires (basiques), en revanche, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et précipitent

Notons que les DMA ont également un impact sur les paysages : il s'agit de l'impact visuel que constituent les dépôts de couleur rouille sur plusieurs kilomètres de cours d'eau ou l'aspect dénudé des stocks stériles ou de résidus miniers (Figure 30).

Enfin, des ruptures d'ouvrages de retenue de résidus miniers peuvent conduire au déversement de grandes quantités de résidus plus ou moins acides et plus ou moins pollués dans les milieux environnants.



Figure 30 : Conséquences du drainage minier acide à Carnoulès, Gard (Source : INERIS).

- Les autres impacts sur la qualité des eaux

- Dans le cas des exploitations par dissolution ou par lixiviation *in situ*, la maîtrise et la détermination précises des formes et de l'extension des zones lixiviées ou dissoutes constituent un axe de recherche des exploitants miniers. De possibles mises en communication des eaux d'exploitation (saumure, solution de lixiviation, etc.) avec les aquifères peuvent survenir. Dans certaines configurations anormales, des fuites au niveau des puits ou des sondages peuvent également avoir lieu. Une modification de la qualité et notamment de la salinité des eaux reste possible dans les aquifères proches.

- Les techniques de traitement du minerai sont pour les plus courantes pourvoyeuses de résidus boueux ou aqueux en grand volume contenant des minéraux de gangue, des minéraux résiduels non économiques et éventuellement des produits chimiques (agents de flottation, cyanures, acides, bases, etc.). A la suite d'une fuite ou d'une rupture accidentelle des digues ou

des bassins de rétentions où sont stockés ces résidus, les eaux de surface et les eaux souterraines peuvent être polluées.

Des accidents majeurs ont touché des ouvrages de retenue d'effluents miniers et ont marqué l'opinion mondiale :

- le site de la mine d'Aznalcóllar (Espagne), en 1998, l'effondrement d'un terril a entraîné le déversement de 4 millions de m³ de DMA dans un fleuve adjacent ;
- à Baia Mare (Roumanie), en 2000, une rupture similaire entraîna le déversement de 100 000 m³ de DMA contenant entre 50 et 100 t de cyanure, qui ont contaminé le Danube sur plus de 2000 km ;
- en août 2015, une fuite accidentelle causée par des personnels de l'Agence de Protection de l'Environnement du gouvernement américain a contaminé la rivière Animas (3,8 millions de litres d'eaux polluées [cadmium, du plomb, du zinc, du fer, du cuivre ou de l'arsenic]).

Les impacts sur l'air

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.

Selon leur nature et leur quantité, ces gaz constituent une source de danger plus ou moins important, pouvant rendre très onéreuse voire remettre en cause une exploitation minière.

La thématique d'aérage relève donc principalement d'un objectif de sécurité du personnel mineur et, dans une moindre mesure, des impacts sur l'environnement du site : émissions de poussières, de gaz potentiellement dangereux et/ou à effet de serre aux sorties du circuit d'aérage.

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. En souterrain, cet aspect est minime et se concentre aux points de sortie d'air du circuit d'aérage. A ciel ouvert, des poussières peuvent être émises sur des secteurs plus larges autour des fronts de fosses en cours d'exploitation ;
- 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.

Les autres impacts environnementaux

- Les mines à ciel ouvert ont souvent une grande emprise foncière et donc, en fonction des sites, une empreinte écologique importante. Elles peuvent également conduire à la constitution d'importantes zones de dépôts de stériles. Par conséquent elles peuvent modifier sensiblement l'intégrité paysagère de la mine et de ses alentours.

Les mines souterraines s'intègrent relativement plus facilement au site que les MCO, puisque les seuls accès (puits, galeries ou forages) ainsi que les infrastructures de surface sont visibles.

Ce propos est à modérer en fonction des techniques d'exploitation souterraine qui peuvent conduire à l'apparition de zones déconsolidées en surface :

- zone d'affaissement minier au droit des zones exploitées de manière totale par tailles ou par chambres et piliers foudroyés ;
- affaissement ou effondrement au droit des zones de dissolution intensive.

Les usines de traitement impactent les paysages au même titre que tout autre site industriel, les zones de stockage de résidus de traitement peuvent en revanche dans le cas de sites de capacités importantes générer de vaste zone de dépôts.

- L'étape de concassage / broyage représente le poste de consommation d'énergie le plus important du processus de traitement des minerais. Précédée d'autres techniques d'hydrométallurgie, l'électrolyse est également grosse consommatrice d'énergie électrique.
- Les exploitations souterraines et à ciel ouvert peuvent être source de nuisances locales de types bruit et vibrations qui peuvent gêner la faune locale et les riverains. Ces sont les tirs de mine qui conduisent à créer ces impacts mais leur ressenti n'en demeure pas moins local (ordre de grandeur kilométrique).

4. Les solutions et les bonnes pratiques

Comme pour la phase d'exploration minière décrite dans le Tome 4, un certain nombre de textes réglementaires (Droit du travail, Droit de l'environnement et Droit minier) existent et encadrent le bon déroulement d'une exploitation minière en phase active. Néanmoins, cette phase d'exploitation minière est sans doute aujourd'hui la plus réglementée et la plus contrôlée. Le détenteur du permis d'exploiter tout comme le gérant d'une usine de traitement de minerai se doit de veiller au respect de ces dispositions réglementaires par son propre personnel mais également par le personnel des éventuels sous-traitants à qui il confie certaines phases de l'exploitation (abattage notamment). Il doit également s'assurer du sérieux des aptitudes professionnelles et certifications des sous-traitants.

Dans ce cadre, l'identification de bonnes pratiques (au-delà des dispositions légales) pouvant être mises en œuvre afin de maîtriser les risques et les impacts socio-économico-environnementaux des travaux d'exploitation est difficile. Le Tome 9 liste et analyse les documents proposant des bonnes pratiques d'exploitation minières dans d'autres pays. Celles complétant les attentes réglementaires françaises ont été compilées ci-après.

La phase de construction de la Mine (Tome 5) préalable à celle d'exploitation a sélectionné les méthodes d'exploitation et de traitement les plus adaptées au site concerné en tenant compte de ses spécificités. La ligne directrice de cette sélection est l'optimisation des méthodes en vue de la réduction des impacts. C'est donc au cours de cette phase de design que doivent être édictées les bonnes pratiques qui vont être mises en application lors de la phase de production de la mine (et au-delà). Cette anticipation des réflexions est une des bases de fonctionnement d'une mine responsable.

Remarques :

(1) *Le développement de mines souterraines profondes est intéressant pour la mise en œuvre du concept de « mine responsable » car elles contribuent à réduire l'empreinte environnementale de l'industrie minière. Les opérations de broyage et de concassage du minerai peuvent être réalisées dans la mine souterraine, ce qui permet une meilleure efficacité énergétique (pas besoin de transport du minerai vers la surface), réduit l'exposition des riverains aux poussières et aux vibrations liées à ces opérations en plus de l'utilisation des résidus fins de traitement pour le remblayage des excavations. Une exploitation souterraine peut également être pensée et conçue de manière responsable, comme le sont une bonne partie des carrières à ciel ouvert française qui se sont engagées depuis une quinzaine d'année sur des voies de progrès et d'intégration socio-environnemental.*

(2) *Tout comme le choix de la méthode d'exploitation, la mise en place de bonnes pratiques est dépendante du site minier, il faudra donc veiller à relativiser les réussites des mines « exemplaires » dont les solutions pourraient ne pas être directement transposables à d'autres sites sans adaptation circonstanciée.*

(3) *Les compagnies minières et les bureaux d'études cherchent continuellement des méthodes innovantes pour limiter leurs impacts tout en maximisant leur rendement. La liste des solutions ci-après ne doit pas être considérée comme fermée mais au contraire destinée à s'allonger au cours des prochaines années.*

4.1. LES BONNES PRATIQUES SOCIO-ECONOMIQUES

Les phases d'exploitation minière et de traitement de minerai sont souvent les plus stigmatisées des grandes étapes de la vie d'un projet minier de par les impacts potentiels craints, à tort ou à raison, pour chaque configuration de projet. Les compagnies minières se doivent donc de concevoir des méthodes pour limiter ces impacts sociaux et pour valoriser les retombées positives. Dans ce contexte, plusieurs solutions existent :

- Intégrer le potentiel humain local aux besoins en personnel des différentes phases de l'exploitation minière (et des activités connexes).
- Etablir des calendriers et horaires de différents travaux d'exploitation limitant les inconvénients dans et à proximité des zones sensibles pour la faune et les populations locales (phases de tir, expédition et transport des différents produits (explosifs, stériles, minerai, etc.).
- Poursuivre les efforts de concertation (recherche d'un consensus avec prises de décisions mutuelles) entrepris lors des phases précédentes (Exploration minière / Tome 4, et Développement-Financement-Construction / Tome 5) en intégrant en amont un mécanisme de concertation avec les élus, les populations et les associations locales pour échanger autour des phases d'exploitation et de traitement du minerai.
- Informer et communiquer régulièrement en faisant de la médiation sur :
 - l'avancée des travaux d'exploitation et de traitement ;
 - les éventuels désagréments rencontrés ;
 - les bonnes pratiques mises en place ;
 - la découverte des métiers relatifs à la mine ;
 - l'utilité des ressources minérales dans la vie quotidienne, etc.

A travers des sites internet dédiés, des lettres d'information spécifiques, des réunions publiques, d'articles dans la presse locale, des visites de chantier, des interventions dans les établissements scolaires locaux, etc.

- Organiser des visites de la mine et de ses ateliers lors d'évènements comme la « Fête de la Science » ou développer des activités autour du tourisme industriel ;
- Prévoir à l'avance le mécanisme de résolution de crise :
 - en cas d'opposition des points de vue ;
 - en cas d'incidents ou d'accidents miniers.
- Nommer ou créer une fonction responsable concertation/communication du site d'exploitation.
- Créer, subventionner ou soutenir des activités de service nécessaires à la vie de l'exploitation minière, dans le tissu économique et social local (restauration, hôtellerie, logements, infrastructures routières...) en favorisant celles qui perdureront malgré la fin inéluctable de l'activité minière.
- Etre aussi transparent que possible sur l'utilisation des bénéfices de la mine :
 - Taxes diverses dont celles rétribuées aux communes ;
 - Part investie dans le développement R&D pour développer les moyens de lutte contre les impacts environnementaux et sociaux ;

- Rétribution des compagnies minières.

Remarques :

- *L'UNICEM a mis en œuvre un guide de la concertation pour les carrières à ciel ouvert : <http://www.charte.unicem.fr/content/la-concertation>) qui propose des pistes de bonnes pratiques dont certaines ont été reprises ici.*
- *Les aspects et impacts sociaux des projets miniers, et notamment des phases d'exploitation, font l'objet de travaux, d'études et de recherche innovantes, les australiens et les canadiens sont particulièrement engagés sur cette piste. La France est relativement en retard dans ce domaine. La participation à ces travaux de recherche est une bonne pratique pour tout exploitant minier se voulant responsable.*

4.2. LES BONNES PRATIQUES RELATIVES A LA STABILITE GEOTECHNIQUE

Etude et caractérisation amont

- Caractérisation préalable des milieux rocheux : état de dégradation du massif et, le cas échéant, des ouvrages existants, identification du champ de contraintes, analyse tectonique du secteur (notamment les principales failles), caractérisation de la résistance du massif à un chargement dynamique...
- Optimisation de la gestion et de la prise en compte les eaux de ruissellement et d'infiltration sur tous les ouvrages de dépôts : verses à stériles et bassins de résidus (une mauvaise gestion des eaux est l'élément déclencheur de la majorité des instabilités sur ces ouvrages).
- Dimensionnement adapté des cavités (souterraines et à ciel ouvert) et des ouvrages de dépôts par des modélisations et des calculs tenant compte :
 - de facteurs de sécurité « conséquents » intégrant les hypothèses inhérentes à tout projet minier (fracturation, résistances...), généralement des facteurs de sécurité au moins égaux à 1,2, 1,3 voire 1,4 doivent être envisagés ;
 - de conditions hydrologique et sismologique exceptionnelles (crues centennales ou quinquamillénaires).
- Recours à des bureaux d'études spécialisés dans les calculs et le dimensionnement géotechniques s'appuyant sur des références et des normes internationalement reconnues.
- Si possible, dimensionnement de méthodes d'exploitation auto-remblayées (où le remblayage est conçu comme une phase d'exploitation et non comme un traitement a posteriori).
- Pour les exploitations par dissolution :
 - favoriser les méthodes d'exploitation garantissant des cavités stables sur le long-terme ;
 - dimensionner les cavités en laissant une garde de minerai au toit suffisante pour garantir la stabilité de la cavité.

Gestion et traitement

- Encouragement du remblayage, partiel ou total, des excavations (souterraines ou à ciel ouvert) ayant laissé des vides résiduels (Figure 31). Les remblais déposés dans les excavations souterraines confortent à long terme les excavations et suppriment tout risque de mouvement de terrain dommageable. Lorsque le remblayage est effectué à l'aide de ces résidus de traitement et/ou de stériles (« *backfilling* ») complétés de ciment, en plus de la stabilité, la méthode permet de réduire le volume des stériles et des résidus miniers stockés dans les bassins de résidus ou sur les verses à stériles. Le remblayage des travaux miniers les moins profonds doit être prioritaire. Pour le ciel ouvert, privilégier les méthodes d'exploitation qui permettent un autoremblayage partiel ou total des fosses. Ce qui minimise le risque de glissements des flancs et limite l'empreinte écologique du site.
- Identification des zones de travaux les plus sensibles au déclenchement des phénomènes : collecte d'informations au travers de réseaux de surveillance (microsismicité, mesures de variations de contraintes, déplacements, etc.), d'inspections géotechniques, de modélisations numériques du comportement du massif rocheux, etc.
- Mise en œuvre de mesures préventives : adaptation du dimensionnement des travaux, tirs de détente, soutènement adapté, mise en œuvre d'alertes liées à l'exploitation des réseaux de surveillance (détection de signaux précurseurs), etc.



Figure 31 : Différentes mises en oeuvre de remblais en mines souterraines allemandes à gauche et américaines à droite (Source : www.victaulic.com et www.asse-archiv.de).

Suivi et information

- Suivi en continu et contrôle des mouvements de terrains potentiels : nivellement instrumenté de précision, détection de crevasses ou de fontis, suivi microsismique, etc.
- Formation et information régulières des personnels aux problématiques d'instabilités géotechniques.

- Pour les exploitations par dissolution créant des cavités réputées stables sur le long-terme :
 - Pratiquer :
 - des contrôles réguliers (mesures sonar, diagraphies) des dimensions des cavités et de la position du toit (vérification de la garde de minerai au toit) ;
 - des tests d'étanchéité des puits/sondages d'accès aux cavités ;
 - Vérifier l'absence d'évolution anormale des cavités par la réalisation de mesures de nivellement régulières à l'aplomb des cavités.

4.3. LES SOLUTIONS POUR LIMITER LES VOLUMES DE STERILES ET DE RESIDUS MINIERES PRODUITS

- Optimisation des profils de fosses à ciel ouvert de manière à maximiser les volumes de minerais et minimiser les volumes de stériles.
- Modélisations et mise en œuvre de réseaux de galeries souterraines de manière à maximiser les excavations creusées en zones minéralisées et minimiser les galeries creusées en stériles.
- Optimisation des forages et des schémas de tirs de manière à n'abattre que la couche minéralisée (minimisant la salissure et donc la génération de stériles).
- Réutilisation des stériles et des résidus de traitement comme produit de remblayage des excavations minières (souterraines ou à ciel ouvert) ou comme granulats.

4.4. LES SOLUTIONS POUR LIMITER LES REPERCUSSIONS SUR LES EAUX

Généralités

Etude et caractérisation amont

- Réduire les volumes de stériles et de résidus miniers produits (Cf. ci-avant).
- Identifier et définir des technologies de traitement du minerai générant des résidus secs ou pâteux (sans eau libre, Figure 30).
- Dimensionner et mettre en œuvre des procédés de traitement propres minimisant l'introduction de réactifs polluants ainsi que la production de stériles et de résidus miniers.
- Etudier les valorisations possibles des eaux de procédés produites :
 - réinsertion dans le circuit de process de traitement du minerai ;
 - récupérations de certains métaux ;
 - récupération de la chaleur présente (dans les eaux profondes rejetées en surface).

Gestion et traitement

- Réajuster et mettre à jour, les calculs de dimensionnement de l'exhaure et de cellules de traitement du minerai après toute modification de méthode d'exploitation et/ou de procédés de traitement.
- Recycler au maximum les eaux du site (eau de procédés, eau de lessivage des terrains, eaux domestiques, etc.) pour limiter les consommations d'eau douce.
- Suivre les codes et les initiatives volontaires internationales dans la gestion de l'environnement des stériles et des résidus miniers ou des eaux de mine (par exemple, le code international de gestion du cyanure, <http://www.cyanidecode.org>, est un programme industriel volontaire qui vise à améliorer la gestion du cyanure et à contribuer à la protection de la santé humaine et à la diminution des impacts sur l'environnement).
- En l'absence de possibilités de recyclage, traiter les eaux d'exhaure et les autres eaux en favorisant les traitements passifs relativement aux traitements actifs (plus respectueux de l'environnement et peu consommateurs d'énergie).
- Restituer les eaux d'exhaure à l'environnement en prenant en compte le fonctionnement des réseaux hydrographiques concernés (étiage ou hautes eaux) de manière à minimiser les impacts quantitatifs des rejets.

Suivi et information

- Suivre régulièrement la qualité des eaux d'exhaure et de toutes les eaux collectées sur le site (site d'exploitation et de traitement).
- Suivre régulièrement la qualité des eaux souterraines et de surface à proximité du site (site d'exploitation et de traitement).
- Former et informer régulièrement les personnels aux actions de recyclage des eaux et de limitations des impacts sur la ressource en eau.
- Publier les données relatives aux consommations d'eau et aux potentiels risques pesant sur cette ressource, du fait de l'activité minière.

Recherche et développement

- Développer la connaissance et la recherche sur les phases de traitement métallurgique :
 - réduction des apports en eau propre et recyclage des eaux de procédé ;
 - fonctionnement en pulpe épaisse ;
 - bio-traitement et bioréacteurs.

Limiter les effets des méthodes par dissolution

- Dimensionner les cavités en laissant une garde de minerai au toit suffisante pour garantir une protection vis-à-vis des circulations d'eaux souterraines (eaux douces vers la cavité).
- Régulation des niveaux d'injection d'eau douce et d'extraction de saumure afin de limiter, d'une part, les introductions de saumure dans les aquifères et le réseau hydrographique et, d'autre part, les arrivées d'eau douce non contrôlée vers le gisement.
- Mise en œuvre de contrôles réguliers et adaptés de la qualité des eaux dans les aquifères et les eaux de surface potentiellement impactées : suivis des aquifères (piézomètres et analyses sur les eaux) et mesures de nivellement pour vérifier l'absence de dissolution parasite.

Réduire les impacts des méthodes par lixiviation

Etude et caractérisation amont

- Réduire les volumes de stériles et de résidus miniers produits (cf. ci-avant) ;
- Caractériser finement la nature géologique et géochimique des matériaux traités pour identifier les potentielles sources de pollutions.

Gestion et traitement

- Pour les exploitations de type lixiviation *in situ* :
 - Créer et entretenir des puits ou des sondages de contrôle autour de la zone de lixiviation.
- Pour les techniques de lixiviation en tas :
 - Mettre en œuvre des techniques d'agglomération en amont de la lixiviation (ajouter de petites quantités de liquide au minerai sec afin de regrouper les fines particules). Elles évitent la création de chemins préférentiels et de colmatages dans les tas de lixiviation, améliorent le rendement et limitent les taux élevés de cyanure dans les concentrés.
 - Favoriser l'épaississement et l'assèchement des résidus finaux qui permet de stocker ces résidus sous forme solide et non sous forme de boues liquides potentiellement plus nuisibles.
 - Proposer des techniques de lixiviation par « gouttes à gouttes », limitant les impacts des traditionnelles méthodes par pulvérisation des solutions lixiviantes.

Par ailleurs, la profession a mis en place « un code international de gestion du cyanure », qui est une initiative à adhésion volontaire, constituée par les sociétés minières, les producteurs et les transporteurs du cyanure. Il vise à compléter les réglementations existantes et il a pour objectif la gestion en toute sécurité de l'usage du cyanure. L'adhésion à ce type de démarche est une bonne pratique de tout projet minier se voulant responsable.

Suivi et information

(Cf. paragraphe 4.4.1).

- Suivre régulièrement la qualité des eaux d'exhaure et de toutes les eaux collectées sur le site (site d'exploitation et de traitement).
- Suivre régulièrement la qualité des eaux souterraines et de surface à proximité du site (site d'exploitation et de traitement).

Recherche et développement

- Développer la connaissance et la recherche :
 - des codes de calcul spécifiques aux phénomènes de lixiviation à l'échelle des grains et des tas (exemple d'AREVA) ;
 - des processus de biolixiviation (solubilisation des métaux par les bactéries) comme une alternative à l'utilisation des solvants (cyanure notamment), Figure 32:
 - identification des souches bactériennes les plus adaptées et rôle de la dynamique des populations ;
 - modélisation des processus bio-géochimiques ;
 - développement de réacteurs spécifiques.



Figure 32 : Bio-lixiviation pour traiter le minerai de cuivre en Ouganda (Source : <http://promine.gtk.fi/about/WorkPackage4.html>).

Supprimer ou réduire le drainage minier acide

Etude et caractérisation amont

Caractériser finement la nature géologique et géochimique des matériaux concernés pour identifier en amont les sulfures, sources principales de DMA.

Gestion et traitement

Dans le cas des DMA issus de verses à stériles ou de bassins de résidus. Il existe plusieurs méthodes de neutralisation :

- noyer les stocks de stériles et de résidus miniers sous une lame d'eau ou les déverser dans des lacs anoxiques et fermés (l'oxygène pénètre très difficilement dans l'eau).
- traiter passivement le site en :
 - drainant et dérivant les eaux de ruissellement et en recouvrant les stocks de stériles et de résidus miniers d'une couverture imperméable naturelle, permettant une revégétalisation et donc une protection contre l'érosion : couches superposées d'argile et de terre, dépôts de tourbière (riches en matière organique et réducteurs) ;
 - aménageant des zones humides artificielles (Figure 33). Elles utilisent les microbes aériens et aquatiques associés aux végétaux des zones humides pour éliminer les métaux dissous du drainage rocheux. Toutefois, contrairement au traitement chimique, les zones humides sont des systèmes passifs qui ne nécessitent que peu ou pas d'entretien continu. Il s'agit là d'une méthode de traitement relativement nouvelle dotée de nombreux mécanismes spécifiques et d'exigences d'entretien qui ne sont pas encore pleinement compris.
 - en créant un canal de calcaire ouvert ou un drain calcaire anoxique.



Figure 33 : Zones humides ou wetlands, mine de cuivre, de zinc, d'or, d'argent et de cadmium d'East Sullivan au Canada (Source : www.mern.gouv.qc.ca).

Suivi et information

(Cf. paragraphe 4.4.1).

Recherche et développement

Développer la recherche sur les bioréacteurs. Des résultats intéressants (enlèvement du Fe > 90%, à des concentrations d'environ 2-3 g/L) ont été récemment obtenus au Canada dans une filière constituée des deux biofiltres-sulfato-réducteurs, séparés d'une unité constituée de cendres de bois.

4.5. LES BONNES PRATIQUES RELATIVES AUX PROBLEMATIQUES D'AERAGE

Etude et caractérisation amont

- Caractérisation préalable des gaz potentiellement présents.
- Recours à des bureaux d'études spécialisés dans les calculs et le dimensionnement de circuits d'aéragé.

Gestion et traitement

- Nommer ou créer une fonction responsable « aéragé » sur toute mine souterraine. Dans certains cas, il est indispensable de faire appel à des techniques spécifiques consistant à intercepter les gaz dans le massif rocheux et/ou dans les vieux travaux miniers, avant qu'ils n'atteignent l'atmosphère des ouvrages miniers en activité (captage de gaz).

Suivi et information

- Suivre en continu et contrôler les performances des matériels d'aéragé.
- Former et informer régulièrement les personnels mineurs à la problématique gaz et aux usages des Equipement de protection individuel et collectif (EPI /EPC) proposés.

4.6. LES AUTRES BONNES PRATIQUES

De manière générale, une exploitation minière responsable se doit d'être « réactive », c'est à dire capable d'anticiper une quantité d'aléas. Ainsi, elle devra mettra en œuvre des outils performants (qui existent déjà) pour anticiper et piloter l'exploitation de la ressource minérale de façon de plus en plus précise et respectueuse.

En outre, la gestion des poussières, celle des vibrations, la minimisation des impacts sur la biodiversité, des consommations d'énergie et des produits dangereux sont au cœur des préoccupations d'une exploitation minière responsable.

Limiter les impacts sur la biodiversité

- Traiter, préférentiellement de manière passive, les eaux de mine avant le rejet dans l'environnement (polluants, acidité, salinité, etc.).
- Limiter le défrichement au strict besoin.
- S'engager à recycler les matériaux inertes sur site ou en dehors du site.
- En cas de revégétalisation du site, favoriser l'insertion de plantes et arbres d'essence locale (voire réimplanter les sols et terres éventuellement préservés et stockés lors des étapes de décapage).
- Développer la connaissance et la recherche sur les bio-réacteurs pour traiter les minerais et les résidus miniers.

Diminuer les nuisances liées aux émissions de poussières

- Prévoir la réduction des poussières en anticipant la plantation d'arbres pour servir d'écran visuel et sonore tout comme de brise-vent.
- Etudier les possibilités de réaliser les opérations de concassage/broyage :
 - en souterrain, pour les mines souterraines ;
 - sous structure étanche.
- Généraliser l'utilisation de systèmes d'abattement et/ou d'aspiration des poussières lors du broyage et du concassage.
- Accroître les performances des phases de foration et de tirs de mine de manière à minimiser les émissions de poussières.
- Développer la connaissance et la recherche sur les techniques d'abattage par jets d'eaux à haute pression (Figure 34, en carrière).

NB : ces solutions n'en restent pas moins consommatrices d'eau et doivent être envisagées dans certains cas spécifiques. En effet, l'adoption de bonnes pratiques sur un projet minier particulier est le résultat de compromis sociaux, environnementaux, techniques et économiques (Cf. Tome 5).

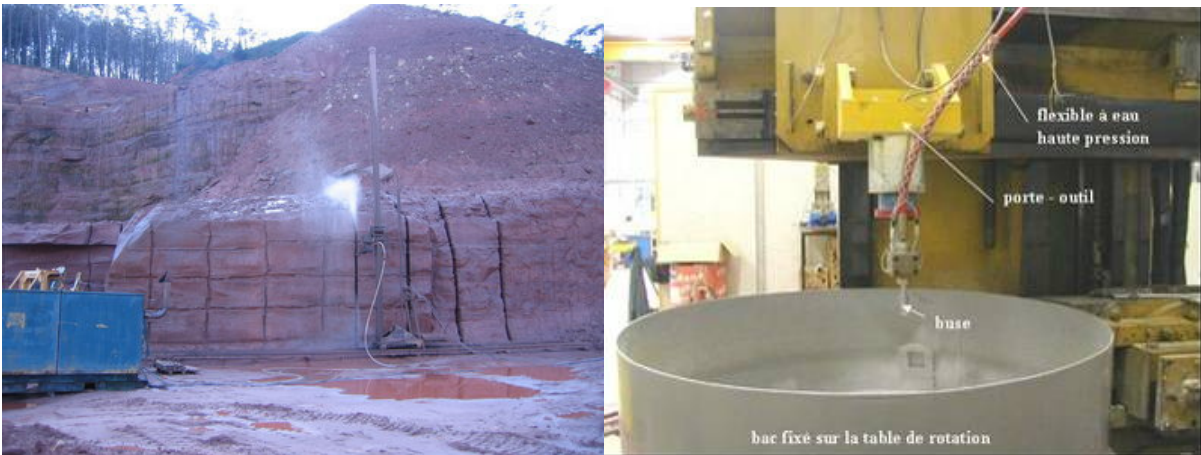


Figure 34 : Gauche : Découpe de grès des Vosges par jet d'eau haute pression (Source : www.carriere-logel-rothbach.fr). Droite : Dispositif expérimental de découpe de roches avec des jets d'eau à haute pression (Source : www.geosciences.mines-paristech.fr).

Minimiser les vibrations liées à l'exploitation

- Accroître les performances des phases de foration et de tirs de mine de manière vibrations.
- Développer la connaissance et la recherche sur les techniques d'abattage par jet d'eau à haute pression.

Réduire l'impact visuel

- Pour les exploitations souterraines, limiter le nombre d'accès et les infrastructures en surface (si possible intégrer ces dernières en profondeur).
- Pour les exploitations à ciel ouvert, privilégier les méthodes d'exploitation qui permettent un auto-remblayage partiel ou total des fosses.
- Réaménager et remettre en état le site (notamment les fosses et les zones de dépôts en surface) au fur et à mesure de l'exploitation (dans la mesure du possible).
- Réduire la taille et le nombre des sites de stockage de stériles et de résidus miniers en surface (au profit par exemple d'un remblayage) ;
- Prévoir la réduction de l'impact visuel en anticipant la plantation d'arbres d'essence locale pour servir d'écran ;
- Installer les postes de traitement du minerai au sein des chantiers souterrains (concassage et broyage notamment).

Réduire la consommation en énergie et les émissions de gaz à effet de serre

- Promouvoir l'utilisation d'engins de chantiers électrique (et de tout autre matériel minier) ;
- Développer la connaissance et la recherche sur les techniques de broyage intégrant une étape d'électro-fragmentation (qui minimise les besoin en énergie de cette étape).

Gérer les produits dangereux de manière responsable

- Minimiser l'utilisation des réactifs chimiques lors du traitement du minerai :
 - Optimisation des process ;
 - Recyclage des eaux de process ;
 - Développement des bio-traitements ;
- Concevoir des installations, de stockage des produits chimiques, pérennes et sûres (réactifs chimiques éventuellement nécessaires aux processus de traitement du minerai et hydrocarbures notamment) et ne pas les stocker dans de « simples hangars ou cuves enterrées » ;
- Explosifs : promouvoir et développer l'utilisation des Unités Mobile de Fabrication d'Explosifs (UMFE).

Annexe 1

Autres méthodes d'exploitation souterraine

Exploitation souterraine par chambres-magasins (« *shrinkage stoping* » en anglais)

Cette méthode d'exploitation est classique et fut l'une des plus répandues au siècle dernier. Elle se pratique dans des exploitations d'extension modérée et s'applique aux gisements de forme régulière et fortement pentus aux épontes rocheuses compétentes (cas des filons notamment). Elle (Figure 35) utilise la gravité, les matériaux abattus en montant d'une voie de base vers une voie tête, tombant dans la chambre puis sont soutirées directement dans des berlines sur rails via des trémies, ce qui évite le chargement manuel. Le minerai est enlevé par tranches horizontales. La majorité des matériaux abattus est provisoirement laissée en place : ils servent de plancher de travail pour la préparation de la volée suivante ou comme soutènement provisoire des parements. La fragmentation augmentant le volume de la roche, des matériaux abattus sont soutirés au fur et à mesure pour laisser un espace de travail suffisant, le reste étant évacué après l'abattage de la dernière tranche.

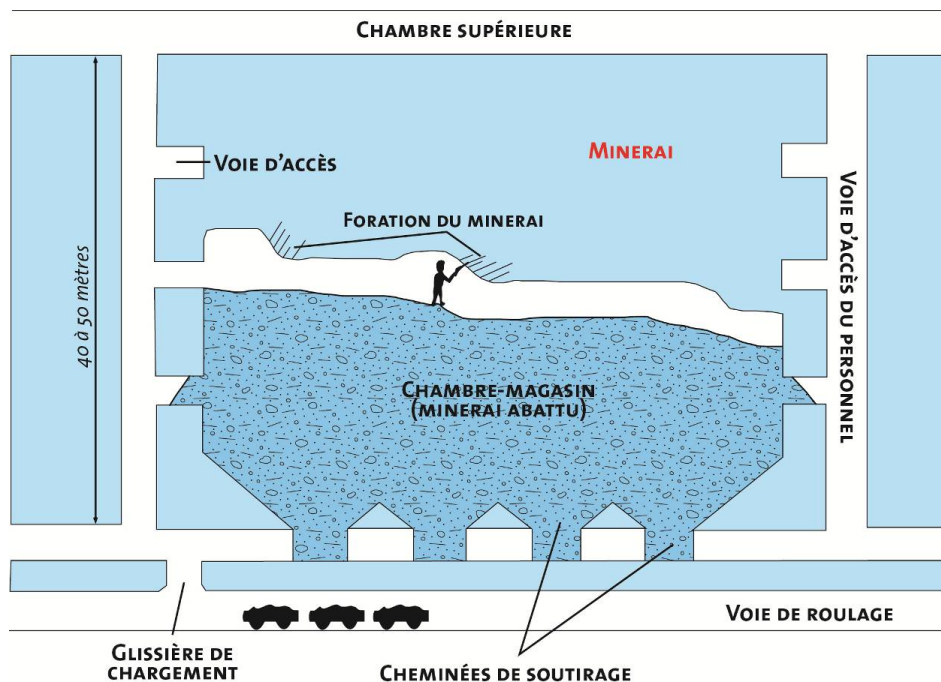


Figure 35 : La technique d'exploitation par chambres-magasins (Source : BRGM)

En fin d'exploitation les chambres sont le plus souvent laissées vides, toutefois localement elles peuvent être remblayées.

Cette méthode ne peut être utilisée que pour les minerais non altérables lorsqu'ils sont laissés en place après abattage (ex. les minerais sulfurés tendent à s'oxyder et à se décomposer une fois exposés à l'air).

Exploitation souterraine par sous-niveaux

Ce type d'exploitation est mis en œuvre dans des gisements subverticaux modérément épais. Le principe d'exploitation est ici de découper le gisement en galeries de niveaux (et galeries de sous-niveaux) superposées verticalement et d'abattre le minerai à partir de ces galeries.

Cette technique d'exploitation est essentiellement destinée aux gisements réguliers, verticaux ou fortement inclinés. Le corps minéralisé est divisé verticalement en sous-niveaux superposés

puis le minerai est abattu en grande masse par tranches verticales et récupéré à la base par des points de soutirage préparés à l'avance

Deux grands types d'extraction par sous-niveaux sont identifiables en fonction de la manière dont sont traités les vides (chambres) :

- Par sous-niveaux abattus (chambre « réservoir » exploitée par sous-niveaux montants, « *sublevel caving stoping* » en anglais). Le minerai est abattu par foration verticale au mur des galeries, il descend par gravité jusqu'à la base du niveau de l'étage où il est soutiré immédiatement. L'exploitation progresse des sous-niveaux les plus profonds vers les moins profonds, Figure 36. Les chambres peuvent être laissées vides ou remblayées ultérieurement. La mise en œuvre de cette technique nécessite un minerai résistant, des épontes stables, une géométrie régulière et bien définie, et un pendage fort. Cette technique assure une bonne récupération et une sélectivité du minerai fonction de la bonne tenue des épontes (risque de dilution des teneurs). Certaines parties de l'ancienne mine de tungstène de Salau ont été exploitées avec cette technique.

Par sous-niveaux abattus par charges concentrées (chambre « réservoir » exploitée par sous-niveaux montants, « *vertical crater retreat* » en anglais), Figure 37. C'est une variante des sous-niveaux abattus par l'utilisation de forages en gros diamètre (165 mm). Les charges explosives sont concentrées permettant une fragmentation importante et localisée (Figure 37). Les niveaux exploités sont de l'ordre de 30 à 70 m de hauteur. Cette technique a été employée dans les années 1980-1990 à la mine de chrome de Tiébaghi en Nouvelle-Calédonie.

- Par sous-niveaux foudroyés (chambre foudroyée exploitée par sous-niveaux descendants, « *sublevel stoping caving* » en anglais). Le minerai est abattu par foration au toit des sous-niveaux et il est ensuite déblayé à chaque sous-niveau. Ceci permettant la progression du foudroyage en descendant des sous-niveaux les moins profonds vers les plus profonds (Figure 38). Dans certains cas, le foudroyage des terrains peut atteindre la surface. La mise en œuvre de cette technique requiert un filon à fort pendage et une extension verticale importante, d'une puissance supérieure à 3 m et où la séparation entre minerai et stérile est aisée. Cette technique assure également une bonne récupération et une bonne sélectivité fonction de la définition entre minerai et stérile.

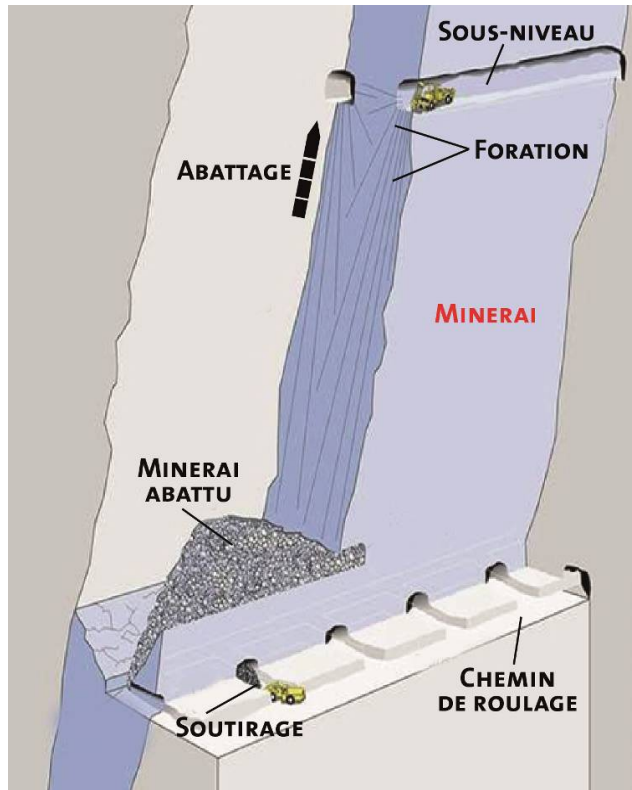


Figure 36 : La technique d'exploitation par sous-niveaux abattus (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).

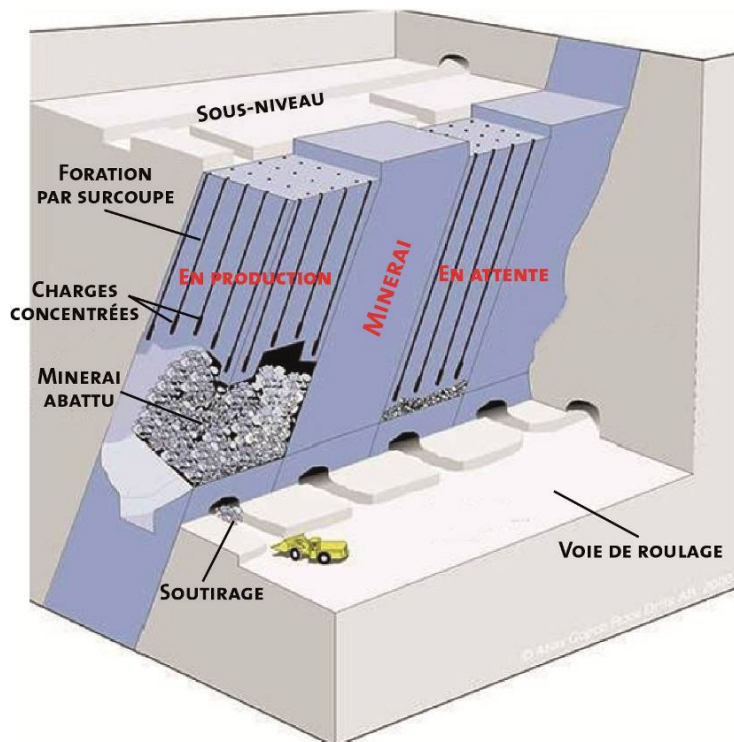


Figure 37 : La technique d'exploitation par sous-niveaux abattus par charges concentrées (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).

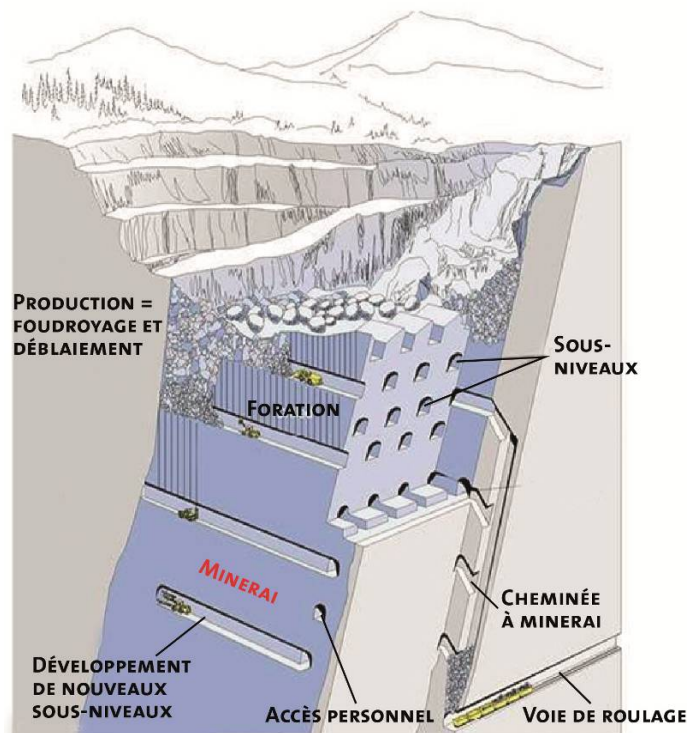


Figure 38 : La technique d'exploitation par sous-niveaux foudroyés (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).

Exploitation par chambres et piliers remblayés ou foudroyés

Très similaire à la méthode d'exploitation par chambres et piliers abandonnés dans sa première phase, cette technique d'extraction permet un traitement intégral des vides créés lors de l'exploitation. La suppression des vides est assurée par le remblayage des chambres ou l'effondrement des piliers résiduels. Cet effondrement peut être spontané (piliers dégraissés pour n'être stables qu'à très court terme) ou déclenché (torpillage des piliers par tirs à l'explosif).

La méthode d'exploitation par îlots réduits est une variante de la méthode des chambres et piliers foudroyés. Conçue pour l'exploitation de gisements situés sous des infrastructures sensibles en surface sans sacrifier pour autant la totalité des réserves de matériau, cette méthode consiste à ménager des bandes fermes (non exploitées ou très faiblement défruitées) séparant des zones dépillées puis foudroyées.

Cette technique assure l'autorembayage des vides tout en limitant l'extension verticale de la cloche de foudroyage (zone de terrain déconsolidée à l'aplomb des secteurs éboulés). Le dimensionnement du schéma d'exploitation doit garantir la stabilité à long terme des bandes fermes. La largeur de ces dernières et celle des îlots dépendent de la profondeur et de l'ouverture de la couche ainsi que de la nature des terrains de recouvrement.

Exploitation souterraine tranches descendantes sous dalle (« undercut and fill » en anglais)

L'extraction par tranches descendantes sous dalle (« undercut and fill » en anglais) consiste à abattre et déblayer le minerai par tranches horizontales en descendant en profondeur. Entre chaque niveau d'exploitation une dalle en béton est coulée servant de toit (plafond) à la tranche

sous-jacente ultérieurement exploitée. Le vide de la tranche supérieure est ensuite remblayé à l'aide de stérile ou de résidus de traitement (Figure 39).

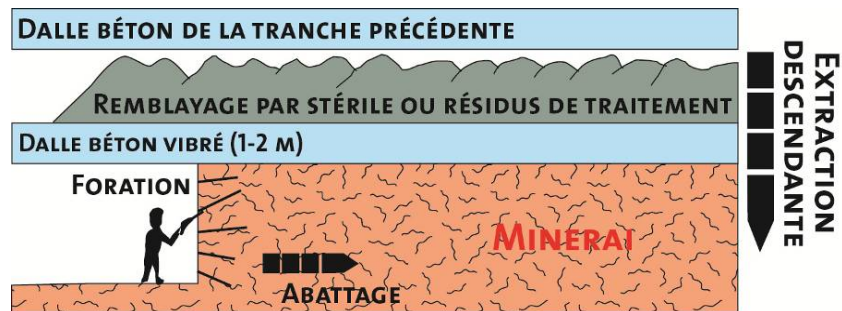


Figure 39 : La technique d'exploitation par tranches descendantes sous dalle (Source : BRGM).

Exploitation souterraine par bloc foudroyés (« *block caving* » en anglais)

On parle de blocs foudroyés pour désigner une méthode de type sous-niveaux foudroyés mais des gisements de grandes dimensions (dans les 3 directions), d'un volume de l'ordre de 100 millions de tonnes.

Cette technique de défilage est adaptée aux corps minéralisés de grandes dimensions en forme d'amas (fort tonnage) et à basse teneur (ex. porphyres cuprifères) et s'effectue par des tirs au toit des galeries de base, opération dite de foudroyage du minerai (Figure 40). Ce dernier se désagrège spontanément et descend en masse où il est soutiré via un réseau d'entonnoirs aménagé à la base des blocs foudroyés. Ce genre d'exploitation nécessite un minerai homogène car aucune sélectivité n'est possible mais permet une très forte productivité.

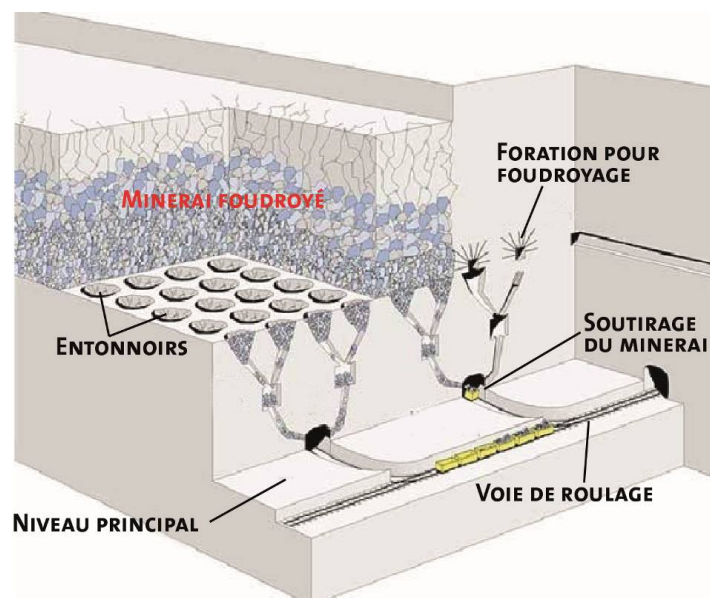


Figure 40 : La technique d'exploitation par blocs foudroyés (modifié d'après Atlas Copco Rock Drills AB).

Exploitation souterraine par tailles

L'exploitation par taille est caractérisée par une allée qui progresse parallèlement à elle-même au sein du gisement minéral. Cette allée est maintenue ouverte au moyen de lignes de soutènement constituées de piles, d'étais ou d'étaçons qui progressent au fur et à mesure de

l'abattage (Figure 41). La partie déjà exploitée, appelée arrière-taille, est soit foudroyée, soit remblayée.

Selon la longueur du front de taille et la terminologie locale, on parle de longues tailles, de courtes tailles ou de tailles très courtes ou mini-tailles. L'exploitation par taille est particulièrement adaptée aux gisements sédimentaires en plateure ou semi-dressants (Cf. Tome 12). Elle peut également être utilisée dans des couches dont le pendage est supérieur à 30° si les conditions de gisement sont favorables.

Dans le cas de dressants, la méthode dite « par gradins renversés » a souvent été utilisée. Dans cette méthode, le front de taille est constitué par une série de gradins décalés les uns par rapport aux autres, ce qui conduit à avoir un « pied de taille » en avance par rapport à la « tête de taille », l'arrière taille est remblayée par déversement de remblais à partir de la tête de taille qui se mettent en place suivant leur pente naturelle, l'évacuation du minerai s'effectuant dans des couloirs situés sur le remblai. Le front de taille est parallèle à la pente naturelle des remblais.

La taille à soutirage est une méthode spécifique réservée aux couches épaisses en plateure ou aux amas. Elle consiste à réaliser une taille foudroyée à la partie inférieure de la couche épaisse avec utilisation ou non de soutènement marchant adapté pour le soutirage. Sous l'effet du foudroyage, le matériau exploité de la partie supérieure de la couche s'éboule dans l'arrière taille d'où il est soutiré.

C'est la technique largement utilisée pour l'exploitation de la potasse.

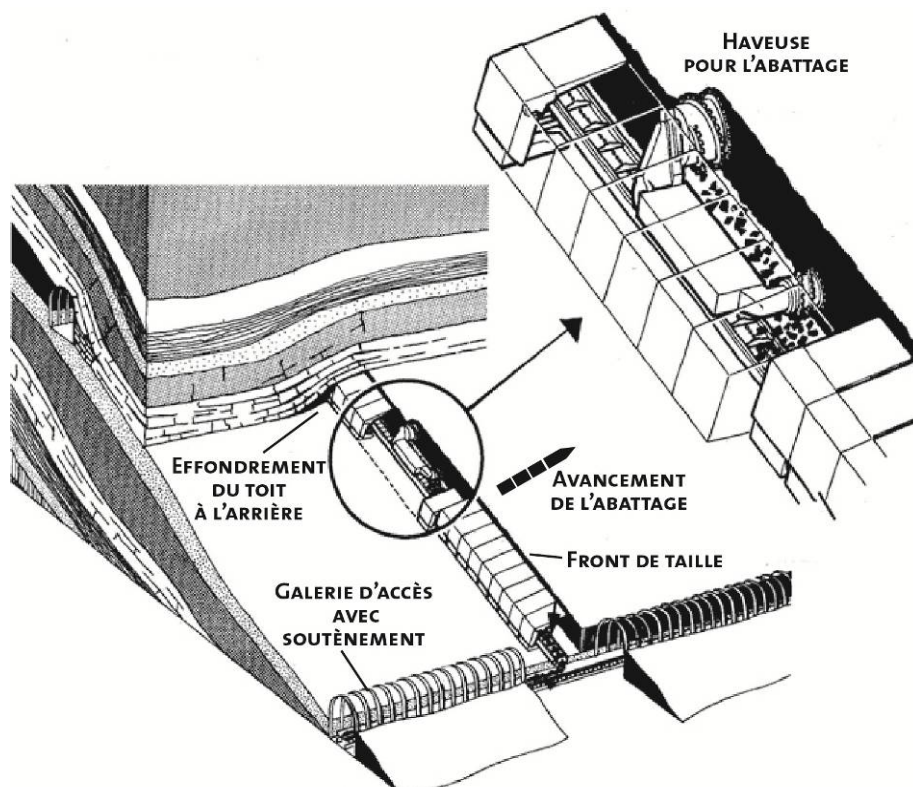


Figure 41 : La technique d'exploitation par tailles (modifié d'après Brady and Brown (1985), *Rock mechanics for underground mining*).

Annexe 2

Calcul de dimensionnement et stabilité

On différencie classiquement la notion de stabilité en deux concepts distincts :

- la stabilité locale (chute de pierres ou de blocs au sein d'une zone de travail) ;
- la stabilité globale (rupture/effondrement de tout ou partie d'un ou plusieurs quartiers d'une exploitation).

La stabilité locale concerne la sécurité immédiate des mineurs et relève principalement du dimensionnement adéquat des chantiers (largeur, hauteur, formes, etc.) au regard des contraintes qui s'y développent ainsi que du choix approprié des méthodes de soutènement des terrains (boulonnage, grillage, béton projeté, remblayage, etc.).

La stabilité globale peut mettre en péril, en plus de la sécurité immédiate des mineurs, l'intégrité des terrains de recouvrement et la sécurité des enjeux qui se trouvent en surface et condamner tout ou partie du gisement exploitable. Cette stabilité relève principalement d'un choix adapté de la nature et du dimensionnement de la méthode d'exploitation globale, au regard de la résistance des terrains et des contraintes qui s'appliquent en leur sein.

Il n'y a pas, à proprement parler, de méthode (ou de norme) universelle pour caractériser l'état de stabilité d'un massif rocheux. Le dimensionnement de chaque mine relève en effet principalement d'une conjonction de choix stratégiques visant à adopter les options les plus adaptées à l'environnement rencontré : nature et minéralisation (amas, filon, couche) du minerai, géologie et tectonique, méthode d'extraction retenue, extension et profondeur des travaux, présence de l'eau, etc.

Stabilité globale

Pour ce qui touche à la stabilité globale, le dimensionnement du projet repose sur des analyses détaillées de spécialistes en mécanique des roches qui s'appuient sur des modélisations du comportement à court, moyen et long terme des infrastructures minières (Figure 42). Qu'elles soient basées sur des approches analytiques, empiriques ou numériques, ces modélisations s'attachent généralement à couvrir un large panel de solutions techniques de manière à trouver le meilleur compromis entre le rendement de l'exploitation et la stabilité du massif. Les mécaniciens des roches raisonnent fréquemment en termes de « coefficient de sécurité » concept qui exprime la « réserve de sécurité » d'un ouvrage, c'est-à-dire le fait que sa résistance intrinsèque est suffisamment supérieure aux contraintes auquel il est soumis. Les calculs menés se doivent d'intégrer, entre autres, les trois paramètres fondamentaux suivants :

- nature géologique et caractéristiques géotechniques et structurelles du massif rocheux encaissant ;
- champ de contraintes rencontré dans l'environnement immédiat de la mine ;
- techniques de soutènement des terrains retenues pour consolider le massif exploité.

Les analyses doivent de fait s'appuyer sur une reconnaissance des conditions géologiques et géotechniques d'exploitation dont des campagnes appropriées de prélèvements, de caractérisation, de mesures in situ ainsi que sur des travaux de modélisation du comportement du massif.

Un autre paramètre également crucial vis-à-vis des calculs de stabilité est la gestion des incertitudes. En effet, le degré de connaissances du massif est variable selon la densité des investigations menées mais il ne sera jamais complet. Des incertitudes pèsent systématiquement sur les paramètres d'entrée des différents calculs et sont généralement gérées par des coefficients de sécurité adaptés (classiquement entre 1 et 1,4).

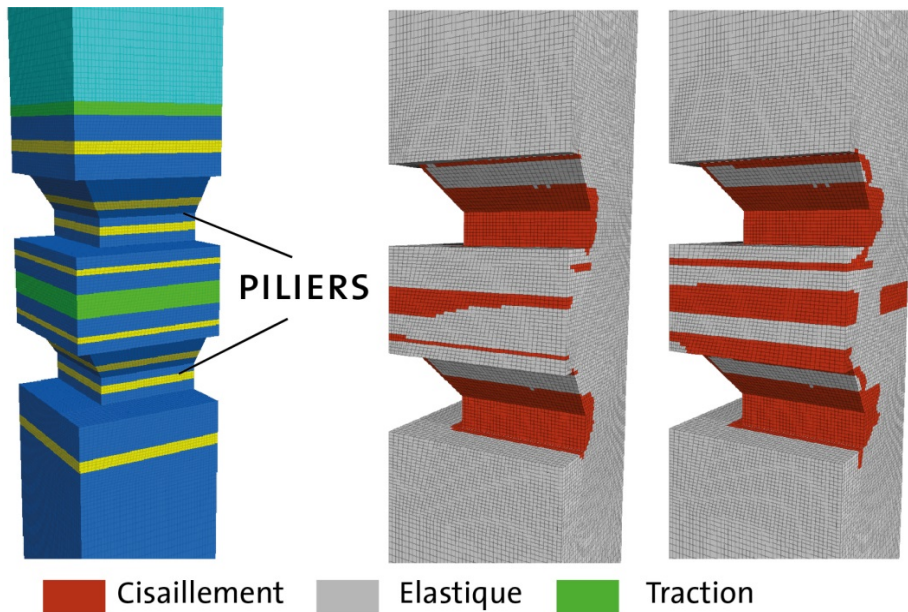


Figure 42 : Modélisation des zones de plastification par cisaillement des dans piliers d'une exploitation sur deux niveaux en fonction de différents paramètres géotechniques (Source : INERIS). Gauche : les différentes couleurs représentent différents matériaux.

Le dimensionnement défini, validé et mis en œuvre se doit d'être conforté par un mode opératoire de suivi visant à collecter des informations sur le comportement du massif et s'assurer que les hypothèses retenues dans la phase d'analyse sont bien conformes à la réalité (observations directes et/ou surveillance instrumentée, Figure 43). La conception, la mise en œuvre et l'exploitation de ce suivi dépendent étroitement du contexte, des objectifs et de la sensibilité de chaque exploitation.



Figure 43. Gauche : Centrale autonome d'acquisition surveillance de surface en Isère (Source : INERIS). Droite : Suivi de la convergence de piliers de sel au Maroc (Source : INERIS).

Stabilité locale

La stabilité locale relève pour sa part de l'état de l'art, d'une connaissance approfondie de l'environnement local (variations géologiques, failles, infiltration d'eau) et des techniques de soutènement les plus adaptées au contexte.

Sa gestion est, de fait, souvent confiée à des « chefs mineurs » ou des « ingénieurs sécurité » expérimentés. Ceux-ci se doivent de connaître parfaitement leurs chantiers et leur évolution au quotidien. Ils doivent être à l'écoute des remarques du personnel d'exploitation et sont chargés de mener des inspections régulières de l'état des ouvrages souterrains. Ils doivent réagir, dans les meilleurs délais, pour adapter le schéma d'exploitation ou de soutènement aux variations rencontrées à l'avancée des travaux.

Cas particulier des « coupes de terrain »

L'un des défis majeurs en termes de stabilité des ouvrages souterrains relève de la prévision et de la prévention des phénomènes dynamiques de type « coups de terrain (ou *rockburst* en anglais) » au sein d'exploitation appelées à devenir de plus en plus profondes et, par là-même, potentiellement de plus en plus dangereuses (du fait de l'accroissement des pressions).

Les calculs, évoqués précédemment, de dimensionnement d'une exploitation (stabilité générale) et de gestion quotidienne de la sécurité des chantiers (stabilité locale) se basent sur une approche statique de la mécanique des roches et s'appuient sur de solides expériences et savoir-faire. La problématique des phénomènes dynamiques s'avère en revanche nettement plus complexe et fait l'objet de nombreux travaux de recherche, aussi bien en Europe (projet I2Mine) que dans les autres grands secteurs miniers internationaux (Australie, Afrique du Sud, Canada...).

On appelle « coup de terrain », une rupture des terrains, présentant un caractère « explosif », qui se développe dans l'environnement immédiat d'une exploitation souterraine et qui résulte d'une trop forte concentration de contraintes au regard de la résistance du massif rocheux. La rupture de la zone surcontrainte induit un relâchement instantané ou très rapide de l'énergie accumulée qui peut se traduire par une projection de massif broyé au sein des vides excavés jusqu'à engendrer la fermeture totale des travaux. Le phénomène s'accompagne classiquement du déclenchement de phénomènes sismiques associées qui peuvent atteindre des magnitudes élevées.

Le caractère soudain et brutal des coups de terrain, associé à l'absence fréquente de signes précurseurs au niveau des chantiers contribuent à rendre ces phénomènes potentiellement dévastateurs très difficile à prévoir.

D'importants travaux sont menés de par le monde pour améliorer la compréhension, la prévision et la maîtrise de ce type de phénomènes. La démarche intégrée de prévention pour améliorer la compréhension, la prévision et la maîtrise de ce type de phénomènes s'appuie principalement sur les trois éléments suivants :

- caractérisation préalable du milieu : état de dégradation du massif et des ouvrages existants (le cas échéant), identification du champ de contraintes, analyse tectonique du secteur (notamment les principales failles), caractérisation de la résistance du massif à un chargement dynamique, etc.
- identification des zones les plus sensibles au déclenchement du phénomène : collecte d'informations au travers de réseaux de surveillance (microsismicité, mesures

de variations de contraintes, déplacements, etc.), modélisation numérique du comportement dynamique du massif rocheux, etc.

- mise en œuvre de mesures préventives : adaptation du dimensionnement des travaux, tirs de détente, soutènement adapté aux phénomènes dynamiques, mise en œuvre d'alertes liées à l'exploitation des réseaux de surveillance (détection de signaux précurseurs), etc.

COLLECTION « LA MINE EN FRANCE »

Tome 1 - Industrie minérale et activité minière en France

Tome 2 - Législation et réglementation minière

Tome 3 - Projet minier et parties-prenantes

Tome 4 - Exploration minière

Tome 5 - Développement, financement, construction

Tome 6 - Exploitation minière et traitement des minerais

Tome 7 - Fermeture, reconversion et gestion de l'après-mine

Tome 8 - Exploration et exploitation minière en Guyane

Tome 9 - Le concept de «mine responsable». Parangonnage des initiatives mondiales

Tome 10 - Mines européennes. Quelques exemples de mines de métaux

Tome 11 - Sondages miniers

Tome 12 - Bonnes pratiques de l'activité minière

Tome 13 - Lexique

www.mineralinfo.fr

