Collection « La mine en France »

Fermeture, Reconversion & Gestion de l'après-mine

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, ET DES FINANCES

Géosciences pour une Terre durable
brgm

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Mine & Société
Réseau d'excellence

TOME 7

Collection « La mine en France »

Fermeture, reconversion et gestion de l'après-mine

Tome 7

Février 2017

Poulard F., Gombert P., Didier C., Chevrel S., Bellenfant G., Cottard F.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE, ET DES FINANCES

Géosciences pour une Terre durable
brgm

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Mine & Société
Réseau d'excellence

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 : fermeture de la mine, reconversion, après-mine, méthodes, techniques, impacts, solutions, bonnes pratiques.

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

Poulard F., Gombert P., Didier C., Chevrel S., Bellenfant G., Cottard F. (2017) – Fermeture, reconversion et gestion de l'après-mine. Collection « La mine en France ». Tome 7, 67 p., 33 fig., 2 ann.

Sommaire

1. Préambule 9

2. Les méthodes de fermeture d'une mine 11

2.1. CAS PARTICULIER DES TRAVAUX D'EXPLORATION 11

2.2. L'EXPLOITATION SOUTERRAINE (TRAVAUX MINIERS SOUTERRAINS : TMS) 12

2.3. EVALUATION DES IMPACTS RESIDUELS 13

Examen des impacts socio-économiques 14

Analyse des impacts résiduels sur l'eau 14

Evaluation des risques environnementaux liés aux dépôts de stériles et de résidus de traitement 15

Evaluation des effets sur la qualité des sols 15

Etude de stabilité géotechnique 16

Analyse des potentialités d'émissions de gaz 18

2.4. MODES DE TRAITEMENT ET MESURES DE MITIGATION 19

Assouplir les conséquences socio-économiques 19

Minimiser les impacts résiduels sur les eaux souterraines et de surface 19

Réduire les impacts environnementaux liés aux dépôts de stériles et de résidus de traitement 20

Réduire les risques résiduels de mouvements de terrain liés aux zones d'activités minières 22

Assurer une fermeture efficace et durable des accès (ODJ : ouvrages débouchant au jour) 25

Minimiser ou supprimer les migrations de gaz de mine 26

2.5. MESURES DE REAMENAGEMENT 27

3. Les techniques pour gérer l'après-mine 29

3.1. SOLUTIONS DE RECONVERSION DE MINES 29

3.2. METHODE DE SUIVI/SURVEILLANCE 31

3.3. POLITIQUE DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS 34

4. Les impacts socio-économico-environnementaux de la fermeture de mine 35

5. Les bonnes pratiques de fermeture de mine 37

5.1. ASPECTS SOCIETAUX 37

5.2. LISIBILITE DES ETUDES 37

5.3. STRUCTURE ET CONTENU DES ETUDES 38

5.4. MISE EN ŒUVRE DES SOLUTIONS DE TRAITEMENT ET DE REAMENAGEMENT . 38

5.5. COUTS DE FERMETURE 40

6. Les bonnes solutions pour gérer l'après-mine 41

6.1. SOLUTIONS DE RECONVERSION DE MINE 41

6.2. METHODE DE SURVEILLANCE 41

6.3. FINANCEMENT DE L'APRES-MINE 42

7. Références 43

Liste des figures

Figure 1 : Phénomène d'affaissement (cavités souterraines), Projet UNIT RMDI (Source : Ecole des mines d'Alès) 17

Figure 2 : Logigramme décisionnel du choix de la méthode de traitement d'un ouvrage débouchant au jour (Source : INERIS). 18

Figure 3 : Phytoextraction du zinc dans des résidus miniers par des Noccaea caerulescens, site de Saint-Laurent-le-Minier, Gard (Source : ©CNRS). 20

Figure 4 : Plantation de graminées sur terril de stériles d'exploitation, Aveyron (Source : INERIS) 22

Figure 5 : Remblayage hydraulique partiel en carrière, Valenciennes, Nord (Source : INERIS). 23

Figure 6 : Renforcement de piliers, mine de sel, Haut-Rhin (Source : INERIS) 23

Figure 7 : Pose de grillage et de boulons en carrière, Côte-d'Or (Source : INERIS). 24

Figure 8 : Pose de géogrilles sur dépôts miniers, Pologne (Source : www.bam.de). 25

Figure 9 : Dôme en acier du coffrage du bouchon de béton à Auchy-au-Bois, Nord-Pas-de-Calais, (Source : Charbonnages de France). 26

Figure 10 : Events / Sondage de décompression, Nord (Source : INERIS) 27

Figure 11 : Misée mine souterraine, Hautes-Alpes (Source : www.minesdargent.sitew.com). 31

Figure 12 : Matériel de scanner 3D pour appuyer les inspections géotechniques , mines de sel, Moselle (Source : INERIS). 32

Figure 13 : Rendu de scanner 3D en carrière, Oise (Source : INERIS). 33

Figure 14 : Image haute résolution Ikonos montrant une contamination des eaux de surface dûe à des fuites sur un pipeline de transport de résidus miniers, East Rand en Afrique du Sud (Source : BRGM). 33

Figure 15 : Dôme en acier du coffrage du bouchon de béton à Auchy-au-Bois, Nord-Pas-de-Calais (Source : Charbonnages de France). 47

Figure 16 : Schéma de principe d'un bouchon dit de Champagne (Source : INERIS). 48

Figure 17 : Remblayage d'entrée de galerie, Hautes-Alpes (Source : INERIS) 49

Figure 18 : Caméra haute résolution en forage (Source : INERIS). 54

Figure 19 : Matériel de scanner 3D, mines de sel, Haut-Rhin (Source-INERIS). 54
Figure 20 : Rendu de scanner 3D en carrière, Oise (Source : INERIS). 54
Figure 21 : Centre de survaillance (Source : http://cenaris.ineris.fr). 55
Figure 22 : Balises GPS RTK (Real Time Kinematic) (Source : INERIS). 56
Figure 23 : Sonde microsismique de paroi (Source : INERIS). 57
Figure 24 : Vitesse moyenne de déformation mesurée par interférométrie Radar sur la commune de Hilsprich (Source : http://www.brgm.fr/projet/mesure-deformation-sol-sur-commune-hislprich-interferometrie-radar). 58
Figure 25. Gauche-Haut : MNE Lidar. Droite-Gauche : MNE ombré. Gauche-bas : MNT LiDAR. Droite-bas : MNT ombré (Source : BRGM). 59
Figure 26 : Perturbations de surface et subsidence liés à l'exploitation souterraine de charbon par chambres et piliers, bassin houiller du Mpumalanga, Afrique du Sud. En rouge le profil de la Figure 27. Source : BRGM. 60
Figure 27 : Profil topographique nord-sud montrant les figures de subsidence et photographie de terrain (Source : BRGM). 60
Figure 28 : Image Ikonos (résolution 1 m) montrant une contamination des eaux de surface par un chenal de décharge à East Rand, Afrique du Sud (Source : BRGM). 61
Figure 29 : Image Ikonos montrant une contamination des eaux de surface dûe à des fuites sur un pipeline de transport de résidus miniers à East Rand, Afrique du Sud (Source : BRGM).61
Figure 30 : Modélisation d'une possible contamination du réseau hydrographique à partir d'une fuite au pied d'une digue d'un bassin à résidus miniers, Mine de Makmal, Kyrgyzstan (Source : BRGM). 62
Figure 31 : Modélisation de l'extension maximale probable d'une lame de boue d'épaisseur constante de 5 km, Min de Makmal, Kyrgyzstan (Source : BRGM). 63
Figure 32 : Comparaison entre la carte des minéraux du drainage minier acide obtenue par imagerie hyperspectrale et la carte de terrain des résidus miniers, Mine de Sao Domingos, Portugal (Source : BRGM). 64
Figure 33 : Ratio U/Th >1 superposé à une image Spot (Source : BRGM). 65

Liste des annexes

Annexe 1 Techniques de fermeture des ODJ 45
Annexe 2 Différentes méthodes de suivi / surveillance en après-mine 51

1. Préambule

Les différentes méthodes et techniques détaillées dans les paragraphes suivants et qui seront mises en place au cours de la fermeture d'une mine ou lors de l'après-mine ont été pré-dimensionnées lors des études économiques et de construction de la mine (Cf. Tome 5). Elles ont été enrichies voire modifiées pendant la phase d'exploitation au travers de la connaissance toujours plus détaillée du site (fonctionnement hydraulique en particulier, mais aussi variation géologique en nature et en teneur du minerai abattu, morphologie du gisement, changement de procédés de traitement, etc.). Ainsi, les techniques finalement mises en place ne sont pas simplement issues de réflexions en fin de vie de la mine mais résultent également de réflexions et d'études amont.

2. Les méthodes de fermeture d'une mine

À l'arrêt de travaux miniers et des installations minières, l'exploitant[1] :

- Dresse le bilan de l'exploitation minière :
  - état des lieux et synthèse des contextes ;
  - évaluation des impacts et des risques résiduels.
- Propose, définit et met en œuvre des moyens et des méthodes afin de :
  - faire cesser les désordres et les nuisances de toute nature liés à la mine (mise en sécurité) ;
  - démanteler les installations et réaménager le site minier ;
  - surveiller et prévenir les risques résiduels (dans la mesure où de tels risques persisteraient malgré la mise en place de traitement adaptés).

L'importance des études à entreprendre doit tenir compte des contextes géologiques, hydrogéologiques ainsi que des travaux d'exploitation et des enjeux présents. Après une présentation synthétique de l'historique et du contexte d'exploitation, l'exploitant établit, en concertation avec les parties prenantes, un bilan (qualitatif et quantitatif) des impacts résiduels que les travaux ont induits sur l'environnement et propose des mesures de réduction adaptées. Il doit ensuite évaluer les conséquences à long-terme de la situation résultant de l'arrêt des travaux sur le milieu environnant. Enfin, au vu de ces risques résiduels, il définit et propose éventuellement les mesures compensatoires qui lui semblent les plus adaptées au site.

Ces documents sont généralement compilés au sein d'un dossier unique dit « étude d'arrêt de travaux miniers » dont la mise en œuvre peut revêtir un caractère lourd et délicat (cette complexité est généralement minimisée par l'anticipation et la progressivité des réflexions relatives à la fermeture tout au long de la vie du projet minier).

2.1. CAS PARTICULIER DES TRAVAUX D'EXPLORATION

Les principes généraux énoncés ci-avant et détaillés ci-après sont bien évidemment applicables aux travaux d'exploitation et de traitement des minerais mais également aux seuls travaux d'exploration (Cf. Tome 4) :

- Dresser le bilan de l'exploration (synthèse des contextes et évaluation des impacts et des risques résiduels) ;
- Proposer, définir et mettre en œuvre des moyens et des méthodes afin de faire cesser tous les désordres et les impacts de toute nature liés à l'exploration, démanteler les installations, réaménager le site minier, surveiller et prévenir les risques résiduels.

Certaines analyses et études seront moins denses lorsqu'elles concernent uniquement des travaux d'exploration que lorsqu'elles visent des travaux d'exploitation. C'est le cas notamment des études de stabilité géotechniques pour des forages de reconnaissance. À l'inverse, d'autres parties peuvent être tout aussi importantes qu'elles concernent des travaux d'exploration ou des

[1] Idéalement, les exploitants fournissent ces études, juste avant l'arrêt des travaux. Dans certains spécifiques, où une mine ferme soudainement suite, notamment, à une chute imprévue des cours de minerai, ces études pourraient être fournies a posteriori.

travaux d'exploitation. C'est le cas de l'évaluation des impacts sur l'eau qui peut revêtir un caractère crucial vis-à-vis des seuls forages de reconnaissance.

2.2. L'EXPLOITATION SOUTERRAINE (TRAVAUX MINIERS SOUTERRAINS : TMS)

Les thèmes abordés sont nombreux et variés et il n'est pas rare qu'ils interfèrent entre eux. Il s'agit généralement de produire : une synthèse géologique, une synthèse hydrologique et hydrogéologique, une description exhaustive et synthétique des travaux miniers réalisés (exploration, extraction, traitement du minerai et dépôts de stériles et de résidus de traitement) et une description de la biodiversité du site.
Du fait de la complexité et de l'ampleur des problèmes à traiter, il est intéressant pour les exploitants et/ou les bureaux d'études en charge de ces dossiers :

- Compiler ces données de manière progressive et évolutive depuis les phases exploratoires de la mine jusqu'à l'arrêt des travaux ;
- Suivre une synthèse chronologique :
  - Rapport géologique ;
  - Synthèse des travaux miniers ;
  - Rapport hydrologique et hydrogéologique ;

La synthèse sur la biodiversité est relativement plus déconnectée des précédentes et peut être menée indépendamment ou en parallèle.

On débute généralement les études par la synthèse du contexte géologique du gisement exploité. Cette analyse est de première utilité pour la synthèse des travaux miniers et l'étude hydrogéologique qui doivent débuter juste après. Il est préférable que la synthèse géologique soit entreprise sur l'intégralité du gisement mais, dans le cas où il existe des configurations variées ou des impératifs de calendrier, elle peut être réalisée secteur par secteur. Cette étude doit récapituler toute la connaissance acquise sur la minéralogie primaire des minéralisations et leurs conséquences environnementales potentielles (signature géochimique, comportements sur le long terme, etc.). Un chapitre particulier doit être mis en exergue sur les données disponibles concernant le Fond Géochimique Naturel, FGN, notamment à partir des données de l'exploration et de l'Etat Initial (eaux, sols, sédiments, etc.). Pour une bonne compréhension, cette synthèse comporte, en nombre suffisant, des coupes verticales ainsi que des coupes horizontales du gisement.

Parallèlement à la synthèse géologique, on initialise généralement la synthèse des travaux d'exploitation. L'objectif de cette synthèse est de recenser l'ensemble des informations disponibles sur les travaux miniers (localisation, techniques d'extraction, dates d'exploitation, etc.) et des installations annexes (usine de traitement, dépôts de stériles ou de résidus de traitement miniers, etc.). Comme pour la synthèse géologique, il est souhaitable de mener l'analyse sur l'ensemble du gisement mais celle-ci peut être entreprise secteur par secteur, s'il existe des priorités dans la constitution des différents dossiers. La synthèse des travaux miniers doit déboucher sur la constitution de plans de synthèse des travaux, qui auront été recalés par rapport à la surface. Ces plans sont indispensables à la réalisation des études spécifiques qu'il convient de mener à bien dans la suite de la démarche.

Dès que la synthèse des travaux miniers est bien avancée, la synthèse hydrologique et hydrogéologique de l'environnement de l'exploitation peut commencer. Suivant le type d'exploitation, les bilans de cette synthèse peuvent influencer les autres études à entreprendre

par la suite (stabilité des terrains, gaz de mine, traitement des ODJ, des fosses, traitement des émergences, dimensionnement de la surveillance post fermeture, etc.).
Les résultats de ces quatre synthèses sont indispensables pour l'ensemble des travaux et études qu'il convient de réaliser dans la suite de la démarche. Il est donc souhaitable de l'entreprendre de manière exhaustive, détaillée et transparente.

2.3. EVALUATION DES IMPACTS RESIDUELS

À l'image de l'état des lieux précédent, les évaluations des impacts résiduels ne doivent pas uniquement s'envisager en phase de fermeture des mines mais être menées dès le dimensionnement initial, lors de l'étape de construction de la mine (Tome 5), et être régulièrement mises à jour au cours de l'exploitation (Tome 6) pour être compilées et synthétisées lors de la fermeture du site (concept de « Design to close »).

La démarche d'évaluation des impacts résiduels doit être étendue à l'ensemble des thèmes suivants :

- Tissus économiques et sociaux locaux (nombre d'emploi impactés, type d'aides ou de soutiens associatifs menacés, etc.) ;
- Eaux superficielles et souterraines (modifications hydrologiques ou hydrogéologiques, perturbation du réseau hydrographique et des eaux souterraines, impacts sur la qualité des eaux, drainages miniers, localisation des émergences, etc.) ;
- Sols et les sédiments (perturbations de la qualité des sols et des sédiments) ;
- Propriétés géotechnique et géochimique des ouvrages de stockage de stériles et de résidus de traitement minier et des mines à ciel ouvert, tels que les talus de verses, de fosses, les banquettes et les digues (glissement, écroulements, drainage minier acide, etc.) ;
- Biodiversité (effets sur la faune et flore) ;
- Stabilité des terrains (affaissements, effondrements, éboulements, glissements, etc.).
- Qualité de l'air (présence de gaz de mine, émission ou accumulation de gaz dangereux, etc.) ;
- Sites et installations de surface indispensables à l'exploitation (bâtiments, chevalements, infrastructures de surface, etc.) en termes d'intégration paysagère et de stabilité géotechnique.

Chacun de ces thèmes relève d'intérêts et d'obligations diverses : la préservation de l'environnement, la sécurité et la salubrité publiques, la solidité des édifices publics et privés, la conservation des voies de communication, le patrimoine archéologique, les activités industrielles et agricoles, les intérêts socio-économiques locaux.

Il s'agit donc pour l'exploitant de faire connaître les mesures qu'il envisage de mettre en œuvre pour faire cesser ou réduire de manière définitive les désordres et nuisances de toute nature engendrés par ses activités.

Enfin, les évaluations d'impacts résiduels peuvent nécessiter une analyse des risques sanitaires (pour la santé humaine) dans les cas où des enjeux importants en termes de population existeraient à proximité.

Quelques-unes des analyses envisageables sont détaillées ci-après.

Remarque : une approche intéressante, qui vient des Australiens, est l'évaluation et la gestion de la fermeture d'une mine par domaines (*Domain model*). L'idée est de mener les études en divisant le site en zones/domaines spécifiques. Chaque domaine étant traité comme une entité à part avec son propre plan de fermeture.

Examen des impacts socio-économiques

L'anticipation et la préparation de l'arrêt des activités minières sont indispensables pour limiter la réduction du nombre d'emplois (directs et indirects) et une diminution de l'activité économique locale. En ce sens, l'industrie minière n'est pas différente des autres activités économiques. Sauf aléa économique, lié aux prix des matières premières par exemple, elle peut même présenter l'avantage de connaître à l'avance l'échéance de la fin d'activité.

A l'inverse, une diversification des revenus, des activités, des emplois et des personnels de la mine, en amont de sa fermeture et en étroite collaboration avec les parties prenantes, peuvent conduire à conserver voire à relancer l'activité socio-économique à l'arrêt des travaux.

Dans tous les cas, l'exploitant quantifie de manière réaliste ces conséquences et en définit un planning. Il propose des mesures pour ménager le tissu socio-économique qu'il a créé par son exploitation : programme de réorientation salariale, aide à la reconversion, propositions d'emplois sur d'autres sites notamment.

Par ailleurs, il s'agit de considérer les modifications induites par la fermeture de la mine sur le milieu naturel concerné par une activité socio-économique. Ainsi, à titre d'exemple, les modifications des prélèvements en eau dans les réservoirs miniers à l'arrêt des travaux (arrêt des pompages d'exhaure ou réutilisation des eaux de mine) peuvent impacter, positivement ou négativement, les autres usages de ces eaux (usage industriel ou potable ou agricole notamment).

Analyse des impacts résiduels sur l'eau

Cette analyse est délicate et souvent fondamentale pour l'élaboration des études d'arrêt de travaux miniers. Elle doit être menée par des spécialistes qui détermineront notamment l'extension de la zone d'étude. L'étude doit en effet être menée à l'échelle d'une entité hydrogéologique cohérente et ne pas se limiter au découpage administratif ou d'exploitation du secteur analysé. Dans le cas des grands bassins sédimentaires, l'analyse peut ainsi s'étendre sur un voire plusieurs bassin(s) versant(s). Pour que les données soient aussi complètes que possible et que l'analyse soit fondée, l'analyse des impacts se base sur des mesures réalisées avant (état « 0 » ou initial) et pendant l'exploitation. Un des objectifs de ces études est de définir le niveau stabilisé d'eau dans les travaux miniers après la fin d'exploitation (plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour y parvenir).

L'exploitant dresse ainsi le bilan des effets à long-terme des travaux sur la présence, l'écoulement et la qualité des eaux de toute nature (souterraines, superficielles ainsi que celles produites par le site minier).

L'exploitant évalue ensuite les conséquences de l'arrêt des travaux ou de l'exploitation sur la situation ainsi créée et sur les usages de l'eau, du point de vue quantitatif et qualitatif, en référence à un état 0 du site (établi avant l'exploitation minière) :

- Remontée de nappe et ennoyage des travaux ou rabattement permanent (drainage, pompage, débordement en point bas) ;
- Création de sources, de points de débordements ou de zones marécageuses ;
- Modification des bassins versants ou des écoulements hydrologiques et/ou hydrogéologiques ;
- Drainage minier acide (DMA) et mises en solutions d'éléments minéraux et métalliques (notamment le fer, le manganèse et les éléments traces métalliques (Pb, Zn, Ni, etc.) et métalloïdes (As, Sb, etc.)) ;
- Modification des caractéristiques physico-chimiques de l'eau (pH, conductivité, potentiel redox, turbidité, concentration en oxygène dissous, etc.).

L'exploitant synthétise ensuite les mesures qu'il a adoptées pour gérer ces impacts au cours de l'exploitation et les éventuelles mesures complémentaires qu'il envisage pour y remédier ou les limiter : création de couverture des dépôts de résidus miniers, suivi de l'ennoyage, réalisation d'ouvrages de drainage des zones de travaux miniers, fixation des éléments chimiques libérés sur des végétaux (phyto-remédiation), collecte/réutilisation des eaux, etc. Il définit enfin les éventuels paramètres et indicateurs quantitatifs et qualitatifs à suivre dans le temps afin de garantir la pérennité des mesures proposées.

Evaluation des risques environnementaux liés aux dépôts de stériles et de résidus de traitement

Pour les zones de dépôts de stériles et de résidus de traitement, l'eau constitue généralement à la fois l'un des éléments à l'origine de la pollution (percolation des eaux météoriques) et le vecteur par lequel cette pollution se transmet au milieu environnant (infiltration dans les nappes phréatiques, rejets dans les cours d'eau).

L'exploitant évalue donc les potentialités d'infiltration et de ruissellement des eaux météoriques en intégrant les valeurs de précipitation correspondant à des évènements remarquables (pluie centennale par exemple) et en tenant compte de la sensibilité du site. Ces potentialités sont ensuite croisées avec les données de caractérisation des stériles et des résidus de traitement (gitologie, minéralogie, paragénèse et mode de traitement du minerai), afin d'en déduire l'existence potentielle d'aléas.

L'impact géochimique principal va être lié au potentiel de drainage minier acide qui sera dépendant de la présence de matériaux générateurs (sulfures) et de matériaux tampons (carbonates) et de la cinétique de réaction de ces matériaux

Pour bien anticiper ces études d'impacts l'exploitant réalise les tests nécessaires sur les matériaux (bilan matériaux générateurs de DMA et de matériaux tampons ainsi que tests cinétiques) ainsi que des études minéralogiques et géochimiques dès les stades préliminaires du projet minier et au fur et à mesure de l'exploitation.

Si besoin, l'exploitant propose des mesures pour réduire ces impacts résiduels : mettre en place des réseaux de drainage des eaux de surface en amont des dépôts, canaliser et traiter les eaux polluées en aval de dépôt, couvrir les dépôts (ennoyage, couverture évapotranspirante, stockage final des résidus à potentiel de DMA avec couverture de matériaux tampons, etc.)

Evaluation des effets sur la qualité des sols

Plusieurs zones d'activité minière peuvent être sujettes à un potentiel impact sur la qualité des sols, notamment :

- les zones de dépôts ou de déversement de minerai, de stériles et de résidus de traitement. Les environs immédiats des dépôts peuvent également être concernés (problèmes d'érosion gravitaire des dépôts et de leur couverture et du transport particulaire vers les sols) ;
- les zones de travaux à ciel ouvert décapées ;
- les sédiments des cours d'eau concernés par l'exhaure minière et les ruissellements sur les dépôts ;
- les zones de retombées d'envols de poussières (issues de la mine ou des dépôts de stériles et de résidus de traitement).

L'exploitant synthétise les modes de gestion de ces zones d'activité qu'il a mis en place au cours de la vie de la mine (localisation, nature, quantité, qualité, etc.). L'exploitant évalue ensuite les conséquences de l'arrêt des travaux sur la situation ainsi créée et sur les usages de ces sols, en référence à un état 0 du site (établi avant l'exploitation minière). Si besoin, il propose des mesures pour limiter les effets résiduels : réutilisation et valorisation possible, couvertures adaptées des zones de dépôts de stériles et de résidus de traitement, décaissement-déplacement-traitement des sols pollués notamment.

Etude de stabilité géotechnique

Il s'agit de projeter à long-terme[2] le devenir géotechnique des différents ouvrages et zones de travaux miniers érigés au cours de l'exploitation du site. Toutes les zones de travaux miniers sont prises en compte : cavités souterraines ou à ciel ouvert, puits, galeries et sondages débouchant au jour, zone de dépôts surfacique (verses, digues de résidus, terrils, etc.) ainsi que les infrastructures annexes : bureaux, chevalements, etc.

L'approche est basée sur la comparaison des caractéristiques des différents matériaux constitutifs de ces ouvrages avec les contraintes auxquelles ils sont, et seront, soumises. Cette comparaison permet ainsi de déceler l'existence de travaux dont la stabilité à long terme ne peut pas être garantie, d'autres certainement stables. L'évaluation des caractéristiques intègre des facteurs de vieillissement, de fatigue et d'effet de l'eau analysés à partir des synthèses et analyses géologique et hydrogéologique précédentes. Les contraintes dans les édifices dépendent quant à elles des configurations du site : géométrie, profondeur, structure tectonique, etc. L'étude de stabilité est donc généralement menée par regroupement de secteurs homogènes (secteurs qui présentent des configurations sensiblement similaires).

En cas de potentialités de ruptures des édifices miniers, les conséquences dommageables sont également identifiées : fontis, affaissement (Figure 1), tassements, glissements, etc.

Ce type d'étude requiert également un haut niveau d'expertise et est réalisé par des bureaux d'études spécifiques.

[2] De l'ordre de 100 à 300 ans.

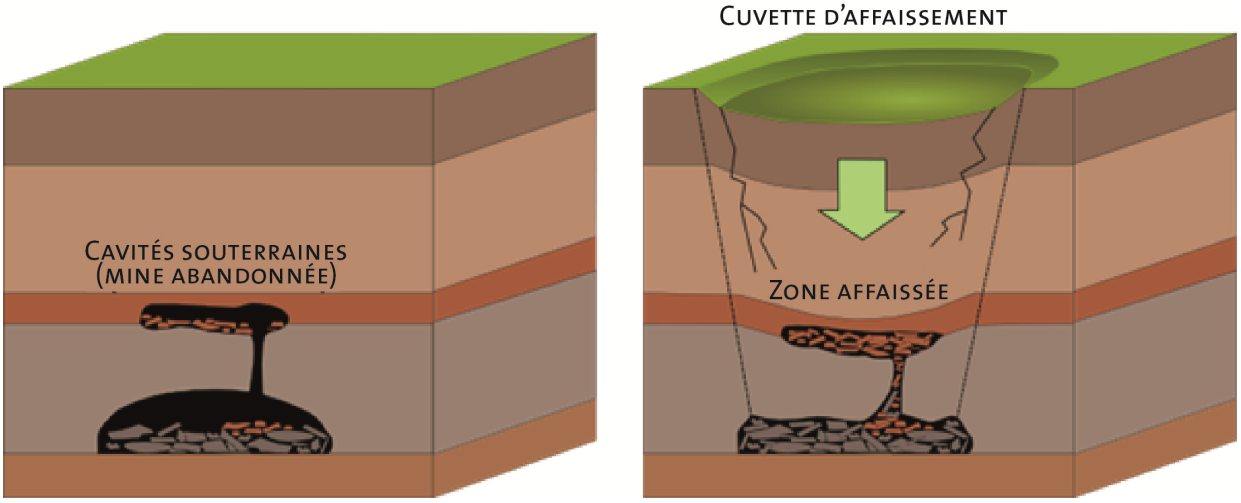

Figure 1 : Phénomène d'affaissement (cavités souterraines), Projet UNIT RMDI (Source : Ecole des mines d'Alès).

L'exploitant synthétise ensuite les mesures et les traitements qu'il compte adopter pour gérer ces impacts résiduels éventuels (remblayage de cavités souterraines (en intégrant la problématique de la gestion des circulations des fluides : gaz ou eaux de mine), renforcement d'ouvrages souterrains ou de surface, surveillances et contrôle géotechniques, etc.).
Dans le cas particulier des ouvrages débouchant au jour (puits ou entrées de galeries), l'exploitant propose systématiquement des méthodes de mise en sécurité afin de :

- prévenir tout risque résiduel lié à des mouvements de terrains (affaissements, effondrements ou tassements) pouvant entraîner des dégâts sur les structures existantes ou futures présentes dans la zone d'influence ;
- empêcher toute chute à l'intérieur des anciens puits ou descenderies ;
- interdire toute tentative d'intrusion dans les travaux miniers ;
- mais également :
    - assurer le contrôle des dégagements gazeux dans l'atmosphère ;
    - éviter la pollution des aquifères souterrains exploités pour les besoins en eau potable ;
    - ne pas générer de risques de résurgences d'eau non contrôlés ou en site sensible ;
    - présenter des garanties de pérennité et de stabilité à long-terme ;
    - préserver la faune et notamment les espèces protégées.

Différents modes de traitement existent, parmi les plus courants : le comblement et/ou les bouchons de puits, le remblayage de l'entrée des descenderies…
Le choix du mode de traitement approprié est basé sur la prise en compte de divers paramètres (voir figure suivante pour les ODJ [5], Figure 2).

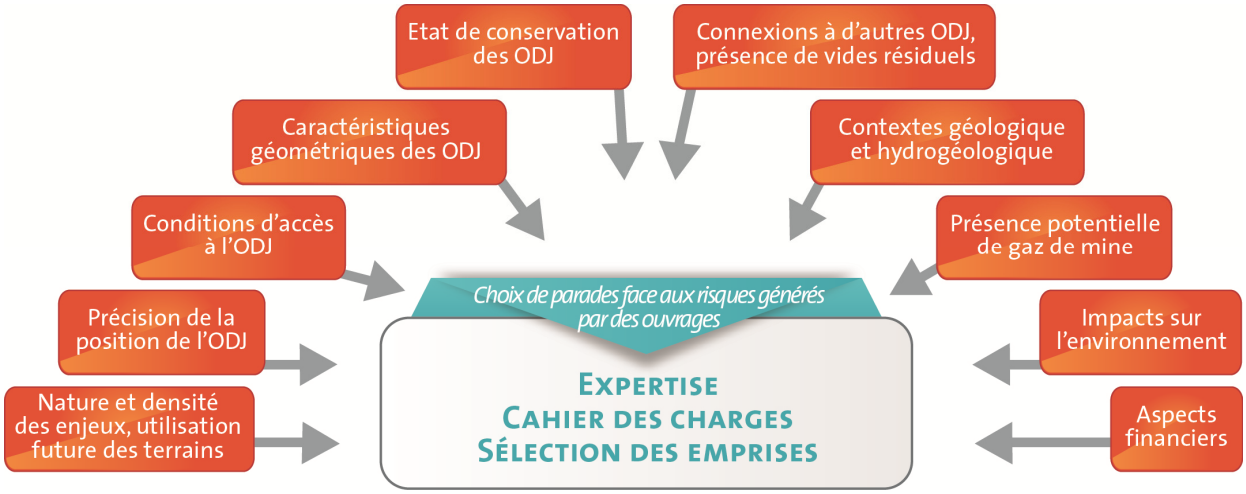

Figure 2 : Logigramme décisionnel du choix de la méthode de traitement d'un ouvrage débouchant au jour (Source : INERIS).

En outre, dans le cas de secteurs probablement instables et en fonction des enjeux, l'exploitant propose des mesures pour supprimer ou prévenir les risques résiduels : technique de remblayage, de renforcement de structures, de suppression des vides, etc. Il définit enfin les éventuels paramètres et indicateurs à suivre dans les temps afin de garantir la pérennité des mesures proposées.

Analyse des potentialités d'émissions de gaz

Certaines mines sont connues, ou suspectées, de produire des gaz de mine et ce même après la fermeture des travaux miniers. Dans ces cas, une analyse des potentialités de gaz doit être menée après l'étude hydrogéologique (niveau définitif de la nappe requis) et, si possible, après l'étude de stabilité (stabilité à terme des cavités pour estimer et localiser les volumes des vides miniers résiduels restant hors d'eau qui constituent un potentiel réservoir de gaz).

Cette étude doit tenir compte de l'ensemble des gaz susceptibles de se dégager, notamment le gaz carbonique, le monoxyde de carbone, l'hydrogène sulfuré, le méthane ou le radon. La liste des gaz à considérer dépend principalement de la nature de la substance exploitée et des encaissants mais également des caractéristiques des aquifères et de la typologie des ouvrages miniers et des procédures de fermeture. Pour que les données soient aussi complètes que possible, l'idéal est de disposer de mesures réalisées avant et pendant l'exploitation.
Il est préférable de réaliser ce type d'étude pour des ensembles homogènes et connectés vis-à-vis des circulations de gaz (sur la base de critères géologiques et d'exploitation), on parle également de réservoir minier.

Dans le cas de secteurs soumis à des risques résiduels notables d'émission de gaz de mine et en fonction des enjeux, l'exploitant propose des mesures pour réduire ou supprimer ces effets résiduels : implantation de sondages de décompression, collecte/valorisation des gaz, etc. Il définit également les éventuels paramètres et indicateurs à suivre dans les temps afin de garantir la pérennité des mesures proposées.

2.4. MODES DE TRAITEMENT ET MESURES DE MITIGATION

Le processus de fermeture d'une mine est la conversion d'une mine en exploitation à une mine fermée, de manière ordonnée, sûre et respectueuse de l'environnement. Les écosystèmes des zones perturbées par les activités de la mine doivent être fermés et restaurés voire remis dans un état correspondant à un environnement sain qui se prête à l'activité humaine. Cette phase nécessite la mise en œuvre de techniques de traitement visant à maîtriser, minimiser, voire supprimer la gravité des phénomènes redoutés :

- soit en rendant impossible leur occurrence (dans certaines limites) ;
- soit en réduisant leurs effets potentiels.

Assouplir les conséquences socio-économiques

Les techniques permettant de minimiser ces impacts socio-économiques incluent notamment de :

- anticiper et planifier la fermeture ;
- étudier toute les alternatives possibles aux suppressions d'emplois et à toute perte sèche d'activité (il peut s'agir de proposer des replacements de salariés sur d'autres sites miniers ou d'autres projets miniers). Une spécificité des sites miniers est également de pouvoir être réutilisés et ainsi être source de nouveaux emplois (Cf. paragraphe 3.1 relatif à la reconversion des sites miniers).
- Par exemple, la transformation de la ville minière d'Elliot Lake (Ontario) en communauté de personnes retraitées ;
- mettre en place le cas échéant (exploitation importante) des dispositifs en vue de favoriser l'implantation d'activités industrielles de remplacement et la reconversion du personnel et/ou la ré-industrialisation du site, avec des moyens financiers identifiés ;
- dialoguer et négocier les modifications ou suppressions d'emplois avec les partenaires sociaux.

Minimiser les impacts résiduels sur les eaux souterraines et de surface

Lors de la fermeture d'une mine, l'un des principaux effets nuisibles à prendre en compte est la gestion des eaux issues du ruissellement des précipitations sur les dépôts de stériles ou de résidus de traitement ainsi que les eaux d'exhaure minière. Les différentes techniques existantes permettant de gérer ces impacts sont :

- La réutilisation et/ou la valorisation des eaux de mine.

  Principe : en fonction de leur qualité, utiliser les « eaux de mine » pérennes pour répondre à un besoin local (soutien d'irrigation, industrie, sylviculture, etc.) identifié dès les phases initiales de la mine ou en fin de vie.

- L'aménagement des émergences minières résiduelles en créant des points artificiels de drainage (afin d'assécher un point particulier).

  Principe : créer un point de soutirage des eaux de mine (tranchée, buse, galerie) afin de modifier le sens d'écoulement des eaux de mine et ainsi supprimer une émergence résiduelle problématique ailleurs sur le bassin minier.

- La mise en place de modes de traitement des émergences résiduelles :

- passif : bassin de décantation, phytoremédiation, phytostabilisation, wetlands, bioremédiation (Figure 3) ;
- actif : station de traitements des eaux notamment.

Figure 3 : Phytoextraction du zinc dans des résidus miniers par des Noccaea caerulescens, site de Saint-Laurent-le-Minier, Gard (Source : ©CNRS).

Réduire les impacts environnementaux liés aux dépôts de stériles et de résidus de traitement

Les techniques permettant de réduire les impacts environnementaux liés aux dépôts de stériles et de résidus de traitement sont de s'assurer de la stabilité géotechnique des ouvrages (voir paragraphe précédent), d'optimiser la gestion des eaux circulant sur et dans les dépôts et/ou de couvrir les dépôts.

- Gestion des circulations des eaux des dépôts.

Principe : limiter au maximum les infiltrations d'eau au travers des stériles et des résidus. Pour ce faire, on peut mettre en place un réseau de drainage des eaux de surface adapté aux spécificités du site et au mode de dépôt. Ce réseau doit être calculé pour permettre de canaliser et de dévier les eaux afin d'éviter qu'elles ne stagnent sur les dépôts, ne ruissellent le long des flancs ou n'érodent la base des ouvrages (cours d'eau baignant le pied des dépôts).
On peut également « s'opposer » au phénomène de pollution en aval en collectant les eaux polluées puis, si besoin, en les traitant (préférentiellement de manière passive) avant de les rejeter dans le milieu naturel.

- L'ennoyage des stériles et des résidus miniers (ou mise en dépôt sous eau).

Il s'agit d'isoler les résidus de l'oxygène de l'air afin de s'opposer aux processus physico-chimiques permettant notamment l'oxydation des minéraux sulfurés. Cette méthode, très répandue en Amérique du Nord, et notamment au Canada, n'est pas pratiquée en France compte tenu du relief des régions où se situent les mines métalliques et du nombre limité de lacs majeurs en France. D'autre part, elle présente l'inconvénient majeur de reporter le problème dans le temps alors que la rétention à sec a le mérite d'épuiser en quelques décennies le potentiel d'oxydation des stériles et de certains résidus de traitement ce qui met un terme au relargage des métaux dans le réseau hydrographique.

- La couverture des dépôts de stériles et de résidus de traitement (dans l'objectif, notamment, de limiter et réduire le phénomène de DMA).

  La couverture des dépôts de stériles et de résidus de traitement a pour objectif de réhabiliter la surface d'un dépôt vers un état naturel stable tout en minimisant les impacts résiduels sur le milieu environnant. Ces couvertures ont plusieurs fonctions, notamment : le confinement des déchets, la limitation des entrées d'oxygène, la limitation des entrées d'eaux météoriques, le contrôle de l'érosion, le contrôle de la remontée capillaire des eaux internes, le support pour une végétation pérenne, etc. Trois grandes familles de couverture peuvent être définies :
    - couverture avec une couche de sol naturel dont l'efficacité peut être limitée dans le temps, du fait notamment des variations climatiques impondérables (ruissellement, dessiccation, vent, etc.). Une couche de sol gardée enherbée dans les règles de l'art et des boisements appropriés pourront favoriser la gestion des eaux et augmenter sa durabilité ;
    - couverture imperméable : des couches imperméables recouvrent les résidus et assurent un rôle de confinement. Cette technique lourde et coûteuse ne doit pas être systématisée. Elle doit rester limitée au traitement des bassins de rétention les plus sensibles pour lesquels il n'est pas possible de maîtriser la teneur en métaux des eaux de percolation. Une alternative intéressante est celle de déposer des couches de stériles compactés au-dessus de dépôts de résidus de traitement (disponibilité des matériaux à proximité) ;
    - couverture évapotranspirante (Store and Release Cover : SAR, Store Divert and Release Cover : SRD). L'objectif de ces couvertures est de stocker les infiltrations de surface et de les évacuer par évapotranspiration. Elles sont en général constituées de 3 couches présentant de haut en bas : (1) une couche de sol permettant le développement d'une végétation pérenne, (2) une couche de matériaux permettant de stocker l'eau (mort-terrains, stériles miniers non réactifs voir tampon (par rapport au DMA), matériaux complètement oxydés), (3) une couche de plus faible perméabilité (matériaux argileux si disponible, ou matériaux fins compactés) ;
    - couvertures à effet capillaire. Cette couvertures permet d'empêcher l'infiltration de l'eau en utilisant un effet de capillarité (contraste de granulométrie et de porosité entre deux couches de matériaux) mai elle nécessite une très bonne maitrise des matériaux pour être efficace.

Enfin, dans bien des cas de couverture, une revégétalisation de l'ouvrage est généralement envisagée ; elle facilite l'intégration paysagère tout en limitant les phénomènes d'érosion superficielle et les émissions de poussières (Figure 4). Ces opérations peuvent se faire par de l'ensemencement mécanisé ou par des plantations manuelles. Lorsque la végétation est suffisamment bien implantée, l'évapotranspiration qu'elle induit peut également limiter les infiltrations d'eau météorique.

Figure 4 : Plantation de graminées sur terril de stériles d'exploitation, Aveyron (Source : INERIS).

• Autres techniques de mitigation des impacts environnementaux liés aux dépôts miniers. D'autres techniques existent (déplacement des dépôts, création de barrières étanches « a posteriori » par injection de coulis, etc.) mais elles concernent le plus souvent des dépôts miniers du passé dont la gestion et la mise en place n'ont pas été étudiées ni validées aux phases amont du projet minier. Ces techniques ne sont pas envisageables dans l'optique des mines du futur.

Réduire les risques résiduels de mouvements de terrain liés aux zones d'activités minières

Mouvements de terrain et risques géotechniques sur les travaux miniers souterrains

Selon les méthodes d'exploitation souterraine et en fonction des résultats de l'analyse des risques géotechniques résiduels, des travaux de réaménagement peuvent être entrepris afin de réduire les risques de mouvements de terrain potentiels. Plusieurs techniques peuvent être mises en œuvre :

- Remblayage des cavités souterraines (en intégrant la composante principale de la gestion de la circulation des eaux souterraines). Ces opérations peuvent s'envisager en fin de vie de la mine mais elles ont également un intérêt à être intégrées au phasage de l'exploitation (réutilisation de stériles et diminution des coûts de fermeture).
    - remblayage par voie hydraulique (Figure 5). Depuis la surface, via des forages, la cavité est remplie (gravitairement ou faible pression) avec un mélange « eau + matériaux » ou des boues de remblayage afin de renforcer les piliers, par effet de confinement, diminuer le volume des vides résiduels et interrompre l'évolution de dégradations.
    - remblayage par voie sèche (avec remblais solides sans liant : déblais tout-venant, déchets de carrières, terres de fouilles, stériles miniers, graviers, etc.) ;
    - remblayage par injection (principe du remblayage hydraulique mais sous pression).
- Renforcement de piliers pour éviter leur rupture (Figure 6) ou édification de piliers artificiels.

Figure 5 : Remblayage hydraulique partiel en carrière, Valenciennes, Nord (Source : INERIS).

Figure 6 : Renforcement de piliers, mine de sel, Haut-Rhin (Source : INERIS).

Mouvements de terrain et risques géotechniques sur les travaux à ciel ouvert

Les écroulements des fronts de fosses à ciel ouvert (en terrain rocheux) peuvent être minimisés et gérés par les opérations suivantes :

- purge et abattage des blocs instables ;
- réalisation de contreforts, butons et murs ;
- ancrage de blocs instables ;
- pose de filets plaqués (Figure 7) ;

- gunitage (projection sur une paroi, d'un lait de ciment ou de tout autre matériau de revêtement (résine) dans le but d'augmenter la stabilité de surface de la paroi).

Figure 7 : Pose de grillage et de boulons en carrière, Côte-d'Or (Source : INERIS).

Mouvements de terrain et risques géotechniques sur les ouvrages de dépôts de stériles ou de résidus de traitement

Les effets des glissements et d'autres mouvements de terrain de type mouvements sur les talus des zones de dépôts (et des fosses à ciel ouvert en terrain meuble) peuvent être limités par :

- la pose de système de drainage efficace (l'eau étant la principale cause d'instabilités des ouvrages de dépôts) ;
- le remodelage des pentes. Par constitution de gradins et de banquettes ou par écrêtage afin de diminuer la pente moyenne des talus ;
- la pose de géomembranes : afin de créer une seconde peau pour épouser, arrêter et contenir les mouvements (Figure 8) ;
- la constitution d'enrochements des flancs, réalisation de butées en pied de talus ou mise en place de gabions afin de conforter l'ouvrage ;
- la revégétalisation des pentes afin de limiter les phénomènes d'érosion et de glissements superficiels.

Figure 8 : Pose de géogrilles sur dépôts miniers, Pologne (Source : www.bam.de).

Assurer une fermeture efficace et durable des accès (ODJ : ouvrages débouchant au jour)

En premier lieu, il convient de s'assurer que l'accès « ne mérite » pas d'être conservé ouvert (cas de reconversion possible, Cf. paragraphe 3.1). Dans le cas contraire, une fermeture adaptée sera envisagée.
Différentes fiches de présentation de chaque technique de traitement d'ouvrage sont disponibles dans le Guide, [4]. En synthèse, il est possible de :

- remblayer[3] un puits de mine ou un sondage d'exploration (Cf. annexe 1) ;
- daller un puits de mine (Cf. annexe 1) ;
- équiper une tête de puits d'un bouchon ou d'un sondage d'exploration (Figure 9, Cf. annexe 1) ;
- murer l'entrée d'une galerie (ne traite que le problème d'intrusion et en aucun cas celui des instabilités) ;
- remblayer une entrée de galerie (Cf. annexe 1) ;
- soutenir le toit de l'entrée d'une galerie (boulons notamment, Cf. annexe 1).

[3] Il convient de prendre en compte les implications liées à la création d'habitats favorisant le développement d'espèces protégées dans les critères de choix de ce type de traitement. Le cas échéant la mise en sécurité est assurée par une clôture périphérique. Si l'observation des espèces nécessite la pénétration dans la galerie, il est établi une convention avec un organisme pérenne (collectivité locale).

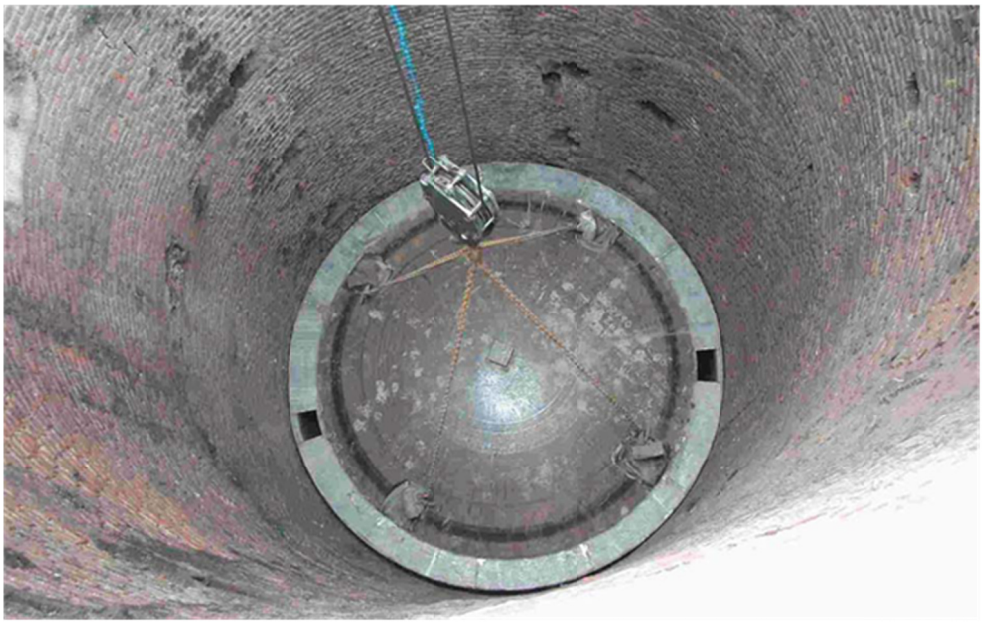

Figure 9 : Dôme en acier du coffrage du bouchon de béton à Auchy-au-Bois, Nord-Pas-de-Calais, (Source : Charbonnages de France).

Minimiser ou supprimer les migrations de gaz de mine

Afin de minimiser les émissions de gaz de mine, il est possible de :

- Capter puis, si possible, valoriser les gaz de mine

Principe : éviter que les gaz de mine potentiels ne migrent vers la surface de manière non maîtrisée (à travers les terrains de recouvrement, les puits ou les galeries proches d'habitation, les caves…) en équipant certains puits ou en créant des ouvrages spécifiques (forages de décompression, par exemple…) ou implantant des systèmes de mise à l'atmosphère (Figure 10). S'ils présentent un intérêt technico-économique, les gaz captés peuvent ensuite être valorisés (aujourd'hui essentiellement le méthane pour produire de l'énergie électrique ou comme source de chauffage).

- Minimiser le volume potentiel du réservoir de gaz

Principe : dans la mesure du possible s'assurer que les vides résiduels dans les travaux souterrains occupent un volume minimal, soit en les remblayant avec des matériaux peu ou pas poreux, soit en créant des barrages artificiels pérennes pour modifier le volume potentiel de gaz.

Figure 10 : Events / Sondage de décompression, Nord (Source : INERIS).

2.5. MESURES DE REAMENAGEMENT

Les méthodes dites de réaménagement sont des techniques qui visent à redonner au site minier un aspect et un usage proches de ceux qu'il avait avant la création des travaux miniers. Le réaménagement concerne donc principalement les ouvrages miniers de surface : puits, entrées de galeries, fosses, gradins, verses, bâtiments miniers, etc. Ces modes de réaménagement sont très souvent couplés au mode de mise en sécurité.

- Pour les puits de mine et les entrées de galeries.

Il est bien souvent nécessaire de garder une partie accessible pour inspecter et/ou visiter les puits et entrées de galerie (levés de niveaux d'eau, inspection géotechniques, évents de gaz, surveillance des espèces protégées, etc.) ainsi il n'est souvent pas utile de « masquer » intégralement ces ouvrages. En revanche, les abords de ces points sont nettoyés et peuvent être revégétalisés de manière à les intégrer de manière optimale au site restauré.

- Pour les ouvrages de dépôts de surface et les exploitations à ciel ouvert.

Les opérations de réaménagement consistent généralement à démanteler les éventuelles infrastructures minières (convoyeur à bandes, trémies, etc.) puis :

- à remodeler les pentes ;
- dans la mesure du possible et si nécessaire, à recouvrir les ouvrages d'une couche de sols (terre végétale) ;
- à végétaliser les pentes (ensemencement mécanisé ou plantations manuelles) ;

- dans certains cas spécifiques (Cf. paragraphe 3.1), à préparer le site à une reconversion (choix en concertation avec l'Administration, les riverains, les communes, tout autre partie-prenante) :
  - comblement partiel ou total puis ennoyage d'une MCO avec création d'un plan d'eau ;
  - aménagements « touristiques » des pentes de dépôts miniers.

- Pour les autres infrastructures (tous types de bâtiments miniers). Il s'agit de déconstruire les structures minières (celles n'ayant pas d'intérêt à être conservées en cas de reconversion), d'évacuer les déblais ainsi générés et de réhabiliter les zones dégagées en réaménageant les premiers mètres de sol et éventuellement en végétalisant le site (ensemencement mécanisé ou plantations manuelles).

3. Les techniques pour gérer l'après-mine

Au cours de la phase de fermeture, l'exploitant a quantifié et synthétisé les éventuels risques résiduels qui n'ont pas pu économiquement ou techniquement être supprimés. Lorsque des risques importants subsistent, il incombe à l'exploitant de rechercher, d'étudier, de présenter et de mettre en place les mesures qu'il estime devoir être poursuivies après l'arrêt des travaux (suivi/surveillance). La phase d'après-mine consistera à définir les conditions de projection dans le temps de cette surveillance/suivi, en termes de :

- nature, durée et périodicité ;
- coûts ;
- responsabilité technique et financière (exploitant et/ou État et/ou délégation autre[4]).

Cette phase de suivi concerne principalement les risques résiduels de mouvements de terrain et les impacts résiduels sur les eaux et les sols (qualité et quantité) : inspection régulière des vides miniers (si possible), mise en place de périmètres de sécurité, surveillance instrumentée des structures souterraines ou des mouvements de terrain en surface, piézomètres de contrôle, station de suivi de la qualité des eaux, imagerie aéroportée ou satellitaire pour l'observation de mouvements de terrains ou de pollution minière, etc.

Dans cette configuration de site minier, une politique de prévention spécifique peut être mise en place (vis-à-vis de toute aggravation des risques). Elle vise à réglementer les usages des sols (zones avec restriction d'usage voire même des servitudes), des eaux et de l'environnement en général de tout site concerné (directement ou indirectement) par l'exploitation minière (cartes des aléas miniers résiduels, documents d'urbanisme, etc.).

Une alternative à cette gestion post-exploitation d'une mine est celle où tout ou partie du site minier peut faire l'objet d'une valorisation. La mine peut donc connaitre une seconde vie et ne pas entrer dans la phase classique de l'après-mine. Ces possibilités, certes spécifiques à des contextes particuliers, doivent être étudiées en première phase de l'après-mine de chaque site.

3.1. SOLUTIONS DE RECONVERSION DE MINES

Certaines structures minières peuvent, dans certaines configurations spécifiques, proposer des possibilités de reconversion qu'il convient d'envisager pour donner une deuxième vie au site, il peut s'agir [2] :

- Valorisation des eaux de mine.

  Un certain nombre de cas d'utilisation de l'eau stockée dans les galeries souterraines ennoyées ou dans les lacs de découverte existent en France. Ils concernent soit l'Alimentation en Eau Potable, l'Alimentation en Eau Industrielle, l'Alimentation en Eau Agricole ou d'autres usages comme la constitution de réserves d'incendie, d'étangs de loisirs ou de projets géothermiques. Ce mode de reconversion est souvent freiné par la

[4] Par exemple, le transfert, en gestion et en responsabilité, d'une installation hydraulique de sécurité (IHS) d'un exploitant à une collectivité ou de l'Etat à une collectivité, peut être validé dans la mesure où la collectivité reçoit une somme d'argent (ou soulte) destinée à répondre aux coûts d'entretien de l'IHS.

méconnaissance du potentiel aquifère des vides miniers ou par l'investissement nécessaire pour gérer l'aspect qualitatif.

- Ré-exploitation de tout ou partie de dépôts de stériles et de résidus de traitement.

Les matériaux définis comme produits issus de l'exploitation minière et non valorisables à une certaine époque peuvent, suivant leur nature et leur teneur, devenir intéressants pour une ré-exploitation ultérieure en fonction des progrès techniques et des nouvelles conditions économiques :

  - cas de stériles miniers à faible teneur devenant économiquement intéressant suivant les fluctuations du marché ;
  - cas de stériles ou de résidus miniers contenant d'autres éléments que ceux valorisés à une époque passée ;
  - cas de stériles ou de résidus miniers pouvant servir de matière première à un secteur industriel autre que le minier ou la métallurgie (BTP notamment).

- Gestion de sources d'énergie (gaz ou hydrocarbures) en cavités souterraines :
  - certains pays européens ont développé des techniques permettant de générer de l'énergie en faisant circuler des eaux de surface vers des cavités minière souterraines profondes (énergie potentielle) en période de forte demande énergétique. Les eaux souterraines sont ensuite pompées du fond vers la surface en période de surplus énergétique ;
  - stockage de gaz ou d'hydrocarbure en cavités minées. Cette option est généralement intégrée très amont dès les phases de conception minière. En effet, la reconversion en lieu de stockages impose des conditions de creusement et de préservation des massifs rocheux qui dirigent le choix de la méthode d'exploitation (minimiser la fracturation notamment).

- Mines devenant ERP (établissements recevant du public), musées notamment.

Un des modes courant de reconversion en France est la transformation de tout ou partie des structures minières en musée (Figure 11). Il s'agit le plus souvent d'un musée installé en surface, dans les bâtiments du carreau de l'ancienne mine, mais on trouve également des galeries souterraines aménagées. Ce mode de reconversion nécessite, si il n'a pas été anticipé dans la période d'activité de la mine, un financement conséquent avec la participation des collectivités publiques locales, voire de l'État ou de l'Union européenne (ainsi parfois que d'un mécène).

Figure 11 : Misée mine souterraine, Hautes-Alpes (Source : www.minesdargent.sitew.com).

Les carreaux miniers peuvent également être exploités par des entreprises, celles des travaux publics notamment avec l'utilisation des ateliers et des bâtiments miniers.

- Mines comme zones de loisirs sportifs (randonnée, ski d'été, etc.)

  Il s'agit le plus souvent de l'aménagement parcours sportifs ou de sentiers de promenade, de VTT ou de randonnée. Il peut également s'agir de faire visiter l'ancien site minier soit librement (parcours de visite), soit avec un accompagnateur. On peut trouver des projets plus originaux comme du vélorail.

3.2. METHODE DE SUIVI/SURVEILLANCE

Le suivi périodique et à long-terme[5] des sites dont la stabilité n'est pas assurée ou la surveillance d'ouvrages miniers pouvant impacter la qualité environnementale peuvent être définis. Ces mesures de prévention ont pour but de détecter l'occurrence d'un phénomène redouté puis d'avertir ou d'alerter du danger sans s'opposer au phénomène proprement dit. Elles font appel à des techniques dont le principe est de suivre l'évolution d'un phénomène, de

[5] Ces mesures ont des durées qui varient d'un site minier à l'autre en fonction des enjeux et des types de risques miniers, mais l'ordre de grandeur envisagé est entre plusieurs années et plusieurs dizaines d'années.

signaler un changement de comportement de l'environnement et de prendre les mesures de sécurité conservatoires qui s'imposent en cas d'instabilité avérée ou de dépassement de seuils préalablement définis. Elles représentent le plus souvent une stratégie d'attente en reportant ou en fragmentant dans le temps des travaux de réaménagement pour mieux en répartir le coût.

Les techniques de suivi et surveillance sont adaptées aux configurations du site et comportent plusieurs niveaux d'investigation :

- l'inspection visuelle avec analyse de l'évolution des désordres et /ou observation de témoins et d'indices ;
- la télémesure (mesure à distance) ;
- la télésurveillance automatique, avec ou sans dispositif d'alerte. Ces mesures instrumentales présentent l'avantage de compléter le suivi visuel grâce à des mesures continues ;
- l'analyse de données aériennes ou radar ;
- Les images suivantes présentent quelques méthodes de surveillance appliquées en après-mine :
- surveillance géotechnique (mouvements de terrains et ruptures) ;
- surveillance géochimique (pollutions et impacts sur les eaux notamment).

Le détail de ces méthodes est proposé en annexe 2.

Figure 12 : Matériel de scanner 3D pour appuyer les inspections géotechniques , mines de sel, Moselle (Source : INERIS).

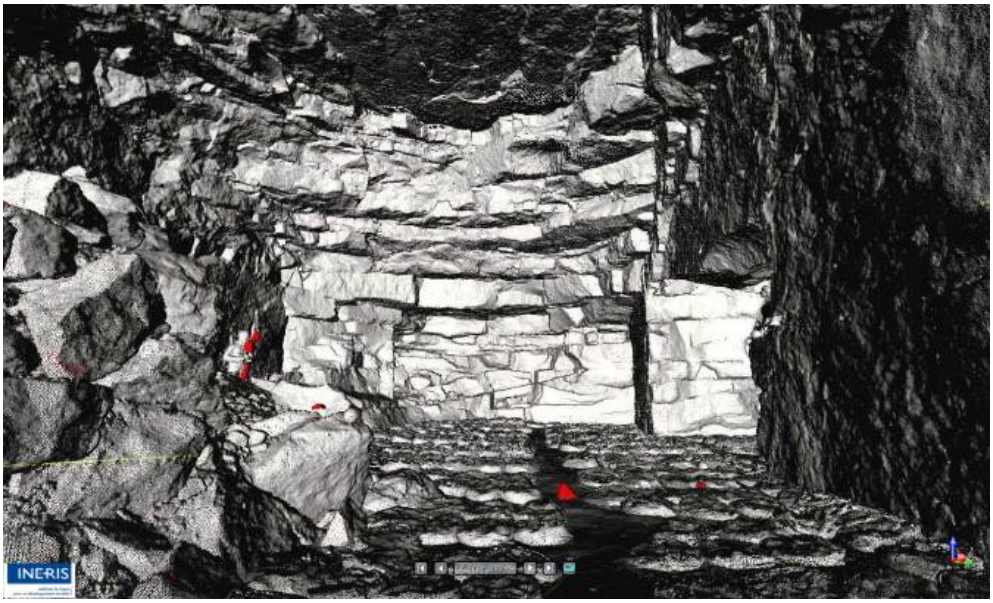

Figure 13 : Rendu de scanner 3D en carrière, Oise (Source : INERIS).

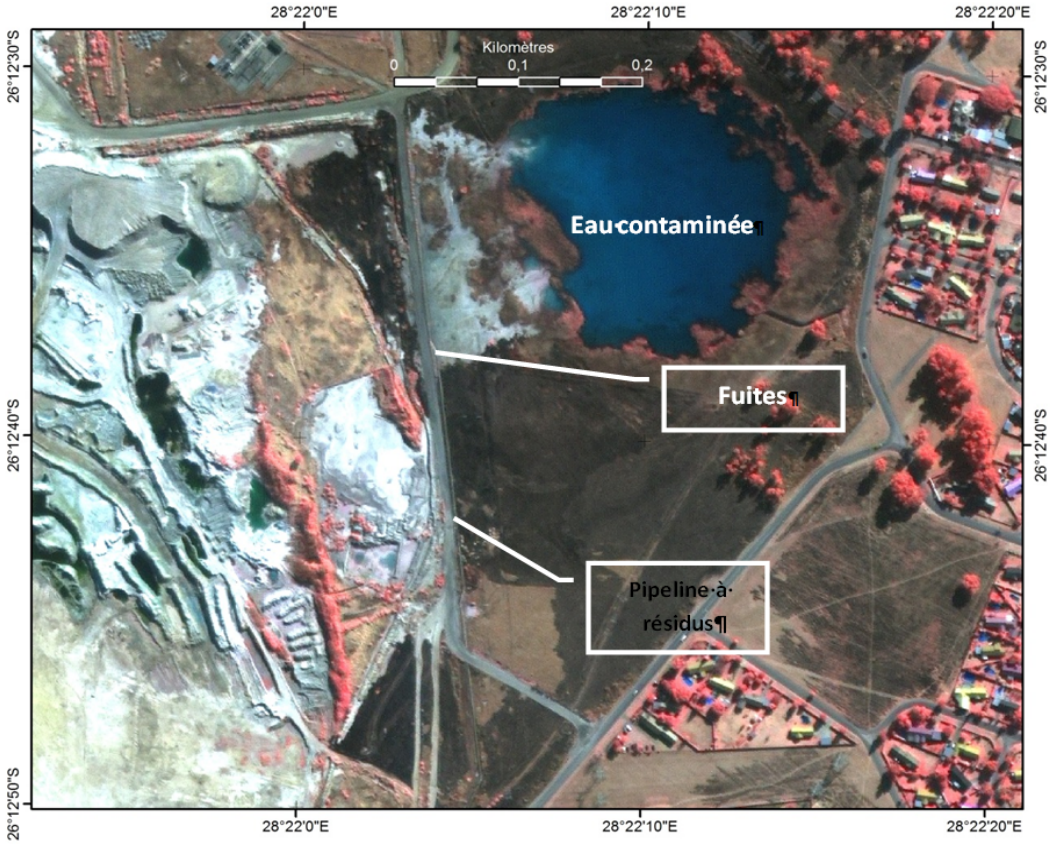

Figure 14 : Image haute résolution Ikonos montrant une contamination des eaux de surface dûe à des fuites sur un pipeline de transport de résidus miniers, East Rand en Afrique du Sud (Source : BRGM).

3.3. POLITIQUE DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS

Dans le passé, les dispositions de fermeture des mines ont pu être insuffisantes pour prévenir les risques miniers résiduels. Un outil de prévention, le plan de prévention des risques miniers (PPRM) s'inspirant du plan de prévention des risques naturels, a été introduit dans le code minier en 2004. Le principal objectif des PPRM[6] est d'assurer la sécurité des personnes et des biens par une réglementation de l'urbanisation et de l'aménagement d'un territoire dans les zones soumises à des risques résiduels d'origine minière.

Les prescriptions des arrêtés préfectoraux encadrant les exploitations minières actuelles ou futures ont pour objectif de prévenir les risques miniers pendant l'exploitation et après la fermeture de la mine.

L'outil[7] PPRM ne peut pas, et ne doit pas, être considéré comme une solution ou une bonne pratique pour la gestion post-exploitation d'une mine actuelle ou future.

[6] C'est le décret n° 2000-547 du 16 juin 2000 qui assure la mise en application des PPRM.

[7] D'autres outils disponibles permettent d'intégrer les risques miniers dans le territoire (Plan Local d'Urbanisme, Schéma de Cohérence Territoriale, Dossier Départemental des Risques Majeurs ou Plan Communal de Sauvegarde, etc.) mais ils ne sont pas spécifiques aux risques miniers et ne seront pas développés ici.

4. Les impacts socio-économico-environnementaux de la fermeture de mine

Si pour les autres phases de vie d'une mine (Cf. Tome 4 – Exploration minière ; Tome 5 – Développement, financement, construction ; et Tome 6 - Exploitation et traitement des minerais), ce paragraphe relatif aux Impacts devait être isolé au sein d'un chapitre dédié, il n'en est pas de même pour la phase de fermeture. En effet, l'analyse et l'évaluation des impacts et des effets résiduels, à court et long termes, de la fermeture d'une mine font partie intégrante des nécessaires méthodes et techniques de fermeture, elles sont donc décrites au paragraphe 2.3 précédent.

5. Les bonnes pratiques de fermeture de mine

Il convient de distinguer deux situations très différentes des mines en France :

- Une « situation passée » (dont sont issues les actuelles situations d'après-mine) qui a généré des impacts résiduels de toutes natures et d'intensité très variables avec parfois des séquelles irréversibles ;

- une « situation future », à laquelle est dédié le présent document, qui en raison des dispositions réglementaires, des techniques et des meilleures pratiques listées dans le tome 12 de cette collection, correspondra à un après-mine sans risque résiduel important.

5.1. ASPECTS SOCIETAUX

Une fermeture de mine doit avant tout être anticipée, préparée et concertée.

Le plan de fermeture est défini, au moins dans ces concepts, dès les études technico-économique initiale (Cf. Tome 5) et il est optimisé au cours de la vie de la mine (Cf. Tome 6) en intégrant les attentes des parties-prenantes.

De plus, une fermeture ne doit pas être conçue et réalisée comme une perte sèche (activités économiques, emplois, etc.). Les compagnies minières devraient penser cette phase, « comme un nouveau départ », ce qui requiert une gestion de l'environnement social et économique tout au long de la durée de vie de la mine, en partenariat avec la compagnie minière, ses sous-traitants, la collectivité locale et ses divers modes de représentation. La fin de la mine est alors une reconversion qui a été préparée afin de diversifier les revenus et les compétences et d'insuffler un nouvel élan socio-économique.

5.2. LISIBILITE DES ETUDES

La procédure d'arrêt est synthétisée dans un document d'arrêt des travaux qui doit être suffisamment précis et détaillé pour que les experts puissent se prononcer sur la qualité des analyses menées et la pertinence des mesures de traitement et de réaménagement proposées. De plus, pour permettre que le document soit compréhensible par un public non forcément spécialiste (parties-prenantes diverses : élus, riverains, associations, etc.), il peut s'avérer intéressant de rédiger un résumé non technique, accessible à un non-technicien mais synthétisant l'essentiel des éléments fondamentaux contenus dans le dossier et accompagné :

- de documents cartographiques (plans et coupes) clairs et organisés par thèmes ;
- d'un glossaire définissant les termes techniques indispensables à une bonne compréhension du document.

Afin de ne pas alourdir le rapport, on peut renvoyer en annexe l'ensemble des pièces administratives et des études techniques réalisées lors de la constitution du dossier (rapport/étude puits ou galeries par exemple, sous réserve de préciser le contexte spécifique à chacun des ouvrages et les éventuelles mesures compensatoires qui le concernent).

5.3. STRUCTURE ET CONTENU DES ETUDES

Une étude d'arrêt des travaux est généralement complexe et multidisciplinaire, l'exploitant doit donc s'entourer d'experts connus et reconnus dans divers domaines pour réaliser une étude adaptée et complète.

Dans le cadre d'une fermeture durable, l'étude d'arrêt des travaux doit être anticipée par l'exploitant et conçue de manière progressive (compilation et archivage des données depuis l'exploration), elle apparait ainsi comme un outil de planification qui vit avec le projet minier et qui se finalise à la fin de la vie de mine (concept de « *Design to close* »).

La démarche des études proposée doit :

- être menée en trois phases (Etat des lieux, Evaluation des impacts résiduels et Mesures/Traitement) ;
- en référence aux réglementations en vigueur (Droit Minier, Droit Environnemental notamment) et aux recommandations internationales en matière de mine responsable, aborder systématiquement l'ensemble des thèmes suivants :
    - les effets sur les tissus économiques et sociaux locaux ;
    - les sites et installations de surface indispensables à l'exploitation (impacts géochimiques et géotechniques).
    - les différents impacts résiduels induits sur :
        - les eaux superficielles et souterraines ;
        - la biodiversité (faune et flore) ;
        - la santé et salubrité publiques.
    - la stabilité des terrains de surface ;
    - la présence de gaz de mine ;
    - les problématiques liées aux verses, terrils, digues de stériles et de résidus de traitement ;
    - le traitement des ouvrages miniers débouchant au jour.

Au cours de la synthèse géologique, un chapitre particulier doit être particulièrement affiné sur les données disponibles concernant le Fond Géochimique Naturel notamment à partir des données de l'exploration (Cf. Tome 4) et de l'Etat Initial (eaux, sols, sédiments, etc.). C'est à partir des données de ce FGN que sont définis les objectifs de réhabilitation et de suivi.

Si le secteur faisant l'objet des études d'arrêt n'est pas concerné par l'un ou l'autre de ces thèmes (absence d'installations de surface par exemple), on précisera dans le chapitre correspondant de l'étude l'absence de conséquences. Cette démarche systématique permet de clarifier l'analyse et d'éviter que certains points ne soient occultés ou oubliés.

5.4. MISE EN ŒUVRE DES SOLUTIONS DE TRAITEMENT ET DE REAMENAGEMENT

Les techniques détaillées de mise en sécurité, de traitement des aléas et de réaménagement précédemment sont par définition des bonnes pratiques pour réduire les impacts liés à la fermeture d'une mine. Il est difficile de les classer a priori en termes de performance ; les solutions doivent être définies pour chaque site minier, au cas par cas (en fonction des spécificités géologique, gîtologique, hydrogéologique, de techniques d'extraction minière et de procédés de traitement de minerais notamment).

La première bonne pratique que les exploitants doivent envisager est celle d'une mise en œuvre progressive des techniques.

De plus, quelques éléments de mise en œuvre et de définition optimale peuvent être listés :

- anticiper et intégrer les parties prenantes dans toute réflexion et décision autour de la fermeture de la mine ;
- définir les solutions de traitement et de réaménagement du site minier dès les premières phases du projet minier (Développement-Financement-Construction, Cf. Tome 5) ;
- promouvoir les techniques de réaménagement progressif (couverture des dépôts au cours de la constitution du dépôt et non en phase finale par exemple) ;
- analyser les effets connexes et/ou contreproductifs des travaux de réaménagement ou de mise en sécurité entre eux (exemple de bouchons de puits pouvant modifier les circulations de fluides dans les travaux souterrains ou nuire à la viabilité d'espèces animales ou végétales endémiques) ;
- préférer la mise en œuvre de mode de traitement passif pour les eaux de mine résiduelles et les zones de dépôts de stériles et de résidus de traitement. Les traitements actifs (stations de traitement des eaux notamment) sont supportables financièrement tant que les mines sont actives, sur le long terme en après-mine elles peuvent générer des coûts très importants. Les opérations de curage et de traitement des boues sont en effet généralement onéreuses. Dès la conception du projet minier, il faut identifier les points bas constituant des exhaures et voir dans quelles mesures ils peuvent être aménagés en zones humides (bassins plantés de roseaux) par exemple qui permettra ainsi de tamponner l'impact de l'exhaure minier sur les eaux de surface. L'inconvénient de ces aménagements est qu'ils nécessitent beaucoup d'espace et donc qu'ils doivent être anticipés dès que possible. ;
- lors des opérations de remblayage :
    - réaliser étude hydrogéologique détaillée du site associant un modèle hydrogéochimique précis ;
    - s'assurer du caractère inerte des remblais utilisés (caractérisations et tests de comportement adaptés) ;
    - suivre précisément les volumes de remblais déversés au regard des calculs volumiques initiaux afin de détecter immédiatement toute dérive éventuelle ;
    - cas particulier des puits : dégager et démanteler les équipements internes (cage, rails, échelles, etc.) avant le remblayage ;
    - créer des barrages efficaces qui éviteront aux remblais de migrer en des endroits non désirés et dommageables vis-à-vis de la stabilité ;
- pour la revégétalisation de dépôts de sites miniers, il n'est pas toujours aisé d'opérer une revégétalisation efficace et pérenne. Une phase de test doit être réalisée au cours de l'exploitation, minière (Cf. Tome 6), la solution finalement retenue résultera du retour d'expérience de cette phase de test.

Lorsqu'il est adapté aux objectifs à atteindre (efficacité vis à vis des impacts résiduels identifiés), le couvert végétal qui s'installe seul est le plus adapté car il présente généralement de meilleures garanties de pérennité. Si l'action humaine est inévitable l'implantation d'espèces locales est préférable (ou la réimplantation des arbres et autres végétaux présents initialement et déplacés le temps de l'exploitation minière).

De nombreuses recherches sont en cours pour déterminer les espèces végétales les mieux adaptées aux différents types de résidus de traitement minier.

En phase de démantèlement, les bonnes pratiques consistent à :

- étudier toutes les possibilités de recyclage des déblais et des anciens équipements d'infrastructures démantelées (musée, industries locales, etc.) ;
- envisager une déconstruction intégrée (permettant le recyclage d'une grande partie des matériaux)
- étiqueter et évacuer les déchets dans les filières locales adaptées.

5.5. COUTS DE FERMETURE

Tout au cours du cycle de vie de la mine, les coûts de fermeture prévus dès les phases initiales du projet minier seront réévalués. A chaque phase décisionnelle majeure du projet, l'exploitant devra démontrer qu'il a mis en place des garanties financières, avec des montants réalistes, suffisantes pour financer toutes les dépenses associées à la fermeture. À ce sujet, le concept de réhabilitation progressive est intéressant puisqu'il permet de répartir les coûts de fermeture et de réaménagement tout au long de la vie de la mine.

6. Les bonnes solutions pour gérer l'après-mine

Il serait souhaitable que les concepts de la phase d'après-mine soient définis lors de la phase de développement de projet minier (dès les études conceptuelles, Cf. Tome 5), une fois l'état initial établi, afin de prévoir en bonne pratique un fond de réserve, des mesures compensatoires et d'avoir une analyse objective des risques et des impacts liés à l'après projet.

De manière globale, une gestion durable de l'après-mine s'envisage de manière participative (en impliquant les parties prenantes aux principales phases décisionnelles) et elle nécessite de la part des compagnies minières :

- de définir, de planifier et d'anticiper la fin de vie de la mine (dans la mesure du possible) ;
- d'envisager, de manière concertée, différentes solutions de reconversion des structures minières ;
- de définir des modes de suivi à long terme des éventuels impacts miniers en étudiant la possibilité de confier ces tâches à une ou plusieurs parties prenantes ;
- de mettre en place des procédures pour l'information des populations exposées aux risques résiduels.

Dans ce cadre, la phase d'après-mine peut être perçue et vécue comme le cheminement et l'aboutissement de tout un processus participatif qui débouche sur situation nouvelle synonyme de relance potentielle et non comme une fin en soit imposée aux parties prenantes.

Les paragraphes suivants détaillent quelques bonnes pratiques relatives aux principales techniques de gestion de l'après-mine.

6.1. SOLUTIONS DE RECONVERSION DE MINE

En fonction de la situation des exploitations, les réaménagements doivent s'adapter et chercher un enrichissement des lieux pour la collectivité par une reconversion du site minier. La recherche de l'adaptation et de la complémentarité des activités extractrices et d'aménagement pourrait satisfaire à l'objectif d'exemplarité, ainsi toutes les solutions doivent être analysées dans la limite de l'économie intelligente du projet et d'une réciprocité des intentions des parties prenantes.

Chacun des projets de reconversion envisagés pour valoriser les structures minières après la fermeture de la mine :

- ne doit pas aggraver les niveaux de risque et d'aléa initiaux ;
- doit résulter d'une concertation des parties prenantes (riverains, associations, communes notamment) qui ont généralement des idées de reconversion).

6.2. METHODE DE SURVEILLANCE

Seule une étude préliminaire permet d'identifier le type de surveillance le plus adapté au site et aux risques résiduels considérés. En outre :

- quel que soit le type d'instrumentation choisi, la mise en œuvre d'une surveillance n'annule pas le risque. Elle permet de le gérer et d'alerter la population et les autorités

dans le cas d'une évolution anormale des cavités sous-jacentes. Ainsi, les dispositifs de surveillance ne peuvent en aucun cas être assimilés à des ouvrages de protection ;

- quelle que soit la méthode retenue, elle ne doit pas se limiter à une « simple » approche technique et analytique du risque. Elle nécessite d'impliquer systématiquement une organisation de la sécurité (gestion de la « crise »), depuis le déclenchement de l'alerte jusqu'à l'application de consignes ou de prescriptions particulières ;
- les inspections régulières d'ouvrages souterrains ou la gestion de réseaux de surveillance engagent la responsabilité des intervenants (sécurité, compétence sur l'avis rendu, etc.) et doivent rester du domaine d'organismes spécialisés publics ou privés ;

- un plan de surveillance doit être établit en incluant :
    - la description des rôles et responsabilités des acteurs affectés à la surveillance ;
    - la liste des paramètres à surveiller et la fréquence de la surveillance ;
    - la description des mesures d'urgence prévues pour régler tout problème décelé au cours des activités de surveillance courante.

6.3. FINANCEMENT DE L'APRES-MINE

S'il s'avère qu'un site doit faire l'objet d'une surveillance, d'un entretien ou d'un traitement à long terme lié à des risques miniers[8] résiduels, l'opérateur devra élaborer et mettre en œuvre des mécanismes vérifiables pour assurer la disponibilité d'un financement adéquat pour ces activités.

[8] Risque de pollution chronique ou problèmes de stabilité de certains ouvrages après la fermeture (ancienne exploitation, stocks et zones de dépôts de stériles et de résidus miniers, etc.).

7. Références

[1]. DIDIER. Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Rapport INERIS référencé INERIS-DRS-01-25750/R01. Avril 2001.

[2]. GOMBERT. Risques et responsabilités liés à la réutilisation des structures minières et à la valorisation des rejets miniers. Rapport INERIS référencé DRS-14-142029-11850A. décembre 2014.

[3]. PAQUETTE. Guide du détenteur des terrils et autres dépôts miniers issus de l'activité charbonnière. Ouvrage SIM. 2003.

[4]. SALMON. Guide de bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant au jour. Rapport INERIS référencé INERIS DRS-12-126117-07379A. 29 juin 2012.

[5]. TRITSCH. Guide technique - Méthodes de mise en sécurité des populations face au risque d'effondrement de cavités souterraines ». Rapport INERIS référencé INERIS-DRS-07-86042-02484A. 2007.

[6]. L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz. ». Rapport référencé INERIS-DRS-06-51198/R01. 04/05/2006. Disponible à l'adresse suivante : http://www.ineris.fr/guide-pprm.

Annexe 1

Techniques de fermeture des ODJ

Différentes fiches de présentation de chaque technique de traitement d'ouvrage débouchant au jour (ODJ) sont disponibles dans un guide dédié (SALMON. Guide de bonnes pratiques pour la mise en sécurité d'ouvrages miniers débouchant au jour. Rapport INERIS référencé INERIS DRS-12-126117-07379A, 29 juin 2012).

En premier lieu, il convient de s'assurer que l'accès « ne mérite » pas d'être conservé ouvert (cas de reconversion possible). Dans le cas contraire, une fermeture adaptée sera envisagée. En synthèse, il est possible de :

- Remblayer un puits de mine.

Principe : déverser des matériaux dans le puits, après avoir fermé les connexions, afin de conforter l'intégralité du revêtement en l'aidant à encaisser les efforts horizontaux.

- Daller un puits de mine.

Principe : réaliser une dalle en béton armé en tête de colonne du puits (supportant son propre poids, les surcharges et les éventuels effets d'un effondrement), la colonne de puits étant le plus souvent remblayée.

- Equiper une tête de puits d'un bouchon.

Bouchon béton autoportant (Figure 15). Du béton est coulé en tête de puits, l'autoportance est assurée par la résistance au cisaillement du béton sur le revêtement de la colonne du puits (généralement irrégulier).

Bouchon de surface, dit « de champagne » (Figure 16). Du béton est coulé en tête de puits après avoir l'avoir évasée, la stabilité est assurée par la réaction du béton sur les massifs sains en tête du puits.

Bouchon ancré (serrement). Du béton est coulé en tête de puits après avoir aménagé des points d'ancrage, la stabilité du serrement est assurée par appuis/réactions du béton dans des galeries, des conduites ou des sur-largeurs connectées au puits.

Bouchon injecté (dans puits remblayé). Renforcer le remblai de la colonne du puits ou/et les terrains environnants celle-ci par injection de mélanges hydrauliques (boues ou ciment).

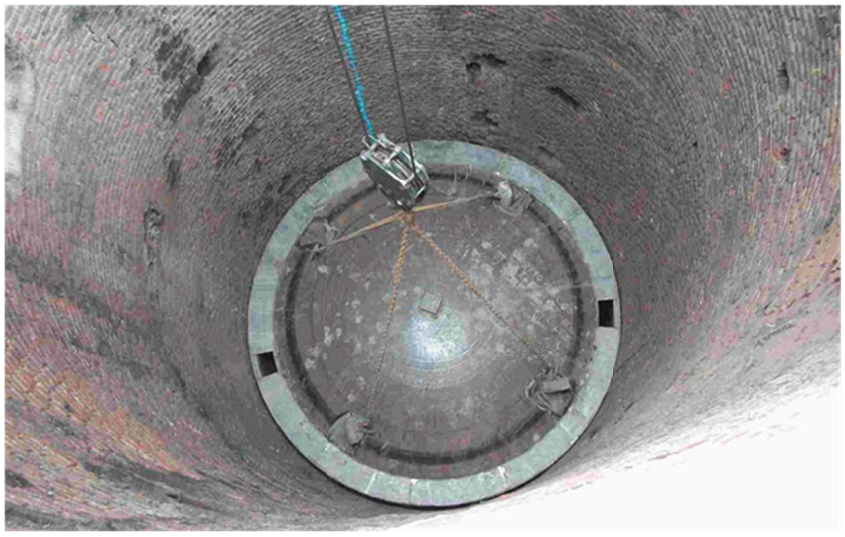

Figure 15 : Dôme en acier du coffrage du bouchon de béton à Auchy-au-Bois, Nord-Pas-de-Calais (Source : Charbonnages de France).

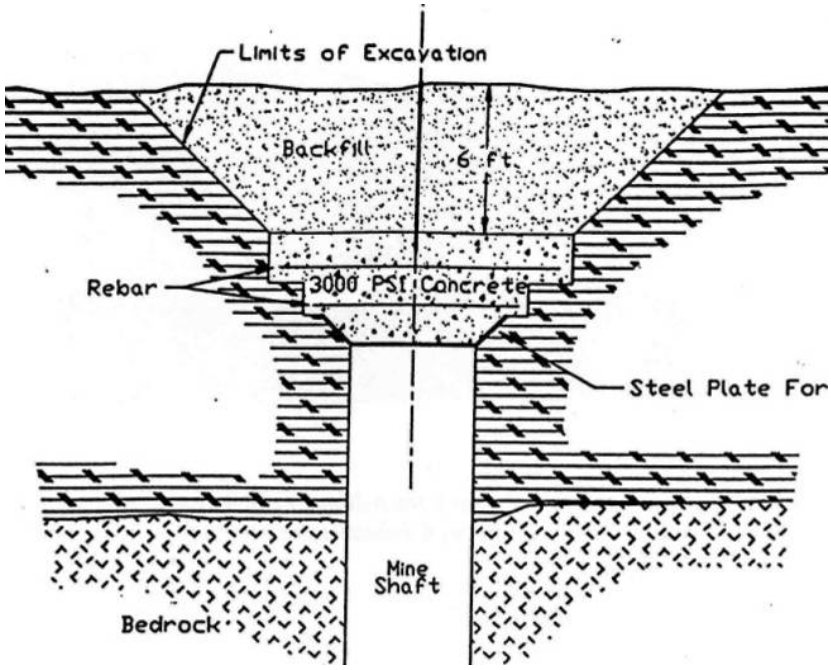

Figure 16 : Schéma de principe d'un bouchon dit de Champagne (Source : INERIS).

- Murer l'entrée d'une galerie (ne traite que le problème d'intrusion et en aucun cas celui des instabilités).

Il convient de prendre en compte les implications liées à la création d'habitats favorisant le développement d'espèces protégées dans les critères de choix de ce type de traitement. Le cas échéant la mise en sécurité est assurée par une clôture périphérique. En fonction de l'espèce protégée. Si l'observation des espèces nécessite la pénétration dans la galerie il est établi une convention avec un organisme pérenne (collectivité locale).

- Foudroyer l'entrée d'une galerie.

Principe : provoquer l'effondrement de l'entrée de galerie ; elle devient infranchissable et les vides sont comblés par le matériau éboulé.

Même remarque que précédemment sur la prise en compte des aspects faunistiques.

- Remblayer une entrée de galerie (Figure 17).

Principe : pousser/déverser des matériaux dans l'entrée de galerie afin de l'obturer, de limiter le volume de vide et de conforter le revêtement sur une distance définie.

Même remarque que précédemment sur la prise en compte des aspects faunistiques.

- Soutenir le toit de l'entrée d'une galerie :
    - par boulonnage ;
    - par maçonneries : voûtes maçonnées, muraillement massif en plein cintre, etc. ;
    - par soutènement métallique : cadres, cintres ;
    - par revêtements bétonnés : béton projeté, coffret béton.

Figure 17 : Remblayage d’entrée de galerie, Hautes-Alpes (Source : INERIS).

Annexe 2

Différentes méthodes de suivi / surveillance en après-mine

Les principaux objets d'application des méthodes de suivi/surveillance minier sont de deux types :

- instabilité physiques ou mouvements de terrains (sur travaux souterrains, mines à ciel ouvert ou ouvrages de dépôts de stériles) ;
- instabilité géochimiques ou pollution.

Les techniques de suivi et surveillance sont adaptées aux configurations du site et comportent plusieurs niveaux d'investigation :

- l'inspection visuelle avec analyse de l'évolution des désordres et/ou l'observation de témoins et d'indices ;
- la télémesure (mesure à distance) ;
- la télésurveillance automatique, avec ou sans dispositif d'alerte. Ces mesures instrumentales présentent l'avantage de compléter le suivi visuel grâce à des mesures continues ;
- l'analyse de données aériennes ou radar.

SURVEILLANCE DES INSTABILITES GEOTECHNIQUES (MOUVEMENTS DE TERRAINS ET INSTABILITES)

Inspections géotechniques souterraines

L'inspection visuelle des cavités repose sur l'observation d'indices de dégradation tels que l'altération du milieu, la fracturation/fissuration, les chutes de blocs, la déformation des parois et des voûtes, etc. Il s'agit d'une méthode d'investigation simple et économique mais qui doit être effectuée par des experts géotechniciens. A partir d'une carte, de type plan des travaux, on peut établir un état des lieux dressé au travers d'une carte géotechnique et définir un itinéraire de visite adapté à la surveillance des zones à risque. La périodicité des visites de contrôle est un facteur essentiel de la pertinence de l'inspection. Elle doit être définie spécifiquement en fonction de l'état des cavités et des enjeux.

Les observations peuvent s'accompagner de relevés effectués à partir de témoins posés en travers de fissures mécaniques (plâtre, règle graduée, fissuromètre ou autre dispositif) ou à partir d'indices de chutes de blocs établis à partir de systèmes de repérage préparés à cet effet (bâches disposées au sol, peinture projetée sur les parois ou les piliers, etc.).

Pour des secteurs inaccessibles, l'inspection visuelle peut être effectuée à l'aide d'une caméra en forage (Figure 18).

Pour des secteurs aux configurations complexes le recours à un scanner 3D peut être envisagé (Figure 19 et Figure 20).

L'inspection nécessite que les cavités souterraines soient accessibles et en suffisamment bon état pour ne pas mettre en péril la sécurité des intervenants.

Figure 18 : Caméra haute résolution en forage (Source : INERIS).

Figure 19 : Matériel de scanner 3D, mines de sel, Haut-Rhin (Source-INERIS).

Figure 20 : Rendu de scanner 3D en carrière, Oise (Source : INERIS).

Surveillance instrumentée (ouvrages souterrains mouvement de surface)

La surveillance instrumentée est effectuée à partir de dispositifs et d'appareillages de mesure judicieusement implantés. Ce mode de surveillance est particulièrement adapté aux instabilités minières d'origine souterraine et il est mis en œuvre lorsque les études géotechniques préliminaires concluent à une incertitude sur l'évolution de la stabilité. La surveillance instrumentée apporte aux méthodes d'inspection visuelle un complément d'analyse à la fois qualitatif et quantitatif. Elle conforte l'analyse du géotechnicien en lui fournissant des éléments complémentaires pour ausculter, diagnostiquer et prévenir de l'imminence d'une éventuelle rupture (rupture de piliers, déflection du toit, soulèvement du mur, etc.).

Les mesures sont effectuées à partir d'une grande variété de capteurs de déplacement/déformation, de pression ou de sons/microsismicité :

- à lecture directe ;
- à lecture indirecte par télésurveillance. La télésurveillance automatique consiste à interroger chaque capteur électronique, à une fréquence déterminée, grâce à un automate programmable puis à télétransmettre par modem les données vers un poste central de surveillance qui archive et traite informatiquement des données reçues (Figure 21).

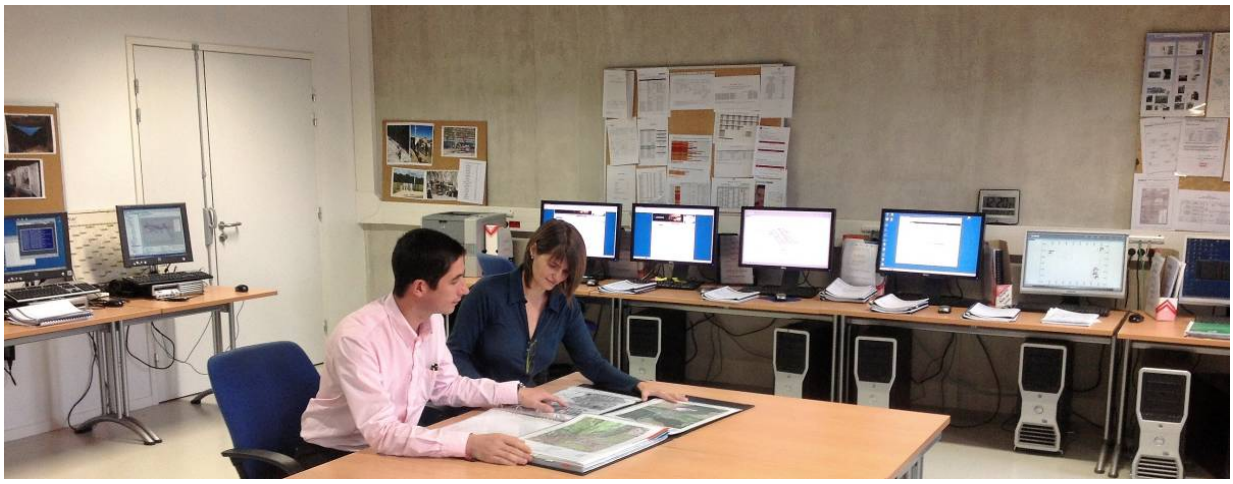

Figure 21 : Centre de survaillance (Source : http://cenaris.ineris.fr).

Les mesures de surveillance géotechniques les plus courantes sont, les mesures de déplacement/déformation des terrains. On peut en distinguer quatre principaux types :

- la convergence, mesure du rapprochement vertical entre épontes ou horizontal entre parements ;
- l'expansion, mesure de la dilatation volumique des piliers (ou fluage) ou de la séparation des bancs du toit ;
- la fissurométrie, mesure de l'écartement des fissures mécaniques ;
- le nivellement de surface par méthodes de géomètre classiques, par GPS ou par balises GPS « temps réel » (Figure 22) ;
- NB : la comparaison de photographies aériennes ou satellitaires haute résolution (technique Insar) est un autre technique pour mesurer les déplacement/déformation des terrains est sera développée plus avant.

Figure 22 : Balises GPS RTK (Real Time Kinematic) (Source : INERIS).

Les technique de mesures de pression/contrainte (ou « mesures pressiométriques »), nécessitent la mise en place de cellules pressiométriques hydrauliques (cellules de pression de tous types) dotées de capteurs électriques.

La surveillance acoustique est une méthode qui consiste à détecter et à enregistrer les bruits acoustiques (ondes de pression aériennes ou aquatiques) émises lors d'une chute de blocs et/ou de fracturations dans le toit, les piliers ou les parements d'une cavité souterraine. Un microphone correctement implanté dans une cavité permet de surveiller un périmètre d'un rayon allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres selon le contexte. La surveillance acoustique est facile d'implantation, mais cette technique requiert un environnement favorable à la diffusion des ondes acoustiques. En général, elle constitue une solution dans un contexte de grandes cavités souterraines abandonnées et silencieuses.

La surveillance microsismique est une technique qui consiste à détecter et enregistrer les ondes émises lors de la fracturation et de la fissuration des massifs rocheux (Figure 23). Le principe est donc identique à celui mis en œuvre en sismologie, si ce n'est que l'échelle est réduite de quelques ordres de grandeurs (magnitudes inférieures à 2). Le traitement, l'analyse et l'interprétation des séquences d'événements microsismiques en termes de distribution spatio-temporelle des foyers, de mécanismes et d'énergie à la source ainsi que de contenu fréquentiel, fournissent des informations essentielles pour l'aide à la gestion des aléas de mouvements de terrain.

Figure 23 : Sonde microsismique de paroi (Source : INERIS).

Surveillance et suivi des instabilités sur les flancs des dépôts de stériles et de résidus de traitement (visuel et instrumentée)

Dans des cas bien spécifiques, lorsque des incertitudes sur la stabilité des dépôts demeurent, un contrôle de la stabilité des talus et de leur assise est nécessaire pour suivre le comportement à court et à long termes de l'ouvrage et pouvoir prendre rapidement les bonnes dispositions en cas d'anomalie. En plus des mouvements de pente, il faut envisager l'érosion qui contribue de façon chronique et diffuse au transport des matériaux particulaires généralement contaminés

Il s'agit toutefois de surveiller différemment :

- les dépôts de stériles d'exploitation, généralement déposés en tas (munis d'un dispositif de gestion des eaux)
- les installations de stockage de déchets miniers et des bassins de collecte ou de traitement des eaux qui peuvent être associés qui sont des ouvrages complexes ;

Il y a des différences de comportement environnemental fondamentales entre les deux types de dépôts dues à leur composition minéralogique, chimique et surtout granulométrique) ainsi qu'à leur dangerosité potentielle.

Un contrôle visuel des ouvrages les plus suspects, par une personne compétente, permet de rechercher tous les indices d'instabilité tels que fissures de traction, bourrelets dans le talus, soufflage du pied de verse, suintements d'eau, érosion régressive, fluage des matériaux...

Selon l'enjeu encouru, un programme d'auscultation peut également être envisagé. Il peut s'agir d'une auscultation instrumentée externe (suivi et mesures des déplacements de plots topographiques de surface) ou d'une auscultation instrumentée interne (tubes inclinométriques ou inclinomètres, etc.).

Enfin, lorsqu'une nappe d'eau risque, du fait notamment de la granulométrie des résidus, de se former à l'intérieur de l'ouvrage de dépôt, si cette nappe est de nature à ramener la valeur du coefficient de sécurité en dessous de celle retenue par l'étude de stabilité tenant compte de l'utilisation prévue des terrains, la mise en place d'un contrôle par piézomètres peut s'avérer nécessaire pour suivre l'évolution du niveau de la nappe au sein et à proximité immédiate du dépôt.

Suivi/Surveillance des mouvements de terrain par télédétection

Les méthodes de télédétection, qu'elles soient aériennes ou aéroportées, optique ou radar, permettent de suivre, à l'échelle locale comme à l'échelle régionale, des déformations de surface induites par des travaux miniers en cours ou fermés.

Surveillance par interférométrie Radar satellitaire

L'interférométrie radar, ou InSAR, est une méthode qui utilise simultanément deux radars à synthèse d'ouverture, ou bien le même radar est utilisé à des instants différents. On étudie alors les différences de phase point à point des images générées pour retrouver la dimension verticale du terrain. Cette méthode permet de générer des modèles numériques d'élévation, ou bien, en soustrayant un modèle numérique de terrain, de mesurer des déplacements centimétriques dans les zones où le signal reste cohérent (Interférométrie radar différentielle).

A partir d'une série temporelle d'image satellite radar, cette méthode permet de mesurer des déformations verticales de surface centimétriques et leur évolution dans le temps (Figure 24).

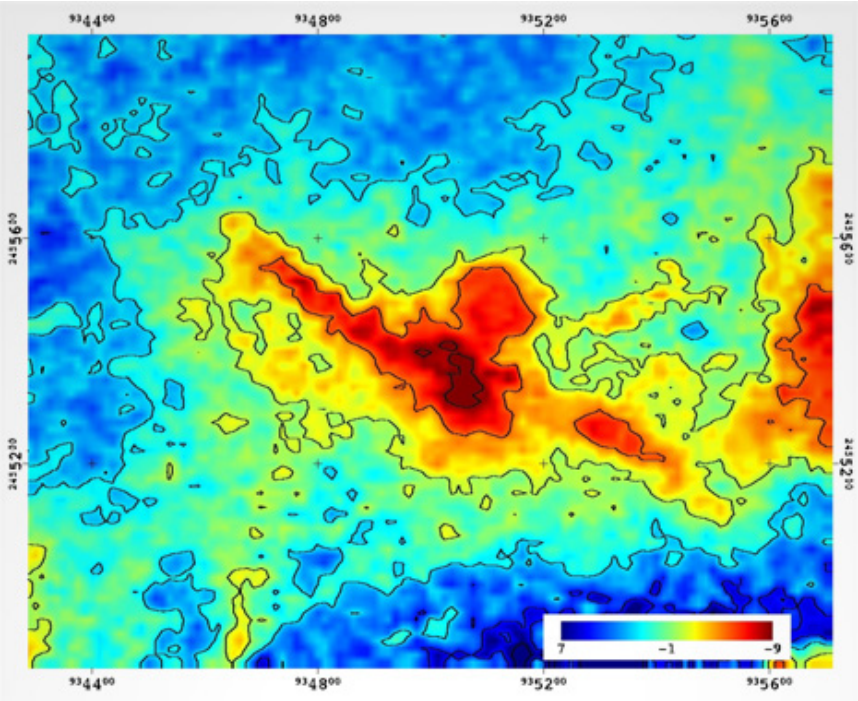

Figure 24 : Vitesse moyenne de déformation mesurée par interférométrie Radar sur la commune de Hilsprich (Source : http://www.brgm.fr/projet/mesure-deformation-sol-sur-commune-hislprich-interferometrie-radar).

Surveillance par MNT Lidar aéroporté

L'avantage d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) LiDAR par rapport à un MNE (Modèle Numérique d'élévation) issu de couples stéréoscopiques d'images satellite est sa capacité à fournir l'altitude du sol et non seulement celle du premier objet rencontré (canopée, bâtiment, etc.), comme le montre la Figure 25.

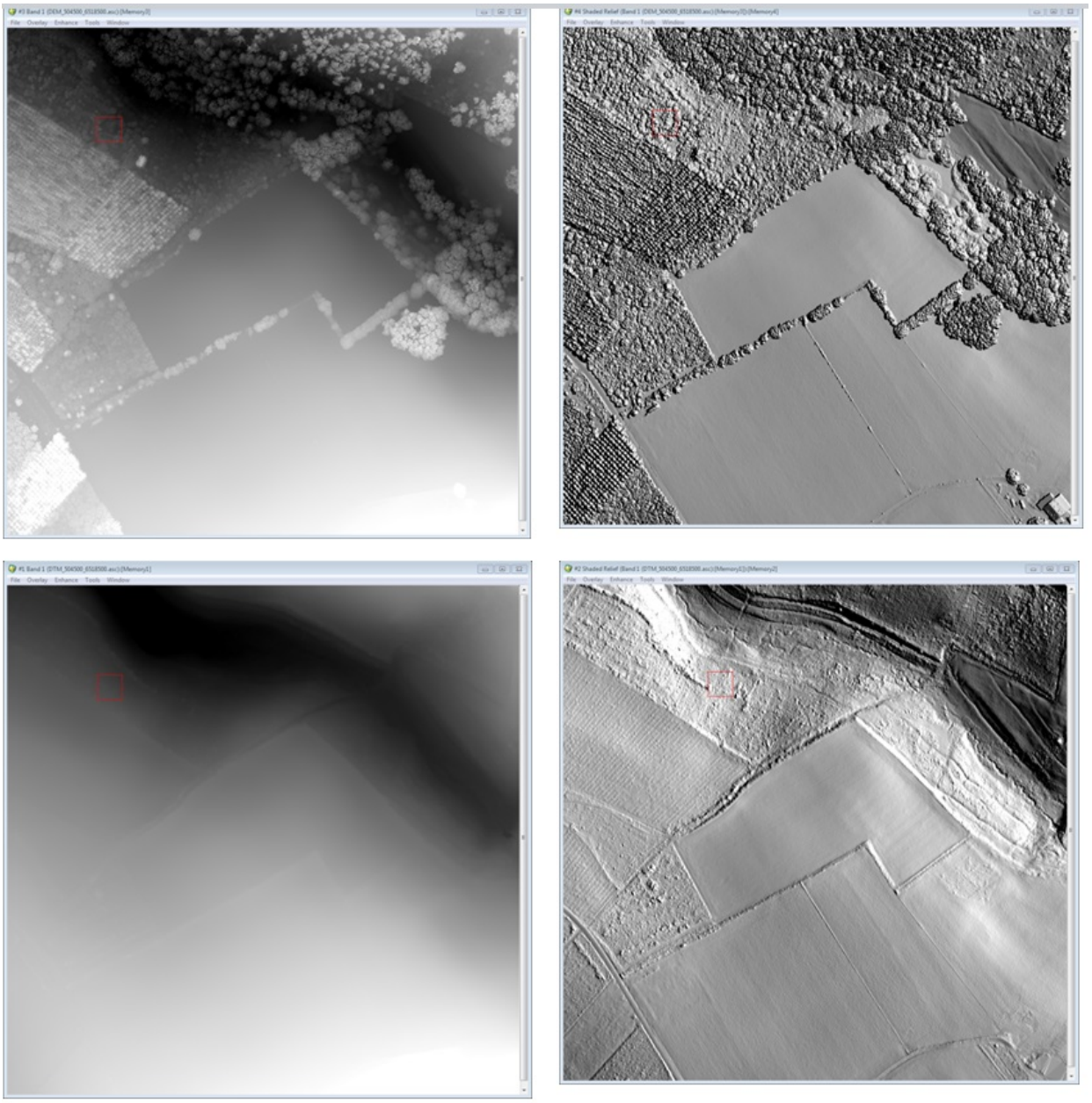

Figure 25. Gauche-Haut : MNE Lidar. Droite-Gauche : MNE ombré. Gauche-bas : MNT LiDAR. Droite-bas : MNT ombré (Source : BRGM).

Le MNT LiDAR fournit des informations topographiques sur des faibles différences d'altitude du sol et est ainsi bien adapté à la cartographie des mouvements de terrain liées à l'exploitation minière. Les MNT LiDAR permettent la mise en évidence d'effondrements de surface d'amplitude métrique sur des distances métriques à décamétriques (Figure 26 et Figure 27). Peu visibles sur des images optiques, même des ortho mosaïques aériennes à très haute résolution (Figure 26, à gauche), de trop forte amplitude pour être abordés par l'interférométrie radar, ces effondrements sont en revanche bien visibles et mesurables sur le MNT LiDAR à très haute résolution (Figure 26, à droite). Le MNT permet de mesurer l'ampleur des effondrements et met en évidence les fissures de surface associées (Figure 27).

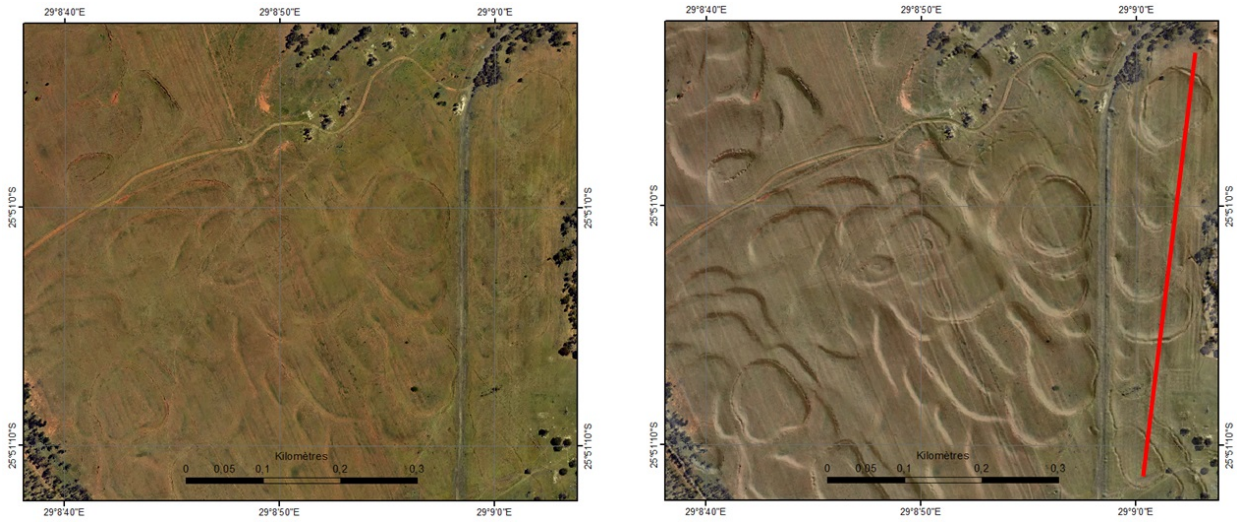

Figure 26 : Perturbations de surface et subsidence liés à l'exploitation souterraine de charbon par chambres et piliers, bassin houiller du Mpumalanga, Afrique du Sud. En rouge le profil de la Figure 27. (Source : BRGM).

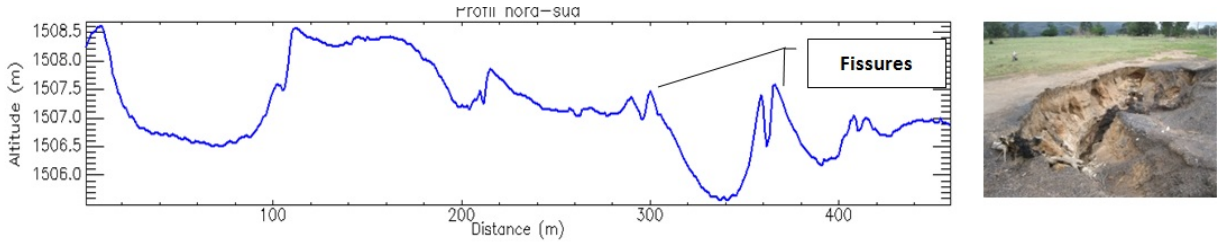

Figure 27 : Profil topographique nord-sud montrant les figures de subsidence et photographie de terrain (Source : BRGM).

SURVEILLANCE DE LA QUALITE DES EAUX ET DES SOLS

Identification visuelle de pollutions minières de surface à partir d'images spatiales à très haute résolution.

On entend par très haute résolution spatiale les capteurs satellitaires ayant une résolution au sol inférieure au mètre (par exemple Pléiades, SPOT 6 et 7, IKONOS, Quickbird, WorldView-2, etc.).

Les images optiques à très haute résolution spatiale (1 m ou moins) s'avèrent précieuses dans l'identification des infrastructures sur les sites miniers en exploitation ou abandonnés, dans le suivi des évolutions temporelles des infrastructures minières et dans l'impact de ces structures sur leur environnement immédiat (Figure 28 et Figure 29).

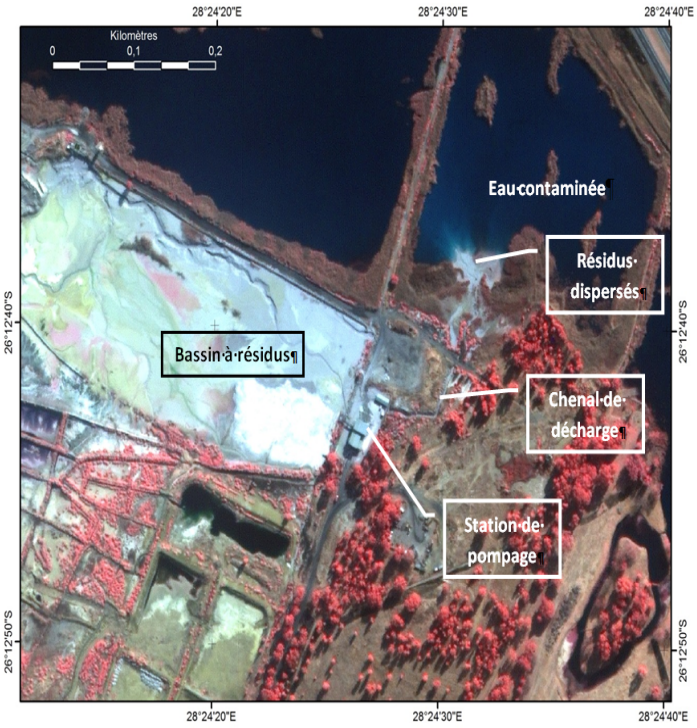

Figure 28 : Image Ikonos (résolution 1 m) montrant une contamination des eaux de surface par un chenal de décharge à East Rand, Afrique du Sud (Source : BRGM).

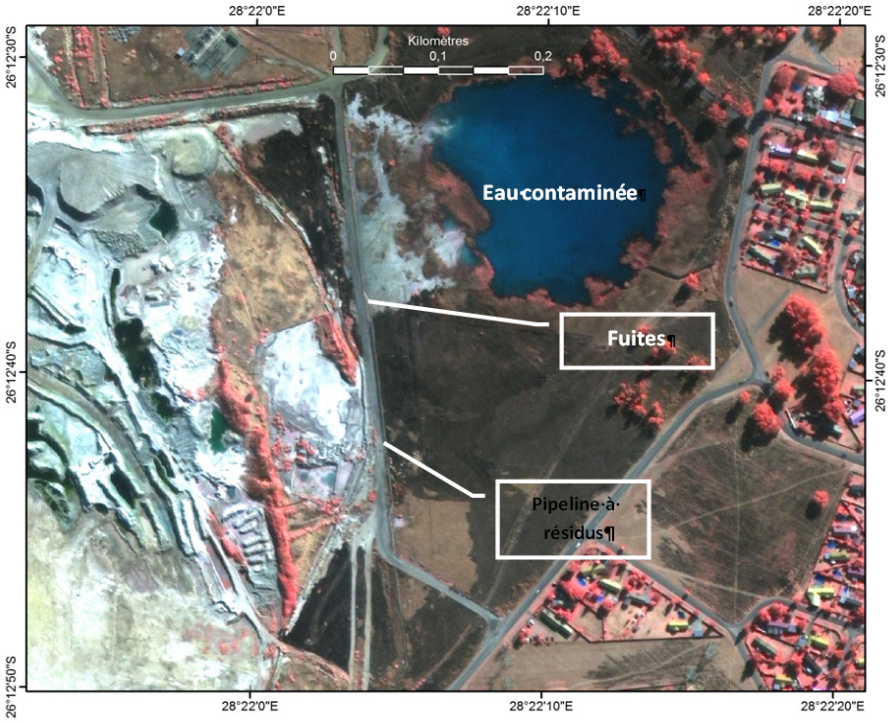

Figure 29 : Image Ikonos montrant une contamination des eaux de surface dûe à des fuites sur un pipeline de transport de résidus miniers à East Rand, Afrique du Sud (Source : BRGM).

Estimation du potentiel de contamination des eaux de surface et souterraines à partir de modèles numériques de terrain (MNT)

Les algorithmes d'accumulation de flux permettent de calculer un réseau de drainage à partir d'un MNT ou d'un MNE de surface. La Figure 30 suivante est l'application de technique à un MNT régional qui permet de modéliser l'écoulement vers l'aval d'un éventuel suintement d'eaux contaminées à la base d'une digue d'un bassin à résidus miniers et donc de positionnés au mieux sur le terrain les point d'observations ou de mesures.

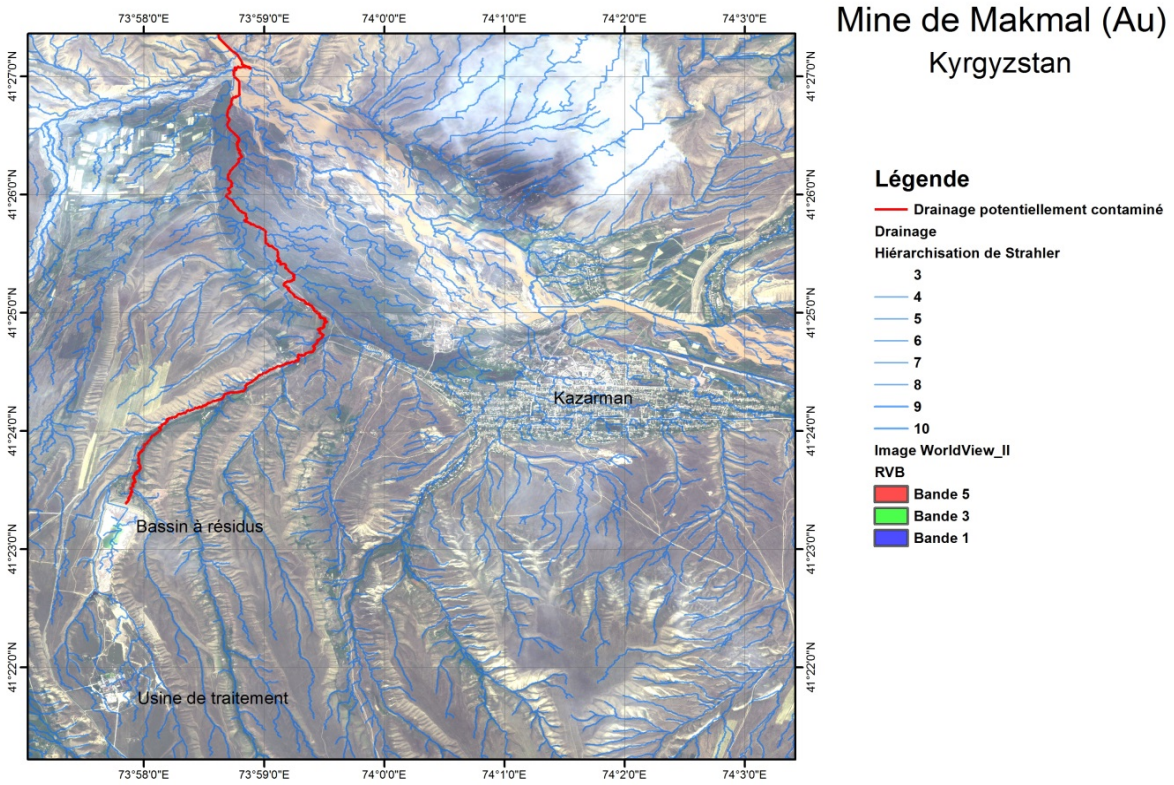

Figure 30 : Modélisation d'une possible contamination du réseau hydrographique à partir d'une fuite au pied d'une digue d'un bassin à résidus miniers, Mine de Makmal, Kyrgyzstan (Source : BRGM).

Un travail comparable peut être mené pour modéliser, en tout point du réseau de surface, l'extension d'une lame (d'eau ou de boue) de hauteur donnée. Sur l'exemple précédent (mine de Makmal), on peut modéliser quelle serait l'extension d'une lame de boue d'épaisseur de 5 m en aval du bassin en cas de rupture de la digue (Figure 31).

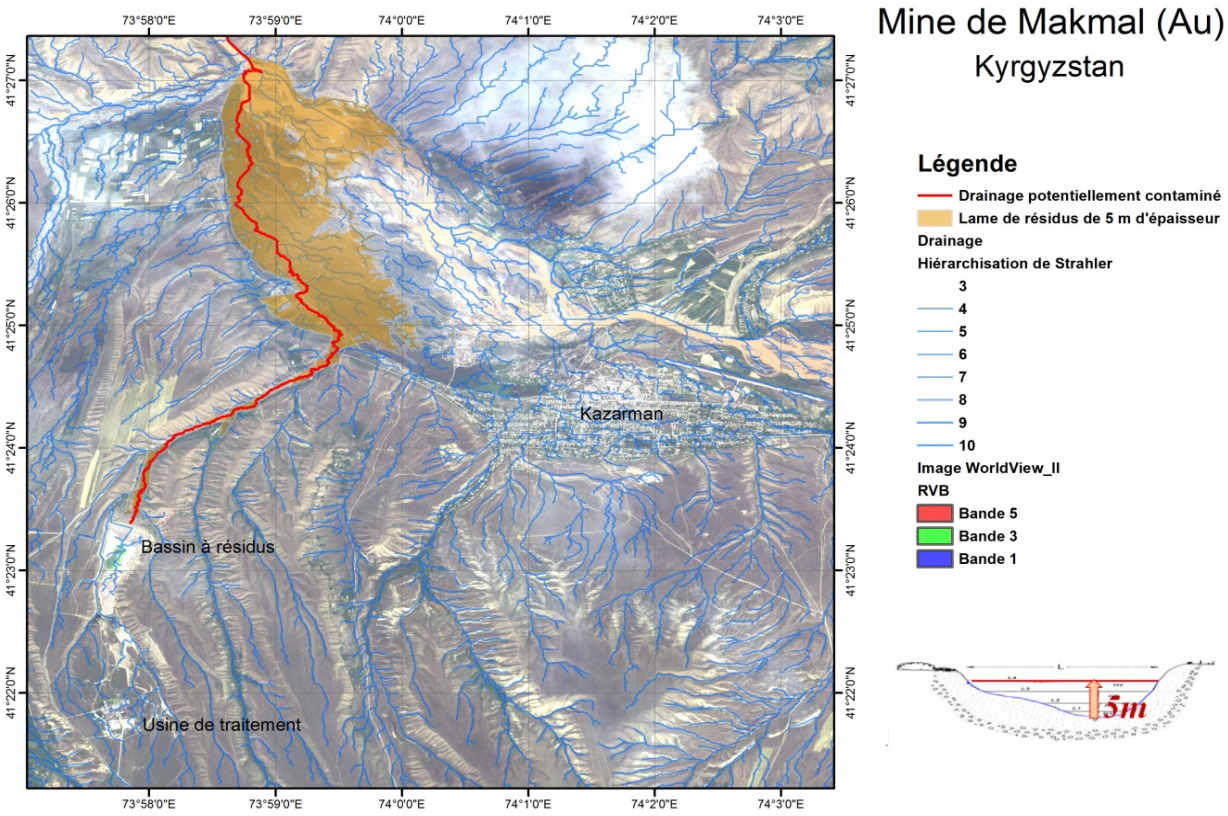

Figure 31 : Modélisation de l'extension maximale probable d'une lame de boue d'épaisseur constante de 5 km, Min de Makmal, Kyrgyzstan (Source : BRGM).

Cartographie de panaches de contamination par spectrométrie imageante

La spectroscopie imageante, ou imagerie hyperspectrale est une technique de télédétections optique qui permet l'identification, la caractérisation et la cartographie d'espèces minérales, ou d'associations de minéraux, d'après leurs caractéristiques spectrales, dans la gamme spectrale du visible proche infrarouge – moyen infrarouge (0,45 à 2,5 µm) et/ou de l'infrarouge thermique (8 à 12 µm). Les minéraux concernés sont essentiellement les oxydes de fer, les minéraux argileux et carbonatés (liaisons Al-OH, Mg-OH, Fe-OH).

Il est ainsi possible de générer une librairie spectrale de spectres terrain de référence, du site étudié, dans laquelle on peut identifier les caractéristiques spectrales de chaque minéral, ou de chacune des associations minérales reconnues sur le terrain.

Cette approche est souvent utilisée pour cartographier les différents minéraux présents sur un site d'étude (en particulier les minéraux du drainage minier acide DMA, les minéraux amiantifères…), à partir d'images à très haute résolution spectrale.

Appliqué à la mine de Sao Domingos (Portugal) cette technique a permis la cartographie des minéraux du DMA sur l'ensemble du site (Figure 32, travaux réalisés par le BRGM et l'IGM dans la cadre du projet MINEO, http://www2.brgm.fr/mineo/)

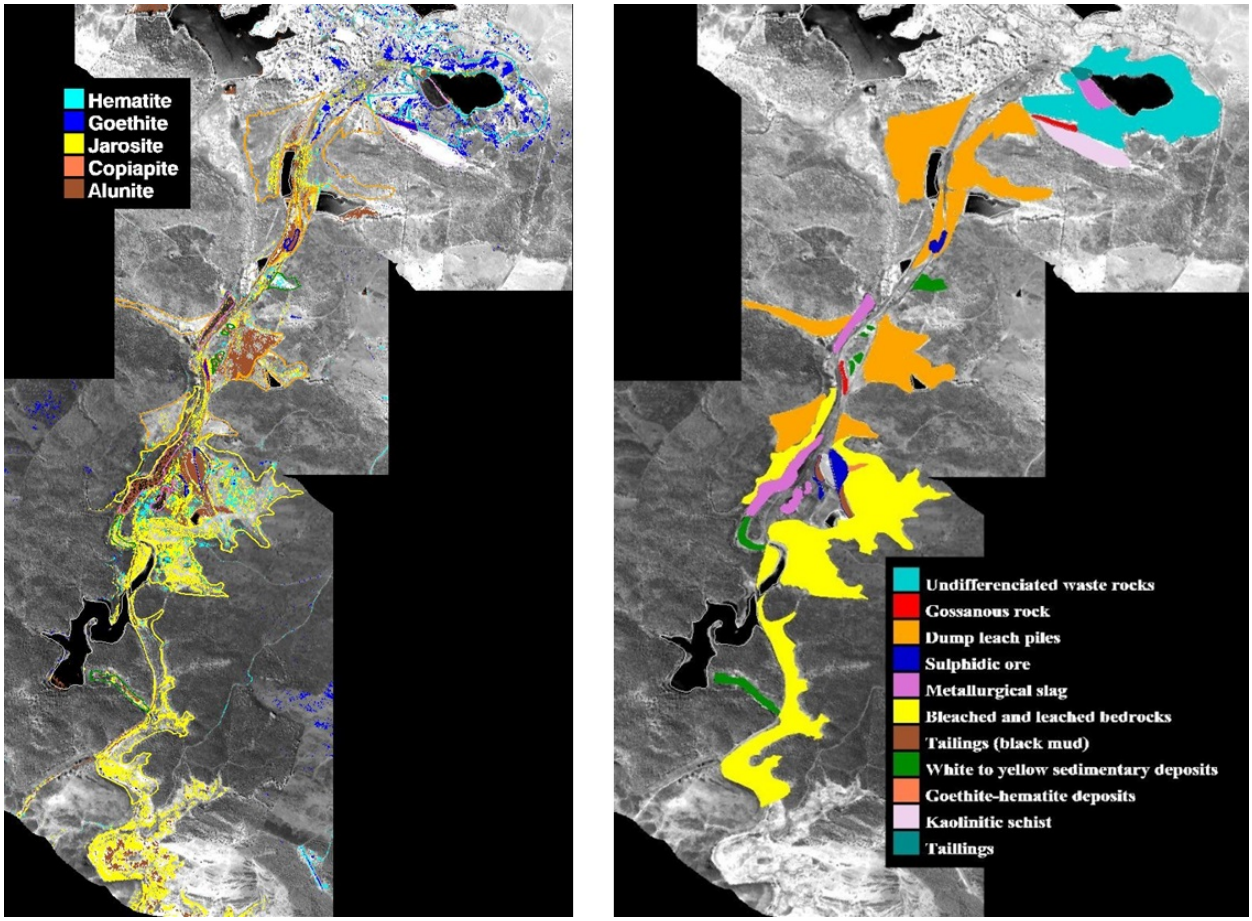

Figure 32 : Comparaison entre la carte des minéraux du drainage minier acide obtenue par imagerie hyperspectrale et la carte de terrain des résidus miniers, Mine de Sao Domingos, Portugal (Source : BRGM).

Cartographie de panaches de contamination par géophysique aéroportée

En présence de minéraux radioactifs sur un site minier, la radioactivité peut être un des traceurs de la pollution. La spectrométrie gamma permet de mettre en évidence les zones de forte concentration en radioéléments liées aux activités minières.

Le ratio uranium et thorium >1 (en rouge sur Figure 34) indique les zones riches en uranium et pauvres en thorium, typiques des résidus à or et uranium dans le bassin du Witwatersrand (U/th entre 0,1 et 0,5 dans le milieu naturel) et fournit donc une carte précise des zones contaminées (alentour des bassins à stériles et réseau hydrographique immédiatement aval). Superposé à l'image SPOT (Figure 33), ce ratio montre clairement la contamination radioactive autour des bassins et celle du réseau hydrographique (zones humides) en aval.

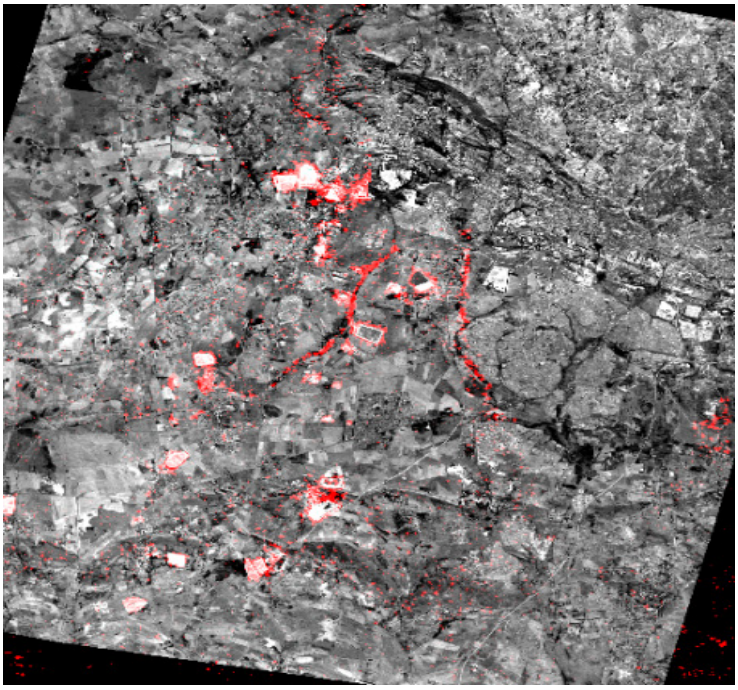

Figure 33 : Ratio U/Th >1 superposé à une image Spot (Source : BRGM).

AUTRES SUIVIS

L'imagerie hyperspectrale dans le domaine du thermique a permis de suivre le réaménagement d'un mine à ciel ouvert de lignite à ciel ouvert de la mine de Sokolov (République Tchèque).

L'imagerie hyperspectrale permet également de cartographier l'état de la végétation d'un site minier (mine de fer d'Ezrberg en Autriche combinées sous SIG avec des informations telles que la pente, l'ensoleillement (orientation de la pente par rapport au nord), cette cartographie permet de calculer le potentiel de re-végétalisation du site.

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

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE ET DES FINANCES

Géosciences pour une Terre durable
brgm

INERIS
maîtriser le risque pour un développement durable

Mine & Société
Réseau d'excellence