



C o u r s
Exploitation et Environnement
Master 2 Ressources Minérales et Géomatériaux

Farès KESSASRA
Maître de Conférences

18 janvier 2016

Table des matières

1	Introduction	4
2	Définitions et généralités	6
2.1	Code de l'environnement	6
2.2	Etudes d'Impact sur l'Environnement (EIE)	7
2.3	Développement Durable (DD)	8
3	Impacts de l'exploitation sur les écosystèmes aquatiques	12
3.1	Introduction	12
3.2	Impacts des carrières et gravières	13
3.2.1	Lacs et Rivières	13
3.2.2	Nappes aquifères	15
3.3	Impacts des gisements de minerais	19
3.3.1	Introduction	19
3.3.2	Différentes phases d'un projet minier	19
3.3.3	Drainage Acide (DA)	23
3.3.4	Métaux lourds dans l'environnement	26
4	Impacts sur les sols, cultures et forêts	30
4.1	Impacts sur les sols	30
4.1.1	Les sols face aux risques	30
4.1.2	Contamination des sols	30
4.2	Impacts sur les forêts	32
5	Impacts sur le milieu naturel et le paysage	33
5.1	Impacts sur le milieu naturel : la faune et la flore	33
5.2	Impact sur le paysage	36
6	Impacts sur l'atmosphère	37
6.1	Poussières	37
6.1.1	Sources mobiles	38
6.1.2	Sources fixes	38
6.1.3	Sources fugitives	38
6.2	Bruits et vibrations	38
7	TD : Ateliers thématiques et débats d'idées	40



Ce cours est dispensé dans le cadre de mes enseignements dans les différents Masters proposés par le Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université de Jijel. Il a été conçu, en grande partie, sur la base de rapports techniques et documents publics, en l'absence d'ouvrages spécialisés. Mais aussi complété par des ouvrages et sites en ligne spécialisés dans chacun des écosystèmes abordé. Ces rapports et bulletins techniques sont édités par le BRGM (Orléans), les différentes agences de l'eau (France), la Commission Européenne (Bruxelles), The Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW, Eugene, USA), ICMM, the International Concil of Mines and Metals. Seul un ouvrage édité par Springer en 2010 traite l'impact des déchets miniers sur l'environnement "Mine Wastes, Characterization, Treatment and Environmental Impacts", de Bernd G. Lottermoser.

Chapitre 1

Introduction

L'environnement peut être considéré comme un ensemble de systèmes interconnectés. Se focaliser sur un seul de ces systèmes en faisant abstraction de tous les autres et des multiples interactions peut se révéler une approche réductrice. Adopter donc une approche globale permet de mettre en oeuvre des méthodologies d'étude qui nécessitent d'intégrer les spécificités de l'environnement. L'étude doit s'achever par une réinsertion des résultats (ponctuels ou locaux) dans le contexte global, de manière à en estimer les impacts.

La notion de l'environnement recouvre l'environnement naturel, l'environnement physique ainsi que le cadre de vie entourant l'homme. L'aspect social fixe les règles et les limites à la liberté individuelle tout en veillant sur le droit à la propriété individuelle (Carrières, concessions, forages), la libre entreprise (Bureaux d'études, PME-PMI, usines) et le libre marché (Transactions commerciales, import-export). La société édicte les lois environnementales et celles réglant le commerce et l'industrie ainsi que les lois sociales pour un meilleur partage des richesses.

On peut décomposer alors l'environnement naturel en 4 sphères : géosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère où la notion d'échelles s'y implique. Tout d'abord, l'échelle spatiale considère qu'à l'intérieur d'un territoire délimité, on peut observer et comprendre le fonctionnement de son environnement local (de quelques mètres), tout comme l'environnement planétaire voire même le système solaire à une échelle plus étendue. A l'espace, s'ajoute la notion de l'échelle temporel où l'aspect dynamique des processus naturels (allant de l'instant à l'échelle des temps géologiques) nécessite un suivi et une observation continue pour comprendre l'évolution des différents éléments constituant ces sphères. Les interactions entre ces éléments ne font que compléxifier la réflexion et parfois dans les interfaces (frontières pour les géographes ou conditions aux limites pour les mathématiciens) que l'on trouve les réponses à ces différentes problématiques. En effet, la nécessité de définir des limitations est à l'origine même de la notion de l'état et de la souveraineté qu'on exerce sur un territoire donné (pays, bassin, ville), régit par une législation. L'environnement est également complété par des notions de ressources, de déchets et d'énergie. Pour qu'un milieu naturel fonctionne en plein temps, il doit disposer d'énergie, de ressources et de matières suffisantes. Ces milieux, de par leurs transformations physico-chimiques vont générer des sous-produits sous forme de déchets. Il existe plusieurs types de déchets selon une échelle de dangerosité, allant du déchet biodégradable (Matière organique, fécale,...) aux déchets extrêmement dangereux (Déchets nucléaires, radioactifs, toxiques,...).

La notion de cycles (carbone, eau, soufre, azote) et d'interaction entre les cycles permet de visualiser et ensuite gérer les incidences et impacts sur les ressources et leurs déchets. Le moteur principal de ces cycles étant bien l'énergie (Hydrocarbures, soleil, géomatériaux, mines, forêts,...), exploiter ces ressources naturelles relève de l'activité industrielle et donc de l'environnement humain.

L'environnement humain est régit par les besoins de la société, la diversité des sociétés mondiales induit inexorablement une diversité dans les besoins, les visions et les réflexions. L'économie vient matérialiser ces besoins de groupes sociaux et la politique et la législation régule toutes ces actions et surtout ses incidences sur le milieu naturel. Le rôle des acteurs de la société est primordiale et il convient d'intégrer au discours la gouvernance et les processus de prise de décision.

Dans ce cours, nous nous tacherons à identifier et évaluer l'action de l'homme sur son milieu naturel, spécifiquement les retombées de l'exploitation des carrières, gravières, mines et gisements sur les différents écosystèmes. Nous proposerons par la suite des solutions de remédiation et nous terminerons par des ateliers pédagogiques qui compléteront cet enseignement.

Chapitre 2

Définitions et généralités

2.1 Code de l'environnement

Un écosystème est l'ensemble des milieux physiques (dynamique des paysages) et les organismes y vivant (dynamique des populations). Il a aussi une dimension temporelle (dynamique) qualifiée d'évolutive. On fait appel à des notions en paléontologie, géographie, économie. Basée sur la compréhension des relations entre les êtres vivants et l'approfondissement de la connaissance de leur milieu et des interactions des êtres vivants avec celui-ci, l'écologie moderne s'est posée en science appliquée (art, économie, ou technique) en incluant l'homme comme élément clé, elle se propose de nous aider à gérer la biosphère pour une maîtrise intégrée des ressources naturelles.

Le code de l'environnement vient poser le principe général de la protection de l'environnement en rappelant que :

- les espaces, ressources et milieux naturels, les sites et paysages, les espèces végétales et animales, la diversité et les équilibres biologiques font partie du patrimoine commun de la nation,
- leur protection, leur mise en valeur, leur remise en état et leur gestion sont d'intérêt général et concourent à l'objectif de développement durable qui vise à satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

Il pose quatre principes fondamentaux qui s'appliquent directement à l'évaluation environnementale (Hertig, 2006) :

- **Le principe de précaution** : l'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ;
- **Le principe d'action préventive et de correction**, par priorité à la source des atteintes à l'environnement, en utilisant les meilleures techniques disponibles à un coût économiquement acceptable ;
- **Le principe de causalité ou pollueur-payeur** : Il précise que celui qui est à l'origine de la nuisance doit supporter les frais occasionnés par les mesures de protection de l'environnement ;
- **Le principe de participation** : chaque citoyen doit avoir accès aux informations relatives à l'environnement, y compris celles relatives aux substances et activités

dangereuses.

L'évaluation environnementale désigne l'ensemble de la démarche destinée à analyser les effets sur l'environnement d'un projet de développement économique, mesurer leur faisabilité environnementale et aider à la prise de décision. Il pourrait s'agir également d'un classement d'un site qui a pour objectif de le maintenir dans son état d'origine, qu'il soit naturel ou urbain (BRGM, 1998), zones protégées, zones humides, sites archéologiques, monuments historiques,..etc. L'évaluation vise à (Hertig, 2006) :

- améliorer la décision par une prise en compte explicite et sélective des considérations environnementales,
- fournir une base solide pour la gestion des conséquences sur l'environnement des diverses actions de développement économique,
- associer les citoyens aux processus de prise de décisions inhérentes aux modifications prévisibles de leur cadre de vie,
- favoriser l'intégration des objectifs fondamentaux que sont la protection de l'environnement et le développement durable.

L'évaluation environnementale dispose de nombreux outils comme l'étude d'impact sur l'environnement (Figure 3.1) qui sert à analyser les effets positifs et négatifs des projets de travaux et d'aménagement sur l'environnement et le cadre de vie général de la population. Un exemple d'évaluation des impacts et des risques a été établi sur le site du piton d'Akbou (Kessasra, 2015), exploité par plusieurs carrières d'agrégats (Figure 2.2).

2.2 Etudes d'Impact sur l'Environnement (EIE)

La prise en compte des données de l'environnement est un passage obligé dans la procédure d'autorisation d'ouverture des carrières (BRGM, 1998) et des mines. L'EIE a pour but d'appréhender les risques qui découlent d'une action entreprise par l'homme pour assurer un développement et un équilibre équitables entre l'homme et les écosystèmes. Elle vise à entretenir et protéger le milieu vital de l'homme contre les effets préjudiciables à son environnement et sa santé : disparition des forêts, inondations et sécheresses fréquentes, eutrophisation, détérioration du patrimoine architectural. Au sens du législateur, il ne constitue pas un moyen d'entraver le développement socio-économique mais au contraire il représente un outil de planification et de contrôle (Hertig, 2006). Mais la recherche des contraintes relatives à la protection de la nature passe par l'établissement d'une hiérarchie permettant de distinguer d'une part la nature juridique des espaces affectés par une protection ou une gestion particulière et d'autre part les intérêts communs (BRGM, 1998). Dans ce concept existe une préoccupation éthique quant à l'avenir de tel ou tel aspect du patrimoine. L'EIE est indissociable à la réalisation du projet et s'inscrit juridiquement dans le cadre des procédures existantes et conduisant à l'autorisation de construire, l'octroi d'une concession ou à l'approbation des plans. Les acteurs de l'EIE sont (Hertig, 2006) :

- **le requérant** (auteur du rapport ou Maître d'ouvrage) détermine si son projet doit faire l'objet d'une EIE, effectue une enquête préliminaire pour identifier les impacts, établit un cahier de charges en collaboration avec le service spécialisé, établit et remet le rapport d'impact aux autorités et enfin informe le public de la décision finale,

- **l'autorité compétente** qui prendra la décision relative à l'autorisation d'exploiter. En cas de doute, elle détermine si le projet nécessite une EIE, entame la procédure et assure la coordination entre le requérant et le service spécialisé, veille à ce que ce service dispose du cahier de charges, du rapport d'impact et prend les décisions nécessaires ;
- **les services spécialisés** de protection de l'environnement (Direction de l'environnement), assure le suivi de l'EIE, évalue le cahier de charges, détermine si le rapport d'impact est cohérent scientifiquement, examine si le projet répond aux prescriptions environnementales et enfin communique ses conclusions.
- les personnes ou les organismes habilités à s'opposer au projet (opposants potentiels).

Le rapport d'impact doit décrire (Hertig, 2006) :

- L'état initial du site retenu pour l'exploitation, le législateur a besoin de disposer d'une base unique de référence pour l'identification des impacts et l'évaluation de leurs incidences,
- La description du projet comporte les mesures prévues pour la protection de l'environnement (mesures intégrées),
- La description des nuisances concerne l'état de service et les impacts de chantier,
- Les mesures visant à réduire les nuisances (mesures complémentaires) ainsi que leur coût de revenu,
- S'il s'agit d'installations publiques ou privées au bénéfice d'une concession, le rapport contiendra la justification du projet.

Les bénéfices des processus d'EIE sont (ELAW, 2010) :

- Elimine potentiellement les projets peu valables du point de vue environnemental en propose des conceptions modifiées pour réduire les impacts sur l'environnement ;
- Identifie des alternatives faisables et prévoit des impacts défavorables significatifs ;
- Identifie des mesures d'atténuation pour réduire, compenser, ou éliminer des impacts majeurs ;
- Engage et informe les communautés potentiellement affectées et les individus ;

2.3 Développement Durable (DD)

La notion du développement durable, implicite à la démarche de l'étude d'impact, est un concept dynamique à dimensions multiples. Les Nations-Unies le définit comme " le développement qui répond aux besoins économiques actuels sans compromettre la capacité de la planète à satisfaire les besoins des générations futures". Cette définition implique un passage de l'idée d'une durabilité écologique à un cadre où le contexte socio-économique est également mis en exergue. Il comporte 4 piliers (UNESCO) :

- Equité sociale : répartition équitable des richesses naturelles et produites (Pacte social) ;
- Efficacité économiques : économie orientée vers les défis de l'avenir (Energies renouvelables) ;
- Environnement : protection du patrimoine naturel et de la biodiversité ;

-
- Démocratisation des modes de décisions (Concertation, participation et consensus)

Processus d'évaluation environnementale	Définitions	Outils d'évaluation	Exemples d'applications
Participation citoyenne	Association du public à la prise de décision d'un projet.	Débat public. Concertation. Enquête publique.	Tous les projets susceptibles d'avoir un impact environnemental et social important.
Evaluation environnementale des actions stratégiques	Processus d'évaluation et d'examen des plans, programmes, politiques et textes législatifs.	Rapport sur les incidences environnementales.	Schémas de services collectifs. Documents d'urbanisme. Contrats de plan Etat-Région et Docup.
Evaluation des impacts sur l'environnement des projets et programmes de travaux	Identification et analyse des effets positifs et négatifs des projets et programmes de travaux sur l'environnement, le cadre de vie et la santé.	Etude d'impact.	Tous travaux et projets d'aménagement entrepris par une collectivité publique ou un pétitionnaire privé ou nécessitant une autorisation ou une décision d'approbation.
Evaluation appropriée des incidences	1. sur l'eau (au titre de l'article L. 214-3 du code de l'environnement) Analyse des incidences de l'opération sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, y compris le ruissellement. 2. sur la conservation des sites Natura 2000 (au titre de l'article L 414-4 du code de l'environnement) Analyse des incidences de l'opération au regard des objectifs de conservation du site.	Document d'incidences sur l'eau. Document d'incidences sur la conservation des sites Natura 2000.	Installations, ouvrages, travaux et activités soumis aux régimes d'autorisation ou de déclaration et susceptibles de présenter des incidences sur le régime des eaux, la ressource en eau, la qualité et la diversité du milieu aquatique. Tout projet ou programme de travaux, d'ouvrages ou d'aménagement soumis à un régime d'autorisation ou d'approbation administrative et dont la réalisation est de nature à affecter un site Natura 2000.
Suivis et bilans environnementaux ex-post	Moyens d'analyses et de mesures nécessaires au contrôle des ouvrages et installations et à la surveillance de ses impacts sur l'environnement tout au long de leurs cycles de vie (chantier, exploitation, entretien).	Suivi/Bilan environnemental.	Installations soumises à une réglementation particulière. Tous travaux ou aménagements chaque fois que les enjeux environnementaux le justifient.
Audit environnemental	Moyen d'évaluation systématique et objectif de la situation existante permettant d'évaluer la conformité de l'organisme audité par rapport à un référentiel (réglementaire, normatif, interne).	Audit environnemental.	Industries et services. Installations classées pour l'environnement. Ouvrages de traitement des eaux (stations d'épuration).
Analyse environnementale du cycle de vie	Evaluation des effets sur l'environnement d'un produit, processus ou activité en établissant et en quantifiant l'énergie et les matériaux utilisés et rejetés dans l'environnement.	Analyse environnementale.	Production de biens de consommation (par ex. : automobiles).

FIGURE 2.1 – Principaux outils de l'évaluation environnementale (Hertig, 2006)

Ecosystème	Substance à risque	Source d'émission	Populations exposées	Risque
Air	Poussière minérale	Production-explosion Transport (Engins) Gaz d'échappement	Population d'Akbou sur un rayon < à 50 km	Elevé
	COV			Elevé
	Autres *			Elevé
Eau	Hydrocarbures	Carburants de moteurs Eau d'arrosage Eau de ruissellement Lixiviats des déchets Explosifs	Usagers de la Soummam et de la nappe: - Agriculteurs - Population	Elevé
	Métaux lourds			Elevé
	Sédiments			Négligeable
Sol	Poussière	Production-explosion Eau d'arrosage Eau de ruissellement	- Agriculteurs - Consommateurs	Très limité
	Rejets acideux			Très limité

* : Oxydes d'azote, oxydes de soufre, oxydes de carbone

FIGURE 2.2 – Evaluation des impacts sur les écosystèmes et identification des risques des carrières d'agrégats du piton d'Akbou (Kessasra, 2015)

Chapitre 3

Impacts de l'exploitation sur les écosystèmes aquatiques

3.1 Introduction

Au sein des industries minières et d'extraction, la prise de conscience de l'enjeu écologique s'est considérablement renforcée. Par conséquent, les exploitations ayant eu dans le passé des effets nocifs sur l'environnement ne peuvent être considérées comme représentatives des modes de gestion des déchets des exploitations en vigueur aujourd'hui. La gestion des carrières, des résidus et des stériles des gisements de minerai constitue un élément de l'exploitation, laquelle inclut également, l'extraction proprement dite et l'étape de traitement du minerai et des granulats.

En premier lieu : Les carrières, dont les gravières en vallée alluviale, relèvent du régime des installations classées pour la protection de l'environnement. Chaque ouverture ou extension de carrière fait l'objet d'une EIE, d'une enquête publique et d'une instruction administrative conclue par un arrêté. L'ouverture d'une gravière dans une nappe alluviale est susceptible donc d'entraîner des répercussions sur la nappe elle-même et sur la rivière qui lui est liée. Même si un cours d'eau et sa nappe alluviale en régime normal ne présentent pas toujours des échanges d'eau importants en volume, ils font partie d'un seul et même système qui doit être considéré dans son ensemble. Le vieillissement des gravières est mal connu au delà de deux décennies et un grand nombre de facteurs variables d'un site à l'autre et interdépendants rend impossible une systématisation des conclusions, et impose des études particulières pour chaque cas. Il importe donc de connaître les impacts possibles, afin de les prévenir et de maîtriser l'évolution de ces milieux.

En second lieu : les gisements de minerai où leurs résidus et stériles des minéraux métallifères ou de métaux, de charbon, de minéraux industriels employés dans le secteur chimique ou dans la construction ont un impact direct sur les eaux. Ces impacts dépendent d'une variété de facteurs comme la sensibilité du terrain, la composition des minéraux extraits, le type de technologie employé, la connaissance et l'engagement environnemental de la communauté et la capacité de gérer et contrôler les règlements environnementaux.

3.2 Impacts des carrières et gravières

3.2.1 Lacs et Rivières

Un cours d'eau transporte des matériaux (Transport solide). Les alluvions les plus grossières, des sables aux blocs, se déplacent sur le fond du lit (Charriage). Les alluvions fines (argiles, limons et parfois sables) sont transportées en suspension (Agences de l'eau, 2000). La composition des alluvions transportées varie avec le débit, les plus fines étant déplacées plus facilement. Les phénomènes de reprise et de dépôt des matériaux d'une taille voisine de celle du fond du lit sont importants : ils conditionnent l'évolution morphologique du lit (Boulvain, 2014). Les apports annuels de sables et graviers par le bassin sont souvent très modestes devant les stocks déposés dans les cours d'eau lorsque la vallée s'élargit et donc le courant s'affaiblit. Les alluvions forment donc une réserve qui ne se renouvelle que très lentement. Elles protègent le substratum et filtrent les eaux. Le transport des alluvions dans une rivière en équilibre garantit le renouvellement de cette protection (Agences de l'eau, 2000).

La morphologie traduit l'activité du cours d'eau et son mode d'évolution. On distingue quatre grands types morphologiques correspondant à une énergie décroissante : torrents, rivières en tresse, rivières à méandres divagants et rivières à lit peu mobile, unique ou multiple avec des îles (Boulvain, 2014). Toute perturbation d'un des éléments du système conduit à une adaptation de la morphologie du cours d'eau aux nouvelles conditions ainsi créées (BRGM, 1997). La circulation de l'eau se fait soit latéralement aux écoulements amont-aval, soit verticalement à travers les alluvions (percolation). Ces échanges permettent les relations (matière, énergie) entre la nappe et le cours d'eau, constituent et façonnent les habitats pour la faune et la flore. La diversité des organismes (poissons, mollusques, larves, insectes, algues, mousses, plantes) qu'elle abrite fait de la rivière un milieu vivant.

La profondeur et la taille d'exploitation des carrières en eau ont une incidence sur la stabilité de l'écosystème. Plus l'écosystème est grand, plus il est diversifié et mieux il résiste aux agressions anthropiques. Dans le cas de gravières ouvertes, l'existence de communications libres avec la rivière favorise l'introduction dans le cours d'eau d'espèces prédatrices. Mais surtout elles provoquent les effets suivants (Agences de l'eau, 2000, BRGM, 2008) :

1. Les protections de berges construites pour éviter l'envahissement des gravières par la rivière empêchent le déplacement des bancs de graviers, la construction des îles, l'alimentation des anciens méandres. Les effets sont irréversibles surtout la diminution ou le **blocage de la dynamique fluviale** à l'origine de la richesse des écosystèmes.

2. **Les effets sur les crues** sont très variables, selon la configuration du site : sinuosité du lit, importance des plans d'eau par rapport au bassin versant, colmatage de la gravière, forme et dimension des excavations, distance de la gravière à la rivière et à d'autres gravières. Selon l'hydraulique : pluie efficace, forme et intensité de la crue, fluctuation du lit et l'hydrogéologie du cours d'eau : aquifère alluvial, substrat, perméabilité, porosité, gradient, sens des écoulements, profondeur, battements saisonniers. Après chaque forte crue, des atterrissements, des exhaussements se forment, pouvant aggraver les inondations, alors qu'il ne s'agit que de déplacements de bancs. Le seul effet positif est l'amélioration à

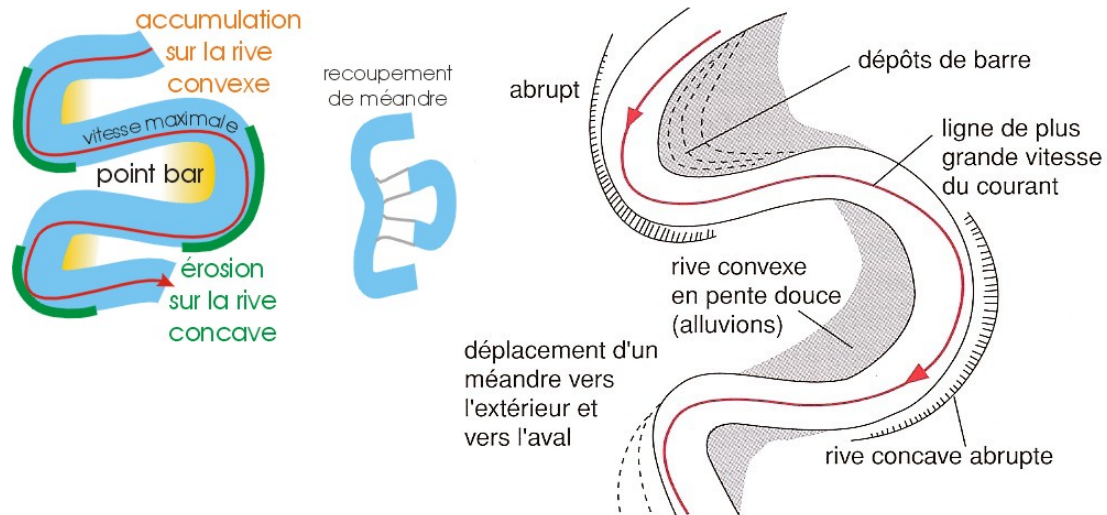


FIGURE 3.1 – Formation des méandres par érosion de la rive concave et sédimentation sur la rive convexe. L'ensemble se déplace vers l'aval. Recoupement de méandre et développement d'un méandre abandonné (Boulvain, 2014)

court terme de la section d'écoulement des crues par suite de l'abaissement du lit mineur. En revanche, le risque de débordement des gravières existe surtout en hautes eaux et aggrave la crue de la rivière. Les aménagements d'exploitation (digues, cordons, stocks de granulats) peuvent constituer des obstacles à l'écoulement des crues.

3. Si les extractions de matériaux en **lit majeur** capturent les cours d'eau, il se produit une érosion latérale de ses berges, enfoncement du lit et accélération des crues. Si plusieurs gravières occupent deux méandres successives, le lit peut-être détourné et la boucle serait abandonnée (Coupure de méandres). Dans le lit majeur, l'extraction entraîne l'ouverture d'une excavation dans un système aquifère ce qui modifie localement les paramètres hydrodynamiques (Perméabilité, coefficients d'emmagasinement), la nature et la géométrie de l'aquifère et la piézométrie qui en résulte.

4. L'extraction des matériaux dans le **lit mineur** entraîne un remodelage de leur profil en long et en travers, ce qui modifie les conditions d'écoulement des eaux et du régime des crues. Ces extractions entraînent un surcreusement, il en résulte la déstabilisation des berges et le déplacement du lit. Ainsi, une zone de plus forte pente à l'amont qui s'érode et favorise une érosion régressive et une zone de plus faible pente à l'aval qui favorise le piégeage des alluvions ainsi dégagées dans la zone d'extraction, ce qui provoque un déficit de sédiments en aval. Tout prélèvement dans le lit vif, même inférieur aux apports naturels du cours, induit un déficit du transit des sédiments : il est donc compensé par un entraînement naturel du stock, qui se traduit par un abaissement du lit. L'érosion de la roche conduit à une concentration du débit dans un chenal préférentiel et accentue les vitesses d'écoulement donc de la capacité d'érosion.

5. **L'augmentation de la turbidité** et des matières en suspension diminue l'activité photosynthétique et limite le développement des plantes (algues) mais aussi une baisse de la production primaire. L'excès de la MES à l'aval du site affecte directement la faune

locale en provoquant des lésions et un colmatage de leurs branchies et perturbant leur reproduction (Asphyxie des oeufs et des alevins).

3.2.2 Nappes aquifères

L'ouverture d'une carrière dans la plaine alluviale a des effets préjudiciables : destruction du réservoir, du régulateur hydraulique et du filtre naturel que constituent les alluvions (BRGM, 1997). Les répercussions directes sont associées d'une part à des modifications piézométriques de la nappe et d'autre part sur des incidences sur la qualité des eaux. Cette double contrainte n'est cependant pas symétrique. En effet, dans une nappe transmissive et bien alimentée, les perturbations d'écoulement engendrées par un plan d'eau sont limitées et restent proportionnelles au débit d'échange.

- **Incidences hydrodynamiques** : L'incidence hydrodynamique d'une gravière sur la nappe est liée à l'importance des débits échangés qui dépendent de l'anisotropie et du colmatage du matériau alluvionnaire de la géométrie et de la pénétration de l'excavation dans la nappe. L'affleurement de la nappe dans les gravières augmente le risque de contamination. Il participe à la diminution de la ressource puisque l'évaporation sur les plans d'eau s'accroît. En outre, il modifie localement la piézométrie : la nappe s'abaisse à l'amont de la carrière et s'élève en aval. Cet impact est augmenté par la technique de rabattements par pompage : un abaissement du NP permettant une extraction en partie ou en totalité des matériaux hors d'eau avec un abaissement du niveau d'eau dans les puits à l'amont, modification des conditions d'humidité des sols de culture, risque d'inondation par élévation de la nappe dans la zone de rejet d'eau. Le pompage en carrière peut accroître les transferts de la rivière à la nappe. La mise en suspension de fines argileuses dans l'eau, ce qui provoque le colmatage du fond et des berges de la gravière et limite ainsi les échanges avec la nappe. En cas de colmatage important, on peut aboutir à une surélévation générale du niveau de la nappe dans la gravière, avec risque de débordement à l'aval.

Les terrasses basses formées des alluvions les plus récentes sont les sites d'extraction les plus convoités car la proportion d'argiles y est plus faible. C'est aussi là que l'aquifère présente les réserves importantes en eau potable (porosité et perméabilité fortes). Les gravières entraînent des variations du volume des réserves des eaux souterraines et des modifications de leur niveau et de leur sens d'écoulement. Les débits échangés entre la gravière et la nappe croissent avec : les dimensions, en plan, de la gravière et le coefficient de pénétration dans la nappe (rapport de la profondeur d'exploitation à la puissance de la nappe et ce, d'autant plus que ce coefficient se rapproche de 1),

Il en résulte une influence notable du mode d'extraction des alluvions et on constate que le débit échangé croît :

- d'une part, plus rapidement avec la profondeur qu'avec les dimensions horizontales de l'excavation, ce qui conduit à privilégier une exploitation par mode mixte, c'est à dire par tranches horizontales avec enfoncement progressif (pour les gisements les plus épais),
- d'autre part, pour une surface donnée, avec le nombre de gravières, ce qui conduit à privilégier une grande gravière à plusieurs petites unités dispersées.

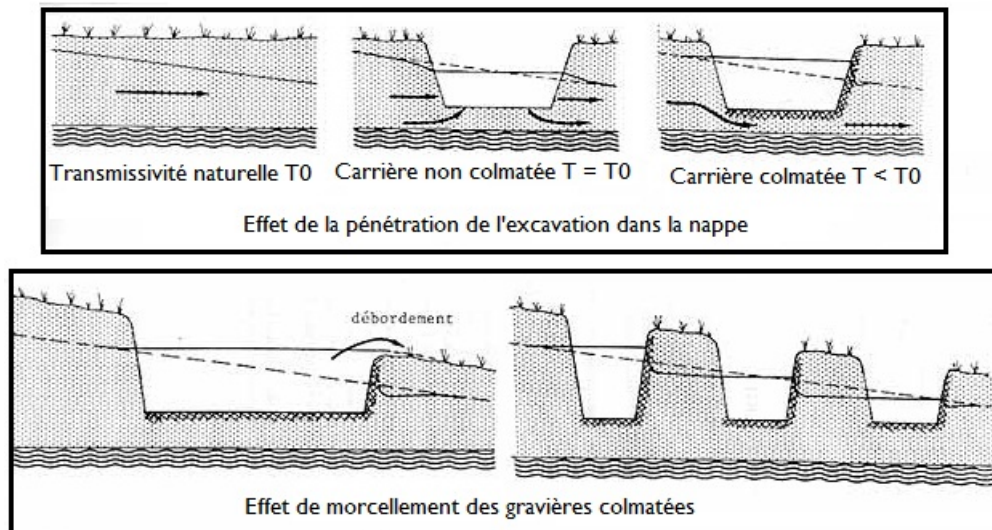


FIGURE 3.2 – Effets piézométriques liés à l'exploitation des gravières (BRGM, 1998)

La multiplication des plans d'eau sur une rivière provoque également des modifications du sens d'écoulement des eaux. Les effets sur la productivité des capatges d'eau potable peuvent être positifs ou négatifs selon qu'ils se situent dans une zone d'alimentation ou de rabattement de la nappe. Par ailleurs, on notera que les carrières en nappes alluviales peuvent présenter des aspects positifs tels que le drainage, l'augmentation du volume des réserves, l'aptitude à écrêter les crues pour les exploitations de grande taille.

- **Incidences sur la qualité des eaux** : Après la mise à nu de la nappe, l'eau drainée dans la gravière subit une certaine **évolution naturelle** caractérisée par :

- Une régression de la minéralisation globale liée à la mise en contact de l'eau et de l'air, ce qui provoque une modification de la pression partielle en CO_2 dans l'eau, entraînant principalement la décroissance des bicarbonates de calcium dans celle-ci. Pour rappel, l'agressivité de l'eau est régie par sa teneur en CO_2 dissous et son pH. En présence d'acide produit par la dissolution de CO_2 gazeux dans l'eau, la solubilité des carbonates augmente. L'acidité est alors apportée par les ions H^+ libérés lors de la dissolution de CO_2 . Ce même CO_2 d'origine pédologique, résulte de la respiration des organismes et micro-organismes vivant dans le sol et la dégradation de la matière organique.
- Une augmentation des mélanges avec la matière organique, animale et végétale et le développement des germes bactériologiques et des valeurs des paramètres liés au phytoplancton.
- Une variation des valeurs de certains paramètres, au rythme des saisons et des années. En période estivale, on constate l'augmentation dans les eaux des gravières de la température, de la matière organique, de N, NH_4^+ , NO_2^- , Fe^{2+} , SO_4^- alors qu'à cette même époque, les teneurs en Ca^{2+} , HCO_3^- et NO_3^- fléchissent nettement.

Cette évolution de la qualité de l'eau dans la gravière par rapport à celle de la nappe s'explique en partie par le phénomène de photosynthèse mis en oeuvre par les organismes végétaux.

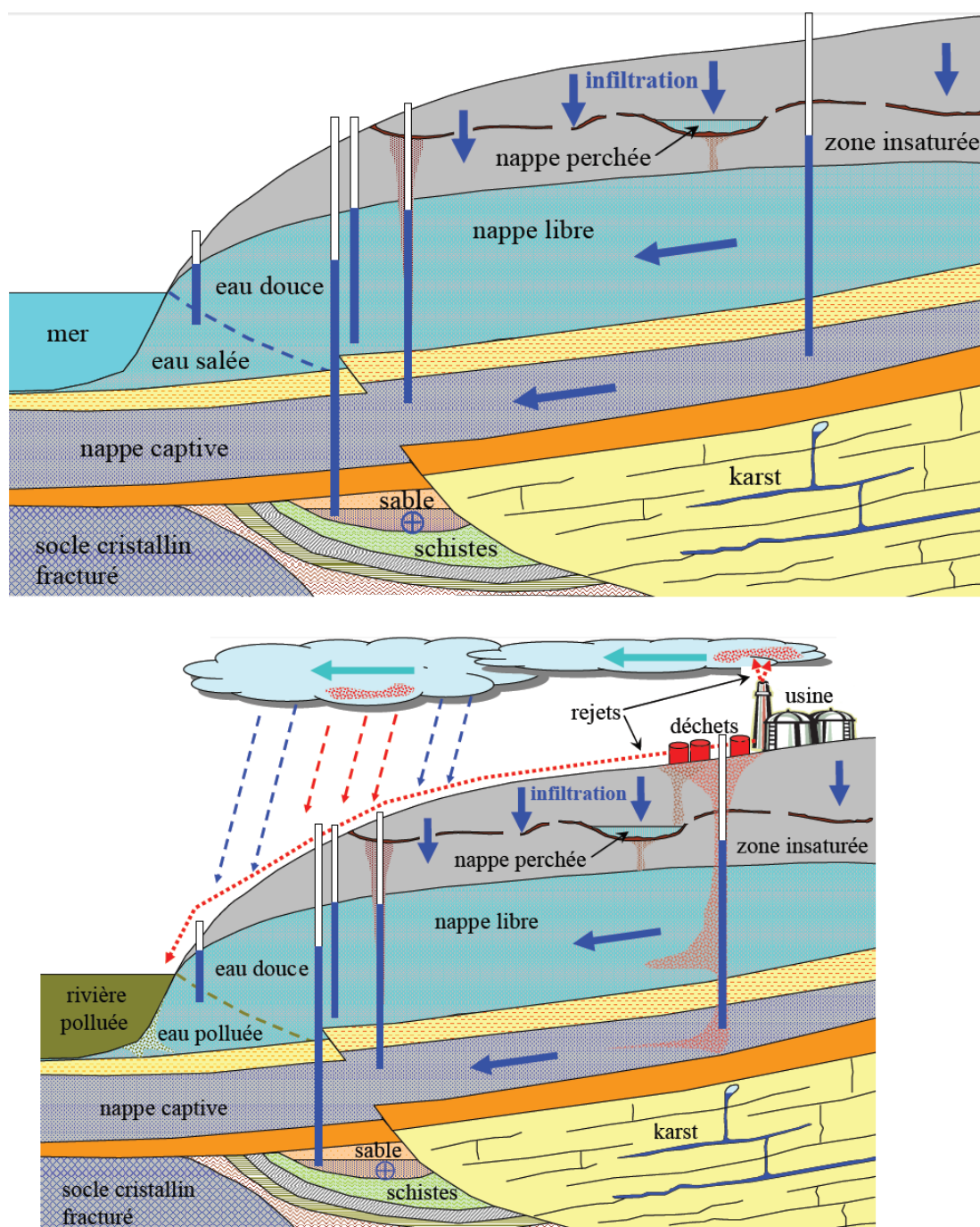


FIGURE 3.3 – Différents types de nappes aquifères et quelques scénarios de contamination des nappes et des rivières

En aval hydraulique des gravières, les modifications de la qualité se rapportent principalement à :

- Les teneurs en bicarbonate de calcium sont en diminution (déminéralisation des eaux des gravières), mais parfois la présence des matières organiques en suspension peut renverser la tendance.
- On constate une diminution de NO_3 , Fe, Mn sauf lorsque les terres de découverte argilo-limoneuses sont déversées dans le plan d'eau, ce qui a pour effet d'augmenter les concentrations en Fe et Mn dans la nappe, en aval hydraulique de celui-ci.
- Le pH, matière organique, Na, K, Cl, SO_4 , PO_4 , SiO_2 sont peu modifiés.
- L'impact thermique apparaît comme le paramètre le plus sensible mais les modifications de la température des eaux souterraines entraîne peu de nuisances.

La présence de niveaux organiques (tourbeux) dans les dépôts alluvionnaires peut entraîner une mise en solution des sulfates qui se fait d'autant mieux que les eaux sont riches en oxygène, ce qui est le cas des gravières en exploitation. La diminution des sulfates avec l'âge de la gravière peut être attribuée à l'activité de micro-organismes réduisant les sulfates, avec formation de sulfures et d'hydrogène sulfuré.

Les gravières peuvent participer à la **dénitrification** de l'eau (transformation des nitrates en azote). Il a été montré que les gravières en eau retiennent 30 à 85% de l'azote (Agences de l'eau, 2000). Les bactéries dénitrifiantes qui se développent dans la zone des sédiments dépourvue d'oxygène convertissent en effet les nitrates en nitrites, puis en oxyde d'azote ou en azote. De plus, les algues utilisent l'azote de l'eau pour leur croissance. Enfin, les nitrates peuvent être réduits en ammoniacque si l'oxygénation de l'eau est insuffisante. Cependant, cette dénitrification n'apparaît que dans certaines conditions (épaisseur d'eau suffisante), doit être mise en regard de celle due à la flore du milieu naturel initial (marais, boisements, prairies humides...) si la gravière a remplacé un tel milieu, et n'a qu'un effet localisé, le rayon d'influence d'une gravière étant limité. Certaines carrières en eau contribuent à diminuer les teneurs en nitrates, en fer et manganèse et mis à profit pour améliorer la qualité des eaux destinée l'AEP (Vallée de la Garonne) (Agences de l'eau, 2000).

L'eutrophisation est l'ensemble des processus biogéochimiques liés à un enrichissement des eaux en éléments nutritifs. Cet enrichissement se traduit par l'accroissement des biomasses végétales et animales conduisant à l'appauvrissement du milieu en oxygène (Sigg et al., 2000). Les plans d'eau (lacs, réservoirs, baies, rivières) sont classés selon leur état trophique : oligotrophe (peu alimenté) et eutrophe (bien alimenté). Ces descriptions trophiques n'ont pas de signification absolue mais sont utilisées pour estimer la situation du plan d'eau par rapport à la masse de nutriment et la masse algale (Ryding et Rast, 1994).

En règle générale, les gravières en eau sont moins sensibles à ce problème, les nappes alimentant les gravières étant mieux protégées contre les pollutions que les cours d'eau. Toutefois dans les secteurs où l'activité agricole est très développée, l'apport important d'engrais sous forme de nitrates et phosphates peut entraîner une eutrophisation rendant l'eau impropre à la consommation (Agences de l'eau, 2000).

En somme, les gravières rendent les aquifères plus vulnérables aux pollutions en les exposant directement à l'air après décapage de la couverture protectrice qui joue le rôle de filtre naturel. La minéralisation, les phosphates, le calcium diminuent, alors que le fer, le manganèse, les sulfates, le magnésium, les germes-test de contamination fécale augmentent. Le développement de la flore et de la faune dans le nouveau plan d'eau contribue à la production de matières organiques, d'oxygène, parfois d'ammoniaque. Un effet thermique est possible par cumul lorsque de nombreuses gravières se succèdent.

3.3 Impacts des gisements de minerais

3.3.1 Introduction

Il est admis que l'exploitation des ressources minérales produit d'importants volumes de matériaux miniers mais surtout qu'elle génère également des volumes considérables de déchets (Lottermoser, 2010), appelés, stériles. Ils sont qualifiés ainsi car ils ne représentent aucune valeur économique ni recherchés par les exploitants miniers. De ce fait, les impacts sur l'environnement proviennent soit du site d'exploitation du minerais et des modes d'extraction ainsi employés, soit du site de stockage des stériles et déchets susceptibles de représenter une véritable menace sur la qualité des écosystèmes aquatiques.

Il est impératif que lorsqu'il s'agit de choisir un site de gestion des résidus et/ou stériles, il convient de tenir compte de nombreux facteurs :

- l'utilisation de formations géographiques existantes (puits ou flancs existants)
- la topographie de la construction à long terme
- la nécessité de respecter le contexte hydrogéologique de la zone environnante (nappe phréatique et eaux superficielles)
- les données météorologiques (précipitations)
- le contexte géotechnique et géologique (état du sous-sol, données sur le risque sismique)
- l'adaptation de l'installation à la zone environnante (maîtrise des émissions sonores et des odeurs à proximité d'une zone résidentielle)
- le rapport entre l'installation de gestion des résidus et l'exploitation souterraine
- la proximité avec le littoral (milieu sous-marin)
- l'aménagement actuel des sols
- les communautés locales
- l'environnement naturel (biodiversité) et culturel.

3.3.2 Différentes phases d'un projet minier

Les opérations d'un projet minier inclut les mines, les processus minéraux et l'extraction métallurgique. L'étape des mines est définie comme l'extraction des matériaux dans le sous-sol dans le but de (Lottermoser, 2010)

Chaque étape du projet génère des déchets, ce sont des déchets miniers. Ils sont définis comme produits miniers solides, liquides ou gazeux.

1. Exploration, Elle implique une gamme d'étapes et de techniques qui nécessitent des degrés d'effort et de perturbation physique du terrain chaque fois plus importants (ICMM, 2006). Cette phase comprend les enquêtes, les études de terrain, les essais de sondage et d'autres excavations exploratoires afin que les informations sur la localisation et la valeur du dépôt de minerai soient récoltées. La prospection peut entraîner le nettoyage de vastes aires de végétation pour faciliter la circulation de véhicules lourds transportant les installations de forages. Les impacts peuvent être profonds et les prochaines phases peuvent ne pas s'ensuivre si l'exploration n'arrive pas à trouver des quantités suffisantes de dépôts de minerai à hautes teneurs (ELAW, 2010).

a. Études géologiques : cartographie des types de roches, de minéraux et de structures. Les données de surface sont utilisées pour interpréter la géologie souterraine.

b. Techniques géochimiques : échantillonnage des matériaux géologiques et tests réalisés pour repérer des concentrations en éléments minéraux économiquement viable. Les techniques géochimiques concernent le prélèvement dans les sols, les sédiments ou la vase des ruisseaux, et les roches ou certains matériaux biologiques (plantes).

c. Techniques géophysiques : mesure des propriétés physiques des minéraux et des roches : le magnétisme, la conductivité électrique et la densité pour révéler la présence ou l'absence de minéralisations à valeur économique. Les études sur le terrain ont généralement des impacts limités sur l'environnement et la biodiversité, sauf au cas d'échantillonnages souterrains.

d. Échantillonnage souterrain : perforation de puits ou de tranchées pour explorer les anomalies identifiées en surface. Après décapage du terrain (suppression du couvert végétal) qui peut affecter la biodiversité, les tranchées peuvent donner lieu à de grandes fosses linéaires, des pièges pour la faune.

e. Forage exploratoire : le forage est le point culminant du processus et représente la dernière étape de la planification de projet. Les données ressortant des forages sont employées pour créer un modèle de la géométrie souterraine du corps minéralisé. Parmi les techniques disponibles, on trouve le forage à percussion, le forage par le vide, le forage par circulation inverse et le forage au diamant. Les impacts directs sur la biodiversité sont considérables car les sites de forage doivent être dégagés, et de nouvelles routes d'accès sont souvent nécessaires pour les équipements.

2. Développement, si la phase d'exploration prouve l'existence d'un dépôt de minerai d'une teneur suffisante, le promoteur de projet peut alors commencer à planifier le développement de la mine par la construction de routes d'accès et la préparation et déblaiement du site.

3. Exploitation minière active, dès qu'une compagnie minière construit des routes d'accès et préparé les zones de campement pour héberger le personnel et stocker les équipements. L'extraction et la concentration (ou enrichissement) d'un métal en prove-

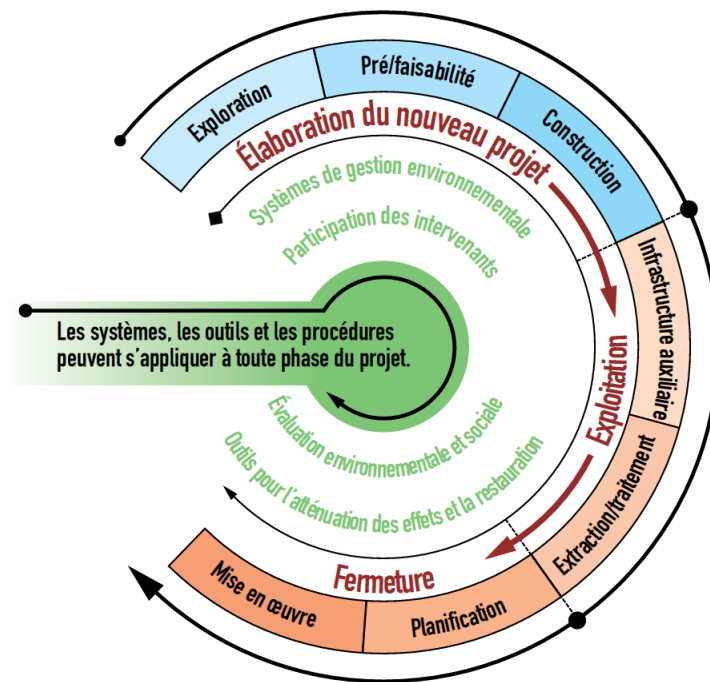


FIGURE 3.4 – Différentes phases d'un projet minier (ICMM, 2006)

nance du sous-sol. Les minerais métalliques sont emprisonnés sous une couche de sol (morts terrains ou débris de roche) qui doivent être déplacés ou excavés pour permettre l'accès au dépôt de minerai. Parmi les modes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert ;
- Exploitation des Placers ;
- Exploitation souterraine ;
- Réouverture des mines inactives ou abandonnées et retraitement des résidus.

4. Evacuation des morts terrains et des déchets de roche, les minerais métalliques sont enfouis sous une couche de sol qui doit être creusée pour permettre l'accès au dépôt. La quantité de morts terrains générée est énorme. Le rapport entre la quantité de morts terrains et la quantité de minerais (taux de découverte) est supérieur à 1. L'extraction de 100 millions de tonnes de minerai, plus d'un milliard de tonnes métriques de morts terrains et de déchets de roche peut être généré. Ces déchets volumineux (substances toxiques), sont déposés sur place, soit en tas sur la surface ou comme remblai dans les carrières, ou dans les mines souterraines.

5. Extraction du minerai, l'extraction du minerai commence à l'aide d'équipements lourds et d'une machinerie spécialisée (chargeurs, wagons de mine, camions-benne) qui transportent le minerai vers les installations de traitement. Cette activité crée des émissions de poussière fugitive.

6. Enrichissement, bien que les minerais métalliques contiennent des niveaux élevés de métaux, ils produisent aussi de grandes quantités de déchets. Par exemple, la teneur en cuivre d'un minerai de cuivre de bonne qualité peut être seulement 0,25-0,50%. La te-

neur en or d'un minerai d'or peut être uniquement de quelques centièmes d'un pour cent. Par conséquent, l'étape suivante dans l'exploitation minière est le concassage (broyage) du minerai et la séparation des quantités relativement faibles de métaux du matériau non-métallique du minerai au cours d'un processus de traitement dénommé "enrichissement". Le broyage est l'une des étapes les plus coûteuses de l'enrichissement et produit de très fines particules qui facilitent une meilleure extraction du métal. Toutefois, le broyage permet également un dégagement plus complet des contaminants lorsque ces particules deviennent des résidus. Les résidus sont ce qui reste après le broyage du minerai en de fines particules suivi de l'extraction des métaux précieux. L'enrichissement inclut des techniques de séparation physique ou chimique (séparation magnétique, électrostatique, flottation, extraction par solvant, lixiviation). Les déchets provenant de ces processus incluent des décharges de déchets rocheux, des résidus, des matériaux de lessivage et des décharges de matériaux lessivés.

La lixiviation impliquant l'utilisation de cyanure est un type de processus d'enrichissement (minerais d'or, d'argent et de cuivre) qui mérite une attention particulière en raison des graves impacts sur l'environnement et sur la sécurité. Avec la lixiviation, le minerai finement broyé est entassé dans de larges piles (piles de lixiviation) sur un coussin imperméable, et une solution contenant du cyanure est pulvérisé sur le sommet de la pile. La solution de cyanure dissout les métaux désirés et la liqueur mère contenant le métal est prélevée en bas de la pile à l'aide d'un système de tuyaux.

7. Evacuation des résidus, même les minerais métalliques à haute teneur sont composés presque entièrement de matériaux non-métalliques et contiennent souvent des métaux toxiques indésirables (cadmium, plomb et arsenic). Le processus d'enrichissement génère de gros volumes de déchets appelé résidus, les rejets d'un minerai après qu'il soit broyé et que les métaux désirés soient extraits (avec le cyanure (or) ou l'acide sulfurique (cuivre)). Parmi les options envisagées :

- l'utilisation de bassins de décantation des résidus miniers ou bassin de réception des résidus ;
- l'assèchement et l'évacuation des résidus secs comme remblai, il est préférable du point de vue environnemental ;
- remblayage de mines souterraines ou à ciel ouvert ou construction de digues de retenue avec les résidus ou stériles,
- déchargement des résidus ou stériles plus ou moins secs sur des terrils ou à flanc de collines,
- gestion des résidus par déversement en profondeur dans la mer ou dans un lac. Dans les régions minières où les résidus sont susceptibles de former des acides, une gestion des résidus en eaux profondes dans un lac ou dans la mer, ou gestion subaquatique, constitue parfois une méthode acceptable.
- gestion des résidus en rivière. Cette pratique est appliquée pour des matériaux solubles dans l'eau (le sel). Certaines mines de potasse déversent leurs eaux salines dans des rivières. Les résidus non solubles ne sont pas déversés dans les cours d'eaux de surface.

Les résidus des mines de potasse et les résidus grossiers des mines de fer et de charbon sont souvent entreposés sur des terrils. Des quantités importantes de stériles sont gérées dans la plupart des mines d'extraction de métaux qui sont exploitées à ciel ouvert. La

nature grossière des matériaux, l'action même de déversement par le camion, l'étalement et le compactage en fines couches au moyen d'une machine à chenilles ou d'un rouleau vibrant, permettent de stabiliser les matériaux pendant et après leur mise en dépôt. Mais le risque de contamination des sols et des nappes d'eau est assez grand. Les émissions de poussière par les terrils peuvent être relativement importantes. Mais surtout, les eaux de ruissellement de surface qui lessivent ces dépôts, se chargent en métaux lourds et s'infiltrant dans le sous sol. Elles doivent être collectées et traitées, avant d'être évacuées ou peuvent être déviées vers les bassins de résidus ou des bassins de rétention séparés.

8. Réhabilitation et fermeture de site minier, lorsque l'exploitation minière active cesse, les installations minières et le site sont réhabilités et fermés. Les mines qui sont célèbres pour leurs immenses impacts sur l'environnement ont le plus souvent produit ces impacts uniquement durant la phase de fermeture. Ces impacts peuvent persister pendant des décennies et même des siècles. Par conséquent, l'EIE doit inclure une discussion détaillée du plan de réhabilitation et de fermeture, offert par le promoteur du projet d'exploitation minière.

Les rejets dans l'eau peuvent inclure des réactifs issus du traitement du minerai : le cyanure, les xanthates, les acides ou des bases faisant augmenter ou baisser le pH, les métaux ou composés métallifères solides ou dissous (fer, zinc, aluminium), les sels dissous, par exemple NaCl, $Ca(HCO_3)_2$, la radioactivité (dans les terrils et/ou résidus de charbon), le chlorure (houillères) et les solides en suspension.

3.3.3 Drainage Acide (DA)

Les paramètres des installations de gestion des résidus et des stériles qui concernent l'environnement se classent en deux catégories : (1) les paramètres d'exploitation et (2) les paramètres accidentels. Au cours de l'exploitation, les rejets types dans l'air, dans l'eau et dans le sol doivent être pris en compte. Toutefois, il convient de mettre l'accent sur deux problèmes environnementaux majeurs, à savoir :

- le phénomène du **drainage acide**, et
- la survenue de ruptures ou d'**effondrements accidentels**.

Le DA est associé aux minerais sulfurés dont on extrait le plomb, le zinc, le cuivre, l'or et du charbon. Ce phénomène peut se produire dans des dépôts de stériles, des gisements de minerais marginaux, des amas d'entreposage provisoires du minerai, des dépôts de résidus, des parois de puits, des mines souterraines ou dans des amas de lixiviation. Les principales origines sont :

- la présence fréquente de sulfures métalliques dans les résidus et/ou stériles ;
- l'oxydation des sulfures lorsqu'ils sont exposés à l'oxygène et à l'eau ;
- la formation d'un lixiviat acide chargé en métaux durant de longues périodes.

Au contact de l'eau et de l'oxygène, les minéraux sulfurés commencent à s'oxyder. Il s'agit d'un processus calogène lent (processus exothermique sous contrôle cinétique) qui est favorisé par : une forte concentration en oxygène, une température élevée, un faible

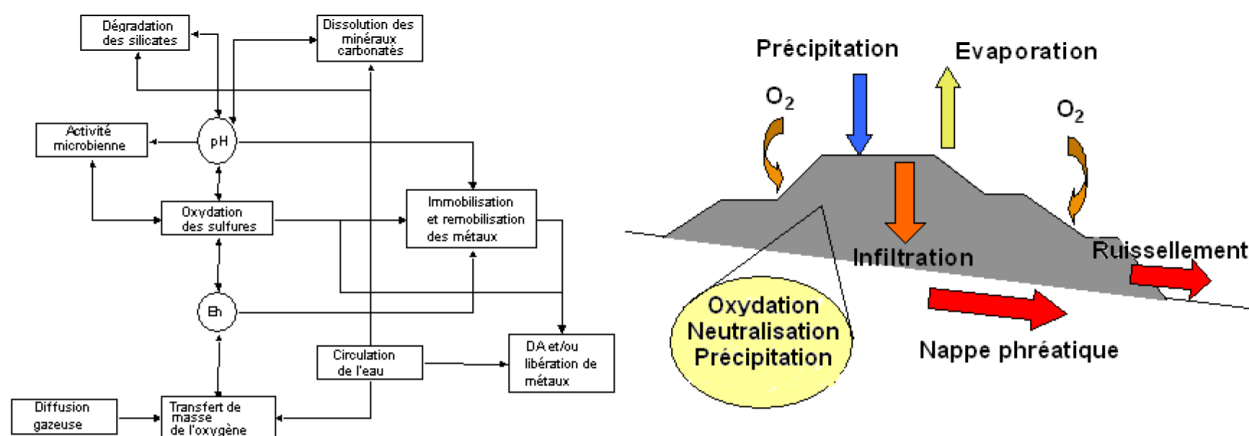


FIGURE 3.5 – Quelques-uns des processus géochimiques et physiques, de leur interaction et de leur participation à la libération de métaux lourds par les déchets miniers (Eriksson, 2002)

pH et une activité bactérienne. La vitesse globale de réaction pour une quantité donnée de sulfures dépend également d'autres paramètres : type de sulfures et de leur granulométrie, qui détermine également la surface exposée. En s'oxydant, les sulfures produisent du sulfate, des ions hydrogènes et des métaux dissous.

Les résidus et les stériles sont constitués des différents minéraux naturels présents dans la roche extraite. Dans la roche non exploitée (en profondeur), les minéraux réactifs sont protégés de l'oxydation. Dans des environnements exempts d'oxygène (nappes aquifères profondes), les minéraux sulfurés sont stables au plan thermodynamique et présentent une faible solubilité chimique. Les eaux souterraines profondes situées dans des régions minéralisées présentent donc de faibles teneurs en métaux. En revanche, une fois ces minerais excavés et amenés à la surface, leur exposition à l'oxygène atmosphérique déclenche une série de processus biogéochimiques qui peuvent conduire à la production de drainage acide. De ce fait, le principal souci n'est pas tant la teneur en sulfures métalliques en elle-même que les effets combinés de la teneur en sulfures métalliques et de l'exposition à l'oxygène atmosphérique. L'effet de l'exposition augmente au fur et à mesure que la granulométrie diminue et que la surface augmente. Ainsi, les sulfures qui contiennent des résidus finement broyés ont davantage tendance à s'oxyder. Les résidus et les stériles sont normalement composés d'un certain nombre de minéraux dont les sulfures ne constituent qu'une partie. Par conséquent, si une oxydation des sulfures se produit dans des déchets miniers, l'acide produit est susceptible d'être consommé à divers degrés par des réactions consommatrices d'acide, selon les minéraux consommateurs d'acide qui sont présents. Si les déchets miniers contiennent des carbonates, le pH reste normalement neutre, les métaux dissous se précipitent et ne se transmettent donc pas de façon significative au milieu environnant.

Les autres minéraux consommateurs d'acide sont les aluminosilicates. La dissolution des aluminosilicates se fait sous contrôle cinétique et ne permet généralement pas de maintenir un pH neutre dans le drainage. L'interaction entre l'oxydation acidogène des sulfures

Méthode de réduction	Principe utilisé
Mélange	Adjonction de résidus et de stériles à forte capacité neutralisante à des matériaux potentiellement producteurs de DA, permettant de maintenir le pH à un niveau neutre
Adjonction de minéraux neutralisants (chaulage)	Apport d'une capacité de neutralisation à des matériaux potentiellement producteurs de DA, permettant de maintenir le pH à un niveau neutre
Compactage et étanchéisation du sol	Grâce à un compactage et une étanchéisation des strates sous-jacentes, la production de DA est réduite et les infiltrations incontrôlées dans les sols sont évitées (voir section 4.3.10.4)

FIGURE 3.6 – Mesures de réduction du drainage acide (Commission Européenne, 2009)

et la dissolution consommatrice d'acide des minéraux neutralisants détermine le pH des eaux interstitielles et du drainage, lequel détermine à son tour la mobilité des métaux. Si les minéraux neutralisants facilement accessibles sont consommés, le pH risque de baisser et de provoquer un DA.

La figure ci-dessus illustre de façon schématique quelques-uns des processus géochimiques et physiques les plus importants, leur interaction et leur contribution à l'apparition d'un DA ainsi qu'à la libération éventuelle de métaux lourds par les déchets miniers (Eriksson, 2002). Pour conclure, le DMA et la libération de ces métaux dépendent de la vitesse d'oxydation des sulfures, des éventuelles réactions d'immobilisation et/ou de remobilisation le long du trajet d'écoulement, et de la circulation de l'eau. Or, la vitesse d'oxydation des sulfures dépend des conditions d'oxydoréduction (Eh), du pH et de l'activité microbienne. Le pH, lui, est déterminé par la vitesse de réaction des sulfures les réactions de neutralisation (dissolution des carbonates et dégradation des silicates). En outre, les réactions d'immobilisation qui bloquent potentiellement les métaux et sont susceptibles de se produire le long du trajet d'écoulement dépendent du pH, des conditions d'oxydoréduction et de la vitesse d'oxydation des sulfures (Commission européenne, 2009). Par exemple, au bout de 10 années d'exploitation, la teneur en sulfure des stériles issus de la mine peut avoir atteint un niveau tel que le problème du drainage Minier Acide (DMA) va se poser. Il convient donc de mélanger ces stériles à d'autres stériles contenant des minéraux neutralisants, ou en entreposant séparément les matériaux présentant un risque de DMA.

Le drainage acide dans les eaux superficielles et souterraines dégrade la qualité de l'eau et risque d'avoir un certain nombre de répercussions, notamment la perte d'alcalinité, l'acidification, la bioaccumulation de métaux, l'accumulation de métaux dans les sédiments, des effets sur l'habitat, la disparition des espèces vulnérables et l'instabilité des écosystèmes.

Enfin, les méthodes pour le traitement des effluents acides se répartissent en : **traitements actifs** avec ajout de calcaire (carbonate de calcium), d'hydroxyde de calcium ou de chaux vive, et ajout de soude caustique pour un DA à forte teneur en manganèse ; et **traitements passifs** avec aménagement de zones humides, canal de calcaire ouvert/drain calcaire anoxique et puits de dérivation.

3.3.4 Métaux lourds dans l'environnement

Ces substances peuvent être présentes dans le milieu naturel et dans les rejets sous plusieurs formes (Agence de l'eau, 2002) :

- dissoutes dans l'eau,
- adsorbées sur les matières en suspension et/ou les sédiments,
- accumulées dans les tissus des organismes aquatiques animaux ou végétaux.

- **Aluminium**, Pour produire de l'aluminium primaire, on raffine la matière première, la bauxite, pour obtenir de l'alumine, suivi d'une transformation dans une fonderie de l'alumine en aluminium. La bauxite est un matériau naturel hétérogène, composé de plusieurs minéraux à base d'hydroxyde d'aluminium auxquels s'ajoutent différents mélanges de silice, d'oxyde de fer, d'oxyde de titane et d'aluminosilicate. Les résidus du raffinage sont constitués d'une boue rougeâtre et d'une fraction plus grossière (sable). Ils ont un pH élevé et contiennent plusieurs complexes métalliques. Parmi les raffineries, certaines appliquent une gestion par épaissement de ces résidus caustiques, d'autres les déversent en mer/rivières, d'autres utilisent encore des bassins de résidus traditionnels et un site entrepasse ces boues rouges dans un bassin après avoir neutralisé les boues avec de l'eau de mer et un procédé de désulfuration des gaz de combustion (Commission européenne, 2009).

- **Cadmium**, Le cadmium est un métal lourd peu répandu dans la croûte terrestre, il se trouve souvent dans le concentré de zinc issu du traitement du minerai, et ce cadmium est donc séparé au niveau de la fonderie (Commission européenne, 2009). Les minerais de plomb et de cuivre sont également susceptibles de contenir de faibles quantités de cadmium. Sa présence dans les eaux est surtout d'origine anthropique, notamment les rejets industriels liés à la métallurgie, au traitement de surface, à la fabrication de céramique et à l'industrie des colorants, mais également à l'usure des pneumatiques sur les chaussées. Il est bioaccumulable et répertorié comme toxique par l'INRS sous ses formes sulfure et oxyde de cadmium (Agence de l'eau, 2002).

- **Cuivre**, Le cuivre existe le plus souvent à l'état naturel, associé au soufre. Il est récupéré au cours d'un procédé en plusieurs étapes qui consiste tout d'abord à extraire et concentrer des minerais pauvres contenant des minéraux à base de sulfure de cuivre, puis à les faire fondre et à les raffiner par voie électrolytique pour produire une cathode de cuivre pur (Commission européenne, 2009). Le cuivre métallique est insoluble dans l'eau, mais la plupart de ses sels sont solubles : chlorures, nitrates, et sulfates de cuivre. Les carbonates, hydroxydes et sulfures de cuivre sont quant à eux insolubles (Agence de l'eau, 2002).

- **Plomb**, Les minerais de plomb existent principalement sous forme de sulfures ou encore sous forme de minerais complexes où le plomb est associé à du zinc et à de faibles quantités d'argent et de cuivre. L'industrie des piles crée jusqu' à 70 % de la demande mais les autres utilisations du plomb sont en baisse. Généralement, les résidus issus des activités d'extraction des métaux communs se caractérisent par (Commission européenne, 2009) :

- des boues d'une teneur de 20 à 40% de solides en poids,
- contiennent des métaux et des sulfures,
- sont produits en grosses quantités.

Les résidus boueux sont gérés dans des bassins. Dans certaines mines souterraines, les résidus grossiers sont utilisés comme remblais. Le sulfure que contiennent les résidus et les stériles peut s'oxyder au contact de l'eau et de l'air, provoquant la formation d'un lixiviat acide (DA).

- **Fer**, Le minerai de fer est une substance minérale qui, chauffée en présence d'un réducteur, donne du fer métallifère (Fe). Ce métal n'est extrait que sous forme d'oxydes et de carbonates, et les minerais ne contiennent que peu ou pas de minéraux sulfurés. Les résidus et les stériles provenant de ces exploitations ne présentent aucun potentiel de DA net. En général, ils produisent une fraction de résidus grossiers qui est mise en terrils. Les fines sont déversées dans des bassins de résidus.

- **Mercure**, Le cinabre (HgS) est le principal minerai de mercure. Le mercure est le seul métal commun qui soit liquide à température ambiante. On le trouve soit à l'état de métal natif, soit dans le cinabre, la cordéroite, la livingstonite (Commission européenne, 2009). Il se concentre sur les particules en suspension dans l'eau ou la matière organique ; on peut le retrouver dans les sédiments des rivières (Agence de l'eau, 2002). Etant donné que les résidus contiennent des sulfures, le drainage acide s'y produit. Les mines anciennes, les terrils de stériles et les installations de gestion des résidus vont également poser problème. En revanche, le mercure à l'état de soufre n'étant pas soluble dans l'eau, il devrait en principe rester stable dans les résidus et les stériles (Commission européenne, 2009). Dans les sédiments, le mercure est transformé par des bactéries en méthylmercure. C'est sous cette forme, très soluble dans les lipides qu'il s'accumule fortement dans les graisses animales et augmente au fur et à mesure que l'on s'élève dans la pyramide trophique (Agence de l'eau, 2002).

Les rejets dans l'eau peuvent inclure des réactifs issus du traitement du minerai : cyanure, xanthates, les acides ou des bases faisant augmenter ou baisser le pH, métaux, sels dissous, radioactivité (dans les terrils, résidus de charbon), chlorure (houillères) et solides en suspension. Les effets sur les écosystèmes aquatiques peuvent être néfastes et l'homme sera contaminé par effet de chaîne. Le tableau ci-après montre les effets et le taux de toxicité de certains métaux sur la santé humaine. Les principales causes de pollution toxique en nappe peuvent être attribuées (Agence de l'eau, 2002) :

- aux fuites ou aux déversements de produits toxiques liquides en nappe,
- au stockage ou au dépôt de déchets solides d'origine minière, sur des aires non étanches,
- au lessivage par les eaux de sites minières et sols pollués par des activités industrielles anciennes ou actuelles,
- à l'infiltration des eaux de ruissellement issues de surfaces imperméabilisées de parkings, routes et voiries, et contenant des polluants comme le plomb, les hydrocarbures,
- au stockage ou à l'enfouissement de déchets chimiques dans des carrières ou mines désaffectées (fûts, bidons, de produits de haute toxicité).

Les options de remédiations consistent à :

- mélanger l'eau de traitement avec d'autres effluents contenant des métaux dissous,
- installer des bassins de décantation afin de capturer les fines érodées,

Métal	Effet
Arsenic (As)	Extrêmement toxique et potentiellement cancérigène pour l'homme. L'intoxication à l'arsenic va de chronique à sévère et peut être cumulative et mortelle.
Cadmium	Le cadmium se concentre dans les tissus et l'homme peut être intoxiqué par des aliments contaminés, notamment du poisson. Le cadmium peut être lié à une hypertension artérielle rénale et provoquer de violentes nausées. Il s'accumule dans le foie et le tissu rénal. Il inhibe la croissance de certaines plantes et s'accumule dans les tissus végétaux.
Chrome (Cr)	Le Cr ⁺⁶ est toxique pour l'homme et peut induire des irritations cutanées. La tolérance humaine au Cr ⁺³ n'a pas été déterminée.
Cuivre (Cu)	En faible quantité, il est considéré comme non toxique et nécessaire au métabolisme de l'homme. En revanche, à haute dose il peut provoquer des vomissements ou des lésions hépatiques. Toxique à faible taux pour les poissons et la vie aquatique.
Fer (Fe)	Essentiellement non toxique mais altère le goût de l'eau.
Manganèse (Mn)	Altère le goût de l'eau et peut tacher. A haute concentration, il est toxique pour les animaux.
Mercure (Hg)	Le mercure et ses composés sont extrêmement toxiques, notamment pour le développement du système nerveux. Sa toxicité pour l'homme et les autres organismes dépend de sa forme chimique, de sa quantité, des modes d'exposition et de la vulnérabilité des personnes exposées.
Plomb (Pb)	Poison organique cumulatif pour l'homme et le bétail. L'homme peut souffrir de sa toxicité aigue ou chronique. Les jeunes enfants sont particulièrement vulnérables.
Zinc (Zn)	A haute dose, il peut altérer le goût de l'eau. Toxique pour certaines plantes et pour les poissons.

FIGURE 3.7 – Effets des métaux lourds sur la santé humaine (Commission européenne, 2009)

- éliminer les solides en suspension et les métaux dissous avant de rejeter les effluents dans les cours d'eau récepteurs,
- neutraliser les effluents alcalins à l'aide d'acide sulfurique ou de dioxyde de carbone,
- éliminer l'arsenic des effluents miniers par adjonction de sels ferriques

Dans tout projet minier, il convient d'économiser l'eau et l'épargner de la pollution, mais aussi à confiner et traiter les eaux polluées. L'installation d'une station d'épuration des eaux usées (STEP) est nécessaire. Le traitement des eaux polluées avant restitution au milieu naturel comprend la séparation et les traitements chimiques et bactériologiques.

Chapitre 4

Impacts sur les sols, cultures et forêts

4.1 Impacts sur les sols

4.1.1 Les sols face aux risques

Un sol est une pellicule d'altération recouvrant une roche ; il est formé d'une fraction minérale et de matière organique : humus (Beauchamp, 2008). Un sol prend naissance à partir de la roche puis évolue sous l'action des facteurs du milieu : le climat, le matériau originel (roche mère), la végétation, le relief, et l'action de l'homme (Géosystem, 1999). Elle peut être néfaste sur l'évolution des sols qui sont particulièrement sensibles au défrichement, aux labours successifs à une même profondeur, à l'agriculture intensive qui épuise les sols, à l'irrigation excessive ou irrationnelle mais aussi aux exploitations industrielles parmi elles l'industrie minière.

L'agriculture et l'alimentation s'inscrivent dans un continuum qui a son ancrage dans le territoire. Et ce territoire est diversifié de par les rapports qui y sont inscrits entre ruralité et urbanité, ses spécificités socio-économiques et avant tout biophysiques. En effet, la nature constitue la partenaire économique primordiale. Les pertes de couverture forestière, de sol arable et de nutriments par érosion en sont les conséquences immédiates d'une mauvaise gestion des risques. Un sol est considéré pollué lorsque la dégradation de sa qualité par l'apport anthropique d'éléments toxiques peut porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement. Cette transformation le dénature en transformant le sol considéré comme ressource économique en un déchet devant être traité par le responsable de la pollution.

4.1.2 Contamination des sols

Une carrière en activité peut nuire aux cultures et affecter les conditions de travail des agriculteurs. L'implantation d'une carrière a souvent un effet irréversible sur l'usage des sols (BRGM, 1998). Les activités agricoles proches d'un projet minier peuvent être particulièrement touchées. Ces exploitations peuvent contaminer les sols sur de vastes zones, elles modifient régulièrement le paysage environnant en les exposant à l'érosion (ELAW, 2010). Les minerais extraits, les terrils et les matériaux fins dans les tas de déchets de

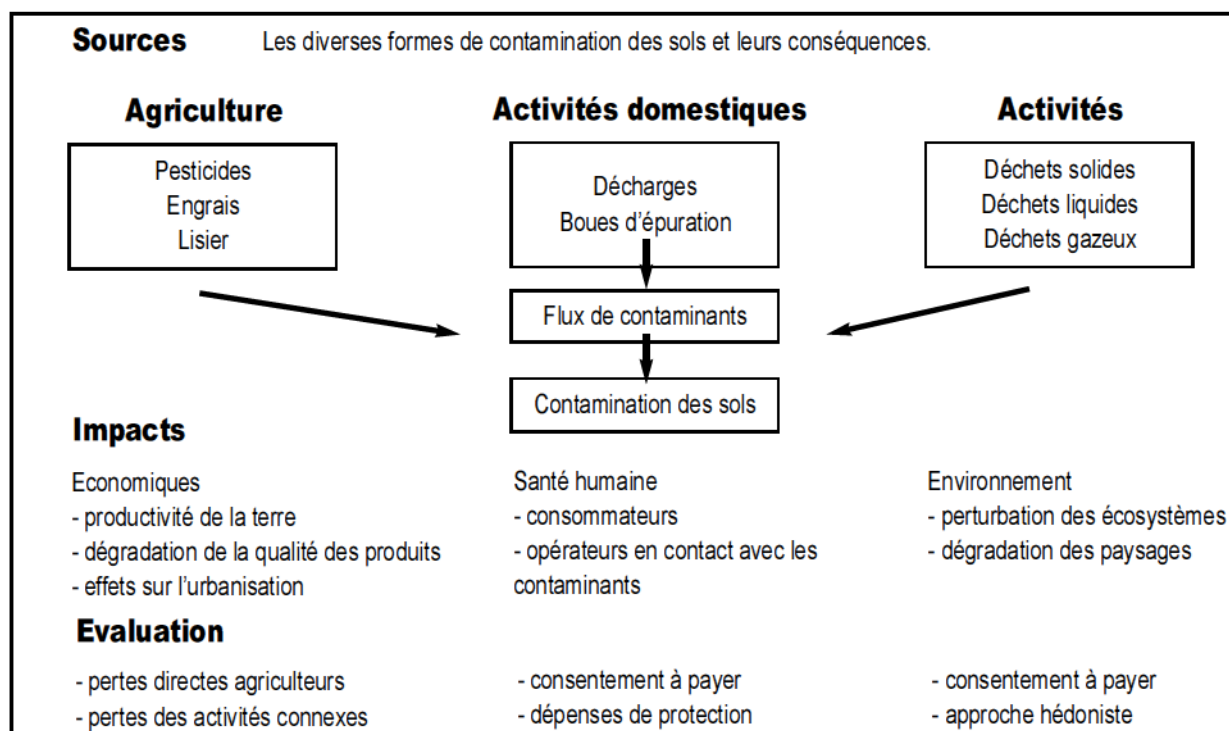


FIGURE 4.1 – Diverses formes de pollution des sols (Rainelli, 1996)

roches peuvent entraîner des charges substantielles de sédiments dans les eaux de surface et les voies de drainage des eaux. En outre, les déversements et fuites de matières dangereuses et les dépôts de poussières contaminées fouettées par le vent peuvent conduire à la contamination du sol. La croissance naturelle des cultures se voit ainsi ralentie par le dépôt des poussières sur leurs parties aériennes et la formation d'une fine pellicule imperméable isolant ainsi le feuillage de l'atmosphère, en empêchant les échanges de gaz (O_2 et C) et de la matière et en amortissant surtout la photosynthèse des plantes.

Les risques sur la santé humaine et sur l'environnement provenant des sols appartiennent généralement à deux catégories :

- les sols contaminés provenant des poussières fouettées par le vent, et
- les sols contaminés à partir de déversements de produits chimiques et de résidus.

La poussière fugitive peut poser des problèmes environnementaux significatifs dans certaines mines. La toxicité inhérente de la poussière dépend de la proximité des récepteurs environnementaux et du type de minerai exploité. Des niveaux élevés d'arsenic, de plomb et de radionucléides dans la poussière fouettée par le vent constituent le plus grand risque. Les sols contaminés à partir de déversements de produits chimiques et des résidus sur les sites de la mine peuvent poser un risque de contact direct lorsque ces matériaux sont utilisés abusivement comme matériaux de remblayage, pour la création de zones vertes ornementales ou encore comme suppléments de sol. Les polluants les plus fréquemment retrouvés dans les sols ayant subi une pollution industrielle (énergétique et minière), sont les hydrocarbures, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), le plomb, le chrome, les solvants halogénés et le cuivre.

L'exposition des individus aux contaminants du sol peut se faire de manière directe, par ingestion (réflexe pica : absorption de terre par les enfants), par inhalation (poussières en suspension) ou par contact cutané. Elle peut également être indirecte, via la consommation d'aliments ou d'eau contaminés. Les impacts sanitaires sont divers et varient selon les substances polluantes présentes dans les sols. Certains polluants sont identifiés comme étant cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques (chrome, arsenic, benzène, pesticides), neurotoxiques (plomb) ou encore ayant des effets sanitaires divers comme des atteintes du système immunitaire ou de la fonction rénale (atteintes rénales liées au cadmium). Il est aujourd'hui difficile d'évaluer l'impact sanitaire lié à la pollution des sols du fait du manque de données sur les niveaux de leur pollution, des incertitudes liées aux modalités de transferts des polluants des sols vers les végétaux, les animaux et le long de la chaîne alimentaire, des interactions entre polluants.

En résumé, les effets négatifs de l'industrie minière sur les sols peuvent se résumer en :

- perte des terres cultivables et pastorales sous l'effet de l'érosion,
- dégradation de la valeur agricole des sols : diminution de la fertilité, salinisation, acidification, ...etc.,
- contamination des sols (et toute la chaîne alimentaire) par les métaux lourds non dégradables par le biais du drainage de l'eau et/ou par dépôt direct.

Les agriculteurs qui vivent à Nchanga (Zambie), près de la fonderie de Konkola Copper Mines (KCM) ont perdu des récoltes du fait des sédiments et des boues qui inondent les champs. De ce fait, les agriculteurs n'ont pu cultiver des produits de première nécessité comme le chou, la tomate et le maïs pour leur consommation personnelle ou pour les vendre sur les marchés. Pour 2005, la perte de revenus atteint pour les agriculteurs locaux 19 523 dollars. Ces rejets ne sont pas le seul problème lié aux activités minières, le 6 novembre 2006, un des pipelines de KCM a rejeté d'importantes quantités de liquide acide dans plusieurs rivières, dont la Kafue, une des plus grandes rivières zambiennes.

4.2 Impacts sur les forêts

Les exploitations minières à grandes échelles (à ciel ouvert), peuvent résulter en des déboisements significatifs voire des déforestations non contrôlées pour la création d'un réseau d'accès aux sites d'extraction (routes, pistes et voies ferrées). Dans de nombreuses régions tropicales, l'industrie minière est une des causes principales du déboisement et de la dégradation des forêts. Au Ghana, l'élimination du couvert forestier provoque l'assèchement rapide des fleuves, et l'extinction des espèces animales et végétales qui y habitent. Des espèces protégées, telles que le cochon du fleuve rouge, l'antilope chevaline, le colobe rouge et le colobe noir, sont associées aux forêts tropicales. Au niveau communautaire, les attaques à la biodiversité ont des implications économiques. En effet, l'expansion de l'industrie minière a provoqué la diminution ou la disparition d'espèces végétales et animales dont les communautés dépendent (Escargots, champignons, plantes médicinales). La déforestation massive est à l'origine de la désertification des terres agricoles comme le cas des pays d'Afrique du Nord.

Chapitre 5

Impacts sur le milieu naturel et le paysage

5.1 Impacts sur le milieu naturel : la faune et la flore

La biodiversité englobe la variété et la variabilité de la vie sur Terre. Elle se rapporte aux différences au sein de tous les organismes vivants et entre ceux-ci, aux différents niveaux de leur organisation biologique, gènes, individus, espèces et écosystèmes. La biodiversité comprend tous les organismes vivants et leur diversité génétique, un ensemble vaste et complexe d'écosystèmes et d'habitats, ainsi que les processus qui étayent cette diversité et en résultent, comme la photosynthèse, les cycles alimentaires ou la pollinisation. Différentes espèces végétales, animales, fongiques et microbiennes interagissent les unes avec les autres dans une variété de processus écologiques pour former des écosystèmes. Ces processus sont à leur tour le résultat des interactions entre les espèces et avec leur environnement physique et chimique (ICMM, 2006).

De profondes perturbations peuvent survenir suite à l'exploitation d'une carrière ou d'une mine à ciel ouvert dans le milieu naturel et mettre en danger leur valeur écologique et leur potentiel biologique. L'exploitation minière a une incidence sur l'environnement et les biotes associés par le biais de la suppression de la végétation ainsi que le sol de couverture, le déplacement de la faune, le dégagement de polluants et la génération de bruit. L'EIE jouera un rôle décisif dans l'identification des futurs effets et déterminera la faisabilité du projet. Un recensement de la faune et la flore est rendu obligatoire dans les zones sensibles. Lors de l'exploitation sera adapté aux besoins spécifiques des espèces rencontrées. Si les espèces protégées ont été mises en évidence par le recensement, le secteur concerné ne pourra pas être exploité. Pour juger de l'impact d'un projet sur la faune et la flore, il importe (Hertig, 2006) :

- d'établir un diagnostic proportionné aux enjeux de biodiversité (choix des groupes d'espèces inventoriés),
- de proposer les mesures d'évitement et d'atténuation les mieux adaptées à une réduction de l'impact résiduel sur les espèces,
- de quantifier cet impact résiduel sur les espèces après adaptation du projet,
- de proposer les mesures de compensation et d'accompagnement suffisantes pour contrebalancer cet impact,
- le recours par le maître d'ouvrage à un bureau d'études spécialisé faune/flore est de

fait fortement préconisé.

Les espèces de la faune vivent dans des communautés qui dépendent les unes des autres. La survie de ces espèces peut dépendre des conditions du sol, du climat, de l'altitude et l'habitat local. L'exploitation minière provoque des dommages directs et indirects sur la faune. Les impacts proviennent de la perturbation, du déplacement et de la redistribution de la surface du sol. Certains impacts sont de court terme et sont limités au site de la mine ; d'autres peuvent avoir des répercussions profondes et des effets de long terme. L'effet le plus direct sur la faune est la destruction ou le déplacement des espèces dans les zones d'excavation et d'accumulation des déchets miniers. Les espèces mobiles de la faune (gibier, oiseaux, prédateurs) quittent ces zones. Les animaux plus sédentaires (invertébrés, reptiles, rongeurs et petits mammifères) peuvent être plus sévèrement affectés (ELAW, 2010). Si les cours d'eau, les lacs sont comblés ou drainés, les poissons, les invertébrés aquatiques et les amphibiens sont sévèrement touchés. L'approvisionnement en nourriture des prédateurs est réduit par la disparition de ces espèces terrestres et aquatiques. De nombreuses espèces de la faune sont fortement dépendantes de la végétation grandissant dans les drainages naturels. Cette végétation fournit les aliments essentiels, les sites de nidification et des abris pour échapper aux prédateurs.

Ces milieux naturels (rivières, lacs) offrent de nombreux habitats et jouent un rôle de filtre des polluants vers la nappe et le cours d'eau. On estime qu'une largeur de ripisylve de quelques dizaines de mètres est nécessaire pour une fixation efficace de l'azote. L'apparition du substratum du fond de la rivière suite à l'exploitation, inhospitalier pour la faune et la flore benthiques, réduit le potentiel d'autoépuration du milieu. Dans les hauts fonds, les algues et invertébrés s'y développent, les poissons s'en nourrissent et les oiseaux s'y reposent et s'y alimentent, la disparition des hauts fonds ou leur dégradation affecterait toutes ses activités.

La modification donc de l'habitat induit celle des communautés : le cas du brochet. Il se reproduit sur le parairies inondées, si les inondations sont reportées en aval du fait d'un endiguement, le brochet régresse et disparaît. Les habitats aquatiques en aval ne sont pas épargnés. Les charges de sédiments plus élevées et les cours d'eau réduits peuvent affecter la population locale de poissons. Les poissons sont affectés par l'excès des MES qui peut provoquer des lésions et qui exerce une action abrasive et colmatante sur leurs branchies, avec inhibition de la fonction respiratoire. Des effets indirects sur leur reproduction et développement de leurs oeufs peut survenir, par disparition des frayères (colmatage par le MES), par asphyxie des oeufs et des alevins si les teneurs en MES sont trop élevées.

Parmi les effets indirects, une modification des contraintes hydriques, l'abaissement des niveaux d'eau conduit à des modifications de l'équilibre hydrique des sols et donc des conditions de végétation. Cela peut conduire à une dérive floristique et banalisation des milieux (BRGM, 1997). L'impact est plus important en cas de rabattement de la nappe qui peut aboutir à l'assèchement des zones humides voisines qui elles, constituent un vivier de biodiversité de grande valeur écologique.

Toute activité qui détruit la végétation près des étangs réduit la qualité et la quantité de l'habitat essentiel pour les oiseaux aquatiques et les oiseaux de rivage. Les exigences de l'habitat de nombreuses espèces animales ne leur permettent pas de s'adapter aux

changements créés par la perturbation du terrain. Ces modifications réduisent leur espace vital (ELAW, 2010). Le degré auquel les animaux tolèrent la concurrence humaine pour l'espace varie. Certaines espèces tolèrent très peu de perturbation. Dans le cas où un habitat particulièrement critique devient limité, comme un lac, un étang ou une zone de reproduction primaire, une espèce pourrait disparaître. Les mines à ciel ouvert peuvent dégrader les habitats aquatiques avec des impacts ressentis à de nombreux kilomètres du site.

Le **morcellement de l'habitat** se produit lorsque grandes portions de terres sont scindées en des petites parcelles, rendant difficile la dispersion des espèces indigènes d'une parcelle à une autre entravant ainsi les routes migratoires naturelles. L'isolement peut conduire à un déclin des espèces locales ou effets génétiques comme la consanguinité. Les espèces qui nécessitent des parcelles de forêts importantes disparaissent tout simplement (ELAW, 2010).

La **décharge massive des stériles** sur les pentes situées en contrebas des zones d'extraction. Le décapage superficiel destiné à atteindre le minerai affecte directement la végétation. L'accumulation de déblais stériles, d'autant plus sensibles à l'érosion du ruissellement qu'ils sont rejetés sur des pentes fortes en milieu accidenté et que l'on se trouve dans un domaine climatique à pluies intenses provoque des dommages importants : entraînement des matériaux dans les rivières qu'ils engorgent, ensevelissant la végétation des berges, tuant parfois celles-ci ainsi que la faune aquatique, exhaussement du fond des lits mineurs provoquant des inondations dans les lits majeurs et à l'aval et recouvrant des terres agricoles fertiles. Une pollution esthétique des eaux littorales des plages, atteintes à la flore et à la faune marines par l'accumulation d'un surcroît de matériaux fins entraînés notamment lors des périodes de fortes pluies.

Parmi les pratiques recommandées et les actions réparatrices pour limiter les incidences sur la biodiversité pendant l'exploration :

- la création de milieux artificiels (plans d'eau) en milieu dégradé. Ces milieux apportent une augmentation de la biodiversité mais cela correspond à une perte en cas de substitution à des zones humides naturelles à faune et flore originales. Leur taille est souvent trop faible pour accueillir des espèces animales intéressantes, leur aménagement est stéréotypé et sommaire, la connaissance de ces milieux est souvent insuffisante et leur devenir est non garanti ;
- limiter le défrichage du terrain, en utilisant des technologies et des pratiques d'extraction réduisant au minimum la perturbation de l'habitat ;
- éviter de construire des routes partout, utiliser les corridors existants et construire loin des pentes abruptes et des cours d'eau ;
- utiliser un équipement plus léger et plus efficace pour réduire les incidences sur la biodiversité ;
- situer les trous de forage et les tranchées loin des zones fragiles ;
- recouvrir ou combler les trous de forage pour éviter que les petits mammifères s'y retrouvent coincés ;
- utiliser des végétaux indigènes pour remettre en végétation les terres défrichées aux fins de l'exploration.

5.2 Impact sur le paysage

L'impact majeur concerne le paysage qui peut être défini par son intérêt et son caractère. La sensibilité du paysage à partir de ces deux critères prend en compte les notions de fréquentation et de visibilité. L'implantation d'une carrière ou d'une mine à ciel ouvert entraîne une modification du paysage :

- Disparition de monts et montagnes pour l'extraction des ressources (Cerro de San Pedro),
- Creusage par dynamitage causant de gigantesques bassins et dépressions dans la topographie. Certaines mines peuvent atteindre jusqu'à 4 km de large et près de 1,5 km de profondeur,
- contrastes de forme, de couleurs,
- apparition d'un plan d'eau dans les sols agricoles visibles, abandonnés peuvent évoluer en décharge publique,
- d'un front de taille minéral surtout dans les carrières rocheuses à flanc de versant,
- déboisement des terrains environnants,

La remise en état du site après fermeture devrait permettre sa mise en valeur par un aménagement paysager qui implique des travaux complémentaires permettant une insertion optimale ou une affectation bien précise en fonction des caractéristiques du site : création d'activités de loisirs (la pêche), son insertion dans le paysage urbain en mettant en valeur ses qualités potentielles architecturales ou esthétiques. Le remise en état devra être conforme aux recommandations du paysagiste (BRGM, 1997).

Chapitre 6

Impacts sur l'atmosphère

Entre 0 et 100 km d'altitude, les variations de température permettent de subdiviser l'atmosphère en 3 couches superposées (Guyot, 1997) :

- la **troposphère** entre 0-7 km à 16 km, avec des nuages, des précipitations, et des variations notables de pression; la température diminue jusqu'à -55°C ; sa limite supérieure est la **tropopause**,
- la **stratosphère** jusqu'à 50 km, la température cesse de diminuer dans la stratosphère inférieure; elle augmente entre 30 et 50 km pour atteindre 0°C au niveau de la stratopause. La couche d'ozone est située au sommet vers 25 à 30 km; les molécules d' O_2 absorbent les ultra-violets courts et produisent des atomes libres d'oxygène qui se recombinent aux molécules pour donner l'ozone,
- l'**ionosphère** entre 50 à 700 ou 1000 km, la température diminue jusqu'à -90°C . A partir de 80 km, elle peut atteindre 300°C . Les atomes d' O_2 et d' O_3 sont ionisés sous l'action des ultra-violets solaires et des rayons cosmiques et donnent les aurores boréales et australes. Elle est divisée en mésosphère (50 à 80 km) et thermosphère.

6.1 Poussières

Les plus importantes sources de pollution atmosphérique dans les opérations minières sont (ELAW, 2010) :

- Les particules de matières transportées par le vent, à la suite de fouilles d'abattages par explosion, de transport de matériaux, de l'érosion par le vent, des poussières fugitives provenant des installations de résidus, des stations de culbutage, des décharges de résidus et des routes de pénétration. Les émissions de gaz d'échappement provenant de sources mobiles (voitures, camions, équipements lourds) augmentent ces

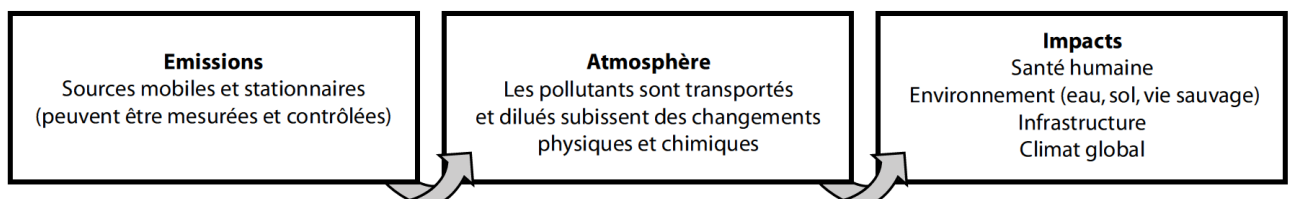


FIGURE 6.1 – Impacts sur la qualité de l'air (ELAW, 2010)

- niveaux de particules ; et
- Les émissions de gaz provenant de la combustion de carburants dans des sources fixes et mobiles, explosions et traitement des minéraux.

6.1.1 Sources mobiles

Les sources mobiles de polluants atmosphériques incluent les véhicules lourds utilisés dans les opérations d'excavation, les voitures qui transportent le personnel sur le site minier et les camions qui transportent les matériels miniers. Le niveau d'émissions de polluants provenant de ces sources dépend du carburant et de l'état de fonctionnement de l'équipement. Bien que les émissions individuelles puissent être relativement faibles, collectivement ces émissions peuvent constituer de réelles préoccupations. En outre, les sources mobiles sont une source importante de particules, de monoxyde de carbone et des composés organiques volatils qui contribuent considérablement à la formation d'ozone troposphérique (ELAW, 2010).

6.1.2 Sources fixes

Les principales émissions gazeuses proviennent de combustion de carburants dans les installations de production électrique, des opérations de séchage, de grillage et de fusion. de nombreux producteurs de métaux précieux fondent le métal sur place avant de l'expédier vers les raffineries hors site. En général, l'or et l'argent sont produits dans les fours de fusion qui peuvent produire des niveaux élevés de mercure dans l'air, d'arsenic, de dioxyde de soufre et d'autres métaux (ELAW, 2010).

6.1.3 Sources fugitives

Ces émissions qui ne pourraient pas raisonnablement passer par une tuyauterie, une cheminée, un orifice ou d'autres ouvertures à fonction équivalente. Les sources courantes d'émissions fugitives comprennent : le stockage et la manutention de matériaux ; le traitement de mine ; la poussière fugitive, l'abattage, les activités de construction et les galeries associées aux activités minières ; les coussins de lixiviation et les tas de résidus de minerais et les bassins de décantations ; et les tas de déchets roches. Les impacts sont difficiles à prévoir et à calculer mais devraient être considérés puisqu'ils pourraient être une source importante de dangereux polluants atmosphériques (ELAW, 2010).

6.2 Bruits et vibrations

Les bruits imputables à une carrière ou une mine peuvent être liés à la méthode d'exploitation (tir de mines, abattage), au traitement des matériaux (concassage, criblage), à l'enlèvement et au transport de ces dernières (BRGM, 1998). La pollution par le bruit peut inclure les bruits en provenance des moteurs de véhicules, le chargement et le déchargement de roches dans des tombereaux en acier, les toboggans, la production

Modes de dispersion possibles des matières solides :	Prévention :
Erosion par le vent des surfaces de la retenue : <ul style="list-style-type: none"> ▪ crête de la digue ou du terril ▪ pentes des digues ou des terrils ▪ surface des plages 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ traitement de la crête et des talus de la digue comme pour l'érosion par l'eau ▪ pour la surface, prévoir éventuellement brise-lames, pulvérisation d'eau, application d'un liant, par pulvérisation d'une émulsion bitumineuse [8, ICOLD, 1996], paillis en surface [11, EPA, 1995], lait de chaux ▪ dans des cas extrêmes, prévoir éventuellement un dépôt subaquatique des résidus ▪ végétalisation de surface, flottante ou sur les zones inactive ▪ changement fréquent des points de déversement sur le périmètre pour obtenir le mouillage permanent de la surface [11, EPA, 1995].

FIGURE 6.2 – Mesures de prévention des poussières (Commission européenne, 2009)

électrique, et d'autres sources. Les impacts cumulatifs des pelles mécaniques, du recarage, du forage, de l'abattage par explosion, du transport, du concassage, du broyage et du stockage en grandes quantités peuvent affecter de manière significative les proches résidents et la faune.

Les vibrations sont associées à de nombreux types d'équipements utilisés dans l'exploitation minière, mais l'abattage par explosion est considéré comme la source la plus importante. La vibration affecte la stabilité des infrastructures, les bâtiments et les maisons des riverains à proximité des opérations des grandes mines à ciel ouvert. Les chocs et les vibrations, à la suite d'abattages peuvent entraîner du bruit, de la poussière et conduire à la destruction des structures dans les zones environnantes non-habitées. La vie animale, dont la population locale peut dépendre, pourrait également être perturbée. Les mesures compensatoires sont (Commission européenne, 2009) :

- utiliser des systèmes fonctionnant en continu (convoyeurs à bande, pipelines, etc.),
- enfermer les convoyeurs à bande sur les sites où le bruit constitue un problème local,
- créer d'abord le flanc extérieur d'un terril, puis les rampes de transport et les gradins d'exploitation dans sa zone intérieure dans toute la mesure du possible.

Chapitre 7

TD : Ateliers thématiques et débats d'idées

Des ateliers pédagogiques feront l'objet des séances de TD du module "Exploitation et Environnement". Chaque étudiant est invité à préparer un cours sous forme d'exposé oral qu'il présente devant ses collègues et invités. Ces cours viendront compléter l'enseignement théorique dispensé en la matière. L'exposé oral sera le fruit de ses recherches bibliographiques, analyses de documents, recherches thématiques et autres qu'il a entreprises. Le but est de permettre à l'étudiant d'approcher la problématique environnementale en tant que pédagogue et de susciter un débat de groupe en tant qu'exploitant où les spécialistes (Chercheurs et ingénieurs miniers, écologues, politiques, industriels, associations et citoyens) contribueront à animer ces ateliers thématiques.

18 ateliers seront proposés, ils se rapportent aux thèmes suivants :

- Développement durable : Où en est-on avec ce concept en Algérie ?
- Analyse et adéquation du code de l'environnement et du code minier en Algérie.
- Après le pollueur-payeur, le dépollueur-payé.
- Dégradation du milieu naturel suite à l'exploitation d'une carrière d'agrégat.
- Quelle place occupe le concept du HSE (Health, Safety and Environnement) dans le métier de minier ?
- L'eau face au défi de la croissance économique : visions opposées d'hydrogéologues et de miniers.
- Gisement de mercure à Azzaba (Skikda) : étude de cas.
- Patrimoine historique et culturel en péril face à l'extraction industrielle.
- Piton d'Akbou : les enjeux environnementaux de l'exploitation
- Les gisements de Tala Hamza (Béjaia) et ses impacts sur le milieu naturel.
- Faune et flore en péril
- Les miniers sont-ils les pires ennemis de l'environnement ?
- Le cadre de vie en milieu industriel : menaces sur la population
- Remédiation et solutions, comment dépolluer un site contaminé par l'activité minière ?
- Maladies chroniques : quand la mine tue !
- Les répercussions d'une exploitation sur un sol agricole.
- Les associations citoyennes peuvent-elles jouer un rôle dans la prise de décision ?
- L'environnement autour d'un champ pétrolier : cas du bassin de Hassi Messaoud

Bibliographie

Agences de l'eau (2000) - Effets de l'extraction des granulats alluvionnaires sur les milieux aquatiques, Bilan et alternatives. 41p

Agence de l'eau Bassin Rhône-Méditerranée-Corse (2002) - Pollution toxique et écotoxicologie, notions de base. Guide technique N°07, 83p

Beauchamp J. (2008) - Propriétés des sols, cours en ligne, Université de Picardie Jules Verne (<https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/sol.htm>)

BRGM (2008) - Evaluation des impacts environnementaux des carrières : avancement des travaux, synthèse 2005-2007. 33p

BRGM (1998) - Schéma départemental des carrières du Var. Document public, BRGM, 80p

BRGM (1997) - Schéma des carrières, Rapport

Boulvain F. (2014) - Eléments de sédimentologie et de pétrologie sédimentaire, cours en ligne, Université de Liège (<http://www2.ulg.ac.be/geosed/sedim/sedimentologie.htm>)

Commission Européenne (2009) - Gestion des résidus et stériles des activités minières, 202p

ELAW (2010) - Guide pour l'évaluation des projets EIE du domaine minier, 1ère édition, version française, Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW), Eugene, Etats-Unis d'Amérique, 118p

Eriksson N. (2002) - Acid Rock Drainage (ARD).

Géosystem Consult (1999) - Alimentation en eau potable et industrielle des agglomérations situées dans le couloir Akbou-Béjaia à partir du barrage de Tichi haf, Agence Nationale de l'Eau Potable et Industrielle de l'assainissement (AGEP), Alger

Guyot G. (1997) - Climatologie de l'environnement, de la plante aux écosystèmes. Editions Masson, 505p

ICMM (2006) - Guide de bonnes pratiques : exploitation minière et biodiversité. 154p

Hertig J-A. (2006) - Traité de Génie Civil, Volume 23 : Etudes d'impact sur l'environnement. Deuxième édition revue et augmentée. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 544p

Kessasra, F. (2015) - Modélisation hydrogéologique des écoulements d'eaux souterraines et de surface de la nappe des alluvions de la vallée de la Soummam (Nord-Est Algérie) - Impacts sur l'environnement et les écosystèmes. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, USTHB d'Alger, 434 p

Lottermoser B.G. (2010) - Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environne-

mental Impacts. Springer, 3rd edition, 400p

Rainelli P. (1996) - Pollution des sols, problèmes économiques. Numéro spécial de "Etudes et gestion des sols", INRA, pp 307-320

Ryding S.O. et Rast W. (1994) - Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Editions Masson, Paris, 294 p.

Sigg L., Behra P. et Stumm W. (2000) - Chimie des milieux aquatiques, Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. Dunod, Paris.



L'auteur est titulaire d'un Doctorat es Sciences en Hydrogéologie de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène d'Alger. Ancien élève du Master 2 Hydrologie-Hydrogéologie de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC) et du Magistère Hydrogéologie de l'USTHB. Il est actuellement Maître de conférences et chargé de recherches à au Laboratoire de Génie Géologique de l'Université de Jijel, consultant auprès du Programme Hydrologique International de l'UNESCO à Paris et expert auprès de plusieurs bureaux d'études en géophysique et environnement.