

Document public

L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers

Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa « Pollution des sols et des eaux »

dr-hia

BRGM/RP-55143-FR mars 2008

.89 3740,46 -625.5





L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers

Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa « pollution des sols et des eaux »

BRGM/RP-55143-FR

mars 2008

Rapport rédigé dans le cadre de l'ouvrage collectif « PPRM » et résultant des contributions de : BRGM, GEODERIS, INERIS et MEDAD

D. Artignan, Ph. Baranger, P. Billaud, M. Lansiart, B. Mazenc Avec la collaboration de A. Balian, H. Baroudi, Y. Itard, J.P. Josien, N. Poirot, F. Quiot, R. Salmon

Vérificateur:

Nom: F. BLANCHARD

Date:

Signature:

Approbateur:

Nom: J. TESTARD

Date:

Signature:

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Préliminaire

Le présent document a été élaboré par le BRGM, sous la coordination du Service Ressources Minérales et avec l'appui du Service Environnement et Procédés Innovants, dans le cadre d'un groupe de travail associant également des représentants de GEODERIS, de l'INERIS et de la DARQSI.

Il s'agit d'un guide méthodologique s'intégrant dans un travail collectif établi sous l'égide du Ministère de l'Écologie du Développement et de l'Aménagement Durables (MEDAD). Il s'intègre dans un travail plus vaste de différents organismes impliqués dans l'évaluation des risques liés à l'après-mine : BRGM, CSTB, École des Mines de Paris, GEODERIS, INERIS. Plusieurs représentants des DRIRE ont également participé activement à son élaboration.

Mots clés: Guide, Méthodologie, Aléa, Environnement, Pollution, Sol, Eau, PPRM.

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

Artignan D., Baranger Ph., Billaud P., Lansiart M., Mazenc B., avec la collaboration de Balian A., Baroudi H., Itard Y., Josien J.P., Poirot N., Quiot F., Salmon R. (2008) - L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa « pollution des sols et des eaux ». Rapport final BRGM/RP-55143-FR, mars 2008. 109 p., 7 fig., 9 tab., 5 ann.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1.	Introduction	9
2.	Place et rôle des plans de prévention des risques miniers	11
	2.1. LE CONTEXTE DE L'APRÈS-MINE EN FRANCE	11
	2.1.1.Bref historique de l'exploitation minière française	11
	2.1.2.Les risques et nuisances dans la phase « après-mine »	13
	2.1.3. Principaux paramètres influant sur la nature des risques et des nuisances	16
	2.2. LE PPRM : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES	18
	2.2.1.L'outil PPR dans la politique française de prévention des risques	18
	2.2.2.Quelques principes du droit minier	20
	2.2.3.Le PPRM : cadre réglementaire et spécifiques	22
	2.3. L'ÉLABORATION DES PPRM	23
	2.3.1. Procédure administrative d'élaboration	23
	2.3.2.Les pièces constitutives réglementaires	25
	2.3.3.Les principales phases de réalisation des PPRM	
	2.3.4. Quelques principes d'élaboration	28
3.	Phénomènes et mécanismes initiateurs de pollutions d'origine minière	
	sur les eaux et les sols	31
	3.1. ORIGINE DES PHÉNOMÈNES REDOUTÉS	31
	3.1.1. Origine	31
	3.1.2.Les contaminants et leurs actions	32
	3.1.3.Les sources	33
	3.1.4. Description sommaire des mécanismes de transfert des pollutions d'origine minière dans l'environnement	35
	3.1.5.Les populations, usages des sites et des milieux, les ressources et les milieux naturels à protéger (milieux d'exposition)	39
	3.2. NATURE ET IDENTIFICATION DES PHÉNOMÈNES REDOUTÉS	39
	3.2.1.Typologie des pollutions minières	40
	3.2.2.Types d'ouvrages concernés	41
	3.2.3. Conditions d'apparition des phénomènes redoutés (processus)	44
	3.2.4. Scénario de pollution	46

	cation, caractérisation et cartographie des aléas inementaux	55
4.1. GÉ	NÉRALITÉS SUR L'ALÉA	55
	.1.Préambule	
4.1	.2.Définition de l'aléa	55
4.1	.3. Principes de qualification de l'aléa	56
4.1	.4. Cartographie de l'aléa	60
4.1	5. Collecte des informations : la phase informative de l'étude	61
4.2. L'A	LÉA POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS	66
4.2	1. Politique de gestion des sites pollués du MEDAD : rappel de la réglementation et de la méthodologie	66
4.2	.2.Qualification de l'aléa pollution des eaux et des sols	
	.3. Cartographie de l'aléa pollution des eaux et des sols	
5. Bibliog	raphie	81
Liste des	s figures	
Figure 1 -	Schéma montrant les différentes sources de pollution et les voies de transfert des polluants métalliques dans le contexte minier.	34
Figure 2 -	Mine à ciel ouvert réhabilitée drainant les eaux de surface et souterraines	42
Figure 3 -	Tailings (résidus de traitement) déposés en tas et repris par l'érosion	43
Figure 4 -	Petit drainage minier acide à la base d'un tas de résidus de traitement	49
Figure 5 -	Emergence minière à la sortie d'une ancienne galerie obstruée	50
Figure 6 -	Dépôt de vieux fûts de produits chimiques au niveau de l'usine de traitement du minerai	
Figure 7 -	Pollution des eaux : classes d'intensité.	
Liste des	s tableaux	
Tableau 1 -	Relation entre types de contaminations et ouvrages miniers	44
Tableau 2 -	Processus de pollution ayant pour source les travaux miniers	45
Tableau 3 -	Processus de pollution ayant pour source les stockages de déchets miniers	45

l ableau 4 -	et produits chimiques (hors ICPE)	46
Tableau 5 -	Définition des trois niveaux d'aléa en fonction de l'intensité et de la prédisposition	59
Tableau 6 -	Pollution des eaux : classes d'intensité	69
Tableau 7 -	Pollution des eaux de surface : classes de prédisposition	72
Tableau 8 -	Pollution des sols : classes d'intensité.	74
Tableau 9 -	Pollution des sols : classes de prédisposition.	77
Liste des	s annexes	
Annovo 1	Activité extractrice dominante en France et type de pollution attendue	95
	· · · · · ·	
	Caractérisation de la biodisponibilité en risque sanitaire	09
Annexe 3 -	Rappel sur la nouvelle démarche de gestion des sites et sols pollués en France	97
Annexe 4 -	Directives, Circulaires et Décrets applicables au PPRM dans le cadre de la gestion des eaux	103
	de la gestion des caux	
Annexe 5 -	Gammes de valeurs « ordinaires » et d'anomalies naturelles dans les sols. INRA.	

1. Introduction

A près avoir largement exploité, durant plusieurs siècles, les ressources minérales présentes dans son sous-sol, la France a progressivement vu ses sites d'extraction se fermer. La cessation de l'activité minière n'a pas pour autant induit la disparition des risques et nuisances susceptibles d'affecter les terrains de surface situés dans l'emprise des anciennes exploitations. Ainsi, durant la période qui suit l'exploitation, traditionnellement appelée « après-mine », de nombreux désordres peuvent se développer et des pollutions peuvent affecter l'environnement, parfois dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement.

Outre les phénomènes de mouvements de terrain (affaissements, effondrements), les anciens sites miniers peuvent parfois être affectés par des remontées de gaz pouvant présenter des compositions dangereuses. De plus, les perturbations irréversibles, que les travaux d'extraction ont induites sur les circulations d'eau souterraine, peuvent être à l'origine d'éventuels désordres, tant en ce qui concerne le schéma de circulation des eaux (inondations des points bas, perturbation du régime des cours d'eau), que en ce qui concerne leur qualité (pollution des eaux ou des sols).

Afin d'afficher ces différents risques et de les gérer au mieux, l'État s'est doté d'un outil réglementaire opérationnel et performant : les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Établis directement sur la base des Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles, ces PPRM ont pour vocation d'identifier les secteurs les plus sensibles au développement de risques ou nuisances dans le long terme et d'établir des règles d'aménagement du territoire adaptées aux différentes contraintes liées à l'après-mine.

Ce guide a pour vocation d'accompagner et de faciliter l'évaluation des aléas lors de la mise en œuvre du volet environnemental « pollution des sols et des eaux » de ces PPRM. Il complète le document INERIS (DRS-06-51198/R01) relatif aux aléas mouvements de terrains, inondations et émissions de gaz de mine. Il est destiné à l'ensemble des acteurs qui interviennent lors de l'évaluation des aléas environnementaux (services de l'État, collectivités, bureaux d'études...). Outre une présentation générale de l'outil PPRM (objectifs, procédure d'élaboration), il s'attache surtout à détailler les principes techniques et réglementaires qui gouvernent à l'élaboration des phases informatives et évaluation des aléas.

Il est conçu comme un ouvrage utilitaire et pratique. De fait, le lecteur peut aller y puiser les informations qu'il recherche, sans devoir nécessairement s'approprier l'intégralité de son contenu.

L'ouvrage se décompose d'une introduction suivie de trois chapitres principaux qui décrivent successivement :

- la place et le rôle des Plans de Prévention des Risques Miniers dans la politique nationale de prévention des risques ;

- la description des phénomènes susceptibles d'induire des pollutions ou des nuisances d'origine minière ainsi que l'identification des principaux mécanismes pouvant être à l'origine de ces désordres ;
- les principes gouvernant à la qualification de l'aléa et à sa cartographie.

Plusieurs annexes complètent le texte. Elles comprennent certains éléments de terminologie ainsi que des compléments techniques spécifiques qui n'auraient pas leur place dans le corps du document.

Il faut noter que d'autres outils réglementaires que les PPRM sont également à la disposition des services de l'État pour gérer les problèmes de pollution générés par un site minier. On citera notamment les outils relatifs aux sites et sols pollués et les procédures relatives à la police de l'eau. Il s'agira donc, pour les services de l'État, de choisir l'outil le mieux adapté en fonction du contexte administratif et réglementaire, de l'urgence de traiter ou non le site et des risques qu'il pose pour l'environnement et les populations. Dans le cadre d'une démarche de type PPRM, il est possible de se limiter à la phase de l'aléa environnement si son résultat montre qu'il n'est pas nécessaire d'engager l'ensemble du processus.

2. Place et rôle des plans de prévention des risques miniers

2.1. LE CONTEXTE DE L'APRÈS-MINE EN FRANCE

2.1.1. Bref historique de l'exploitation minière française

Comme de nombreux autres pays européens, la France possède une longue tradition minière. L'extraction et la valorisation des matières premières présentes dans son sous-sol ont d'ailleurs contribué, de manière décisive, au développement de la puissance industrielle française.

Sur notre territoire, les premiers indices d'exploitations souterraines de ressources minérales (anciennes mines de silex, exploitation de sources salées) remontent au Néolithique (du V^e au III^e millénaire av. J.C.). Avant même l'occupation romaine, les Celtes puis les Gaulois exploitaient régulièrement l'or et l'étain (I^{er} millénaire av. J.C.). C'est toutefois durant l'époque gallo-romaine que l'activité extractive prit un véritable essor puisque l'argent, le plomb, le cuivre et le fer furent, à leur tour, recherchés et exploités. L'activité minière prenait alors la forme d'une multitude de petites exploitations locales, réparties sur l'ensemble du territoire (I^{er} et II^e siècles).

Après la chute de l'empire romain, l'exploration et l'extraction minières se poursuivirent à un rythme relativement peu soutenu durant près d'un millénaire, avant de redevenir des priorités nationales. Sous l'influence de l'Europe Centrale et pour répondre aux besoins économiques croissants résultant de l'essor démographique et de la stabilisation politique, les travaux de prospection et d'exploitation minière vont en effet à nouveau proliférer (XI^e - XIII^e siècles). C'est notamment l'époque où le charbon commence à être exploité dans les bassins de l'Hérault, de Provence et de la Sarre.

C'est toutefois la révolution industrielle (XIX° - XX° siècles) qui constituera l'impulsion décisive dans l'essor de l'activité minière française. Les progrès technologiques vont en effet contribuer à transformer une activité jusque là essentiellement artisanale en une activité industrielle de production. Outre la naissance des grands bassins miniers (charbon, fer, sel...) qui contribueront grandement à la richesse de l'économie nationale, le début du XIX° siècle se caractérise également par une importante diversification des matériaux recherchés et exploités (pétrole, manganèse, fluorine, zinc...).

Malgré un contexte globalement défavorable (priorité au développement colonial, crise économique de 1929), l'activité minière continua son essor en métropole durant la première moitié du XX^e siècle, principalement sous l'effet des deux conflits mondiaux.

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, l'effort national entrepris pour la reconstruction du pays et la diminution de la dépendance énergétique de la France va

faciliter la poursuite de la relance de l'activité minière. La production de charbon et de lignite augmente ainsi rapidement pour atteindre 60 millions de tonnes en 1958, année record. Durant cette période, d'importants efforts d'exploration pétrolière sont également entrepris et les premières grandes exploitations d'uranium débutent. Le développement des techniques géochimiques, géophysiques et les progrès importants réalisés dans le domaine de la prospection engendrent enfin la découverte de plusieurs sites importants exploités ultérieurement avec succès par des sociétés minières françaises (période des « trente glorieuses »).

La chute importante des cours en monnaie constante et/ou l'épuisement de certains gisements ont progressivement engendré le déclin de l'activité minière française. Initié au début des années 1960 pour le charbon et le fer et au début des années 1980 pour l'exploitation des autres substances, ce déclin s'est accéléré depuis le début des années 1990.

La fermeture de la dernière mine de fer date de 1995 et l'ultime exploitation d'uranium a fermé ses portes en 2001. L'exploitation aux « Potasses d'Alsace » a cessé en 2003 et la dernière taille de charbon s'est arrêtée en 2004. Désormais, les seules industries minières actives en France métropolitaine¹ résultent de l'extraction du sel, par mine souterraine ou par dissolution, de l'exploitation de calcaire asphaltique à proximité d'Alès (30) et de bauxite à Villeveyrac (34).

La France se trouve donc désormais confrontée à la gestion de la phase « d'aprèsmine », bien plus qu'à la gestion de l'activité minière à proprement parler. Cette situation et ces problématiques nouvelles ont conduit l'État à se doter de moyens et d'outils adaptés à la gestion de l'héritage, parfois lourd, d'un passé dont on n'oubliera toutefois pas qu'il a contribué à asseoir la position de la France en tant que puissance industrielle mondiale.

La priorité consiste désormais à optimiser la reconversion des régions directement touchées par la disparition progressive d'activités industrielles productrices d'emplois et de richesses. Cette démarche implique une réflexion approfondie en termes de gestion et d'aménagement du territoire. Il convient en effet d'identifier et de localiser, aussi précisément que possible, les risques et nuisances susceptibles de perdurer après la fin de l'extraction minière. Une fois ces contraintes identifiées, il est alors possible d'énoncer des mesures opérationnelles adaptées à chaque contexte, permettant le développement de nouvelles activités dans les zones les plus sûres et les plus adaptées à cela.

Ceci constitue l'objet principal des Plans de Prévention des Risques Miniers.

¹ L'exploitation du nickel reste pour sa part très active en Nouvelle-Calédonie.

2.1.2. Les risques et nuisances dans la phase « après-mine »

a) Malgré la fermeture des mines, des risques et nuisances peuvent persister

La fermeture des anciennes exploitations minières n'induit pas automatiquement la disparition définitive des risques et des nuisances qui en résultent. Ces anciens sites peuvent en effet engendrer des désordres ou nuisances susceptibles de porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens situés dans l'emprise des travaux miniers ou même au-delà des travaux miniers, dans le cas d'impacts environnementaux liés aux eaux de surface et souterraines. Dans de nombreux cas, ces désordres et nuisances perturbent l'utilisation possible des terrains concernés.

L'importance des travaux est souvent d'une ampleur telle qu'un retour à l'état initial est totalement impossible.

Dans ces conditions, l'extraction minière a induit une perturbation irréversible des conditions régnant au sein du massif rocheux. La persistance de séquelles ou de nuisances est donc généralement inéluctable. Cette situation résulte en partie du fait que les anciennes exploitations minières n'avaient pas pour objectif d'éviter les nuisances possibles vis-à-vis du milieu environnant, mais bien d'optimiser la récupération du minerai dans des conditions de sécurité acceptables.

La question du devenir à long terme des ouvrages, qui représente aujourd'hui l'une de nos préoccupations majeures, ne constituait ainsi pas la priorité des anciens exploitants et ce d'autant qu'ils ne disposaient pas du retour d'expérience désormais disponible en ce qui concerne le devenir à long terme des exploitations minières.

Les impacts induits par une ancienne exploitation minière peuvent être de plusieurs ordres. Ils peuvent se traduire par des perturbations hydrologiques potentiellement néfastes pour l'occupation du sol ou du sous-sol ou se manifester par des instabilités de terrains de surface pouvant mettre en péril la sécurité des personnes ou induire des dommages sur les habitations ou les infrastructures. Ils peuvent également prendre la forme d'émission de gaz potentiellement dangereux ou toxiques ou résulter de rejets dans l'environnement de substances chimiques potentiellement dommageables ou dangereuses pour les personnes et/ou l'écosystème.

Nous décrivons ci-dessous les principales pollutions et nuisances susceptibles de persister dans le long terme dans l'emprise d'anciens travaux miniers en renvoyant à la description précise et illustrée des phénomènes et mécanismes qui fait l'objet du chapitre II du guide.

b) Inondation des points bas ou perturbation du débit des rivières

À la fin des travaux d'extraction, l'arrêt des pompages d'exhaure² induit la constitution d'un réservoir souterrain qui se déverse, en un ou plusieurs points, dans le réseau hydrographique de surface. La nappe phréatique reprend ainsi un niveau voisin de celui qui préexistait à l'exploitation minière.

Toutefois, les travaux miniers ont, entre temps, contribué à perturber les conditions de circulation des eaux souterraines ou de surface (affaissement de la surface du sol, création d'exutoires artificiels de la nappe, perturbations des nappes souterraines...). On ne se retrouve donc que très exceptionnellement dans des conditions strictement identiques aux conditions initiales.

Comme durant la période « sèche », correspondant au rabattement de nappe par pompages d'exhaure, certaines zones sensibles ont fait l'objet d'un fort développement en termes d'occupation du sol et/ou du sous-sol. On comprend aisément qu'une attention particulière doit être portée au risque d'inondation des points bas topographiques par remontée de nappe.

Par ailleurs, d'importantes modifications des schémas de circulation des eaux peuvent résulter de l'arrêt des pompages d'exhaure. Si la configuration retenue favorise le déversement de l'ensemble du réservoir minier en un point donné du réseau hydrographique, le risque d'inondation par débordement de cours d'eau doit donc être considéré en période de hautes eaux. À l'inverse, la fin des pompages d'exhaure peut mettre un terme à des rejets artificiels au sein de cours d'eau à faible étiage. En période de sécheresse, le non-soutien d'étiage de ces ruisseaux peut alors induire des nuisances sur l'utilisation possible de la ressource en eau.

Enfin, on citera le risque d'inondations brutales, par vagues déferlantes, potentiellement dangereuses pour les personnes et les biens. Ces phénomènes rarissimes résultent principalement de l'effondrement d'une cavité ennoyée, de la rupture d'une digue ou d'un barrage étanche retenant un gros réservoir d'eau en amont.

c) Instabilités des terrains de surface

La constitution d'importants vides résiduels en souterrain, de fronts rocheux de grandes dimensions ou de volumineux dépôts de résidus d'exploitation peuvent engendrer des instabilités de diverses natures susceptibles d'induire des risques ou nuisances pour les personnes et les biens situés dans l'emprise des travaux miniers.

² Exhaure. On réservera ce terme pour « l'évacuation des eaux drainées par les divers travaux de la mine » (dictionnaire SIM), ce qui sous-entend avec pompage au cours de l'exploitation, alors qu'après arrêt des travaux et arrêt des pompages on parlera d'émergence qui correspond à un fonctionnement hydrodynamique naturel.

Enfin, les ouvrages de dépôt, souvent volumineux, constitués pour entreposer les matériaux rocheux non valorisables, peuvent subir des instabilités parfois importantes. Outre les phénomènes superficiels de ravinement et d'érosion, des glissements ou des ruptures d'ouvrages se transformant en coulées peuvent engendrer des conséquences importantes en aval des ouvrages.

d) Émanations de gaz de mine en surface

L'extraction de grandes quantités de minerai en souterrain contribue à créer un réservoir minier rempli de gaz de mine. Ce gaz est formé d'un mélange de plusieurs constituants à des teneurs variables. Sous l'effet de mécanismes divers et variés (remontée de nappe, différentiel de pression...), le gaz de mine peut être chassé vers la surface au travers de drains naturels (fractures, fissures...) ou artificiels (puits, galeries...).

Si l'atmosphère minière présente une constitution dangereuse, la sécurité des occupants de surface peut être affectée si le gaz est piégé dans des vides non ventilés (caves, réseaux enterrés...). Les principaux dangers pour les personnes sont l'inflammation ou l'explosion (méthane), l'intoxication (CO, CO₂, H₂S...), l'asphyxie (déficit en oxygène) ou l'irradiation (radon).

e) Pollution des eaux et des sols, émission de rayonnements ionisants

Les modifications et perturbations du milieu induites par l'exploitation minière sont susceptibles d'induire, de manière plus ou moins sensible, des dégradations de la qualité des paramètres environnementaux dans l'emprise de la mine. Ces dégradations affectent principalement les eaux souterraines ou de surface ainsi que les sols. Elles peuvent aussi concerner l'atmosphère, notamment en présence de rayonnements ionisants ou d'émissions de particules toxiques.

Pour évaluer l'importance des risques et nuisances environnementaux, on raisonne généralement en termes de sources de polluants (nature, toxicité et capacité d'émission des pollutions attendues), de vecteurs (eaux, sols, air) et de « milieux d'exposition » mis en contact avec ces pollutions (sensibilité des activités humaines ou des écosystèmes aux contaminations chimiques pressenties...).

La notion de risque de pollution dépend de la nature physico-chimique de la source et non de l'origine ou de la genèse de la source. La genèse influe sur la nature physicochimique mais n'est pas directement liée au risque qu'elle présente : un oxyde de plomb, qu'il soit naturel ou anthropique, reste un oxyde de plomb avec sa dangerosité propre.

Les impacts environnementaux résultent de phénomènes physico-chimiques complexes et variés étroitement liés à la nature de la substance exploitée et à la composition minéralogique des terrains encaissants, ainsi qu'à la méthode d'exploitation et de traitement (travaux souterrains ou à ciel ouvert, ouvrages de dépôt, usine de traitement, stockages de produits chimiques...). Devant la difficulté d'estimer

les risques strictement liés à la part « anthropique » et ceux liés au « Fond Géochimique Naturel élevé »³ (FGN), la démarche consiste à circonscrire la zone touchée par les activités humaines (zone d'influence de l'exploitation minière) et d'estimer les risques en tous points de cette zone, que ces risques soient totalement ou partiellement liés à l'activité minière.

Les principaux milieux susceptibles d'être impactés par ces nuisances environnementales sont les eaux souterraines, les eaux de surface, les sols et l'air.

2.1.3. Principaux paramètres influant sur la nature des risques et des nuisances

Chaque site minier est unique et se trouve dans une configuration et un environnement qui lui sont propres. Il serait donc illusoire, voire dangereux, de globaliser les scénarios d'évolution et de définir, de manière générique et sans une analyse circonstanciée, la nature des risques résiduels susceptibles d'affecter un ancien site minier quel qu'il soit.

Les risques d'inondations, de mouvements de terrain, d'émission de gaz ou les impacts environnementaux peuvent ainsi s'avérer critiques pour certaines exploitations, allant jusqu'à mettre gravement en danger la sécurité des personnes et des biens ou, à l'inverse, n'engendrer que des nuisances peu ou pas perceptibles sur d'autres sites beaucoup moins sensibles.

Le retour d'expérience montre toutefois que certains paramètres jouent un rôle majeur sur le comportement à long terme des anciens travaux miniers. De fait, les exploitations qui présentent des configurations sensiblement similaires, au regard de ces paramètres, auront tendance à développer des comportements visiblement comparables en termes de désordres et nuisances prévisibles à terme.

Parmi ces principaux paramètres, on détaillera notamment : la nature du matériau extrait, la structure du gisement, la méthode d'exploitation, la morphologie de la topographie, la nature des terrains, la porosité des aquifères...

a) La nature du matériau extrait et la minéralogie des terrains encaissants

La nature du matériau extrait influe directement sur la nature des pollutions attendues au droit d'un ancien site minier.

Ainsi, l'exploitation de gisements métalliques non ferreux (Pb, Ag, Zn, Cu, Al, U...) peut laisser supposer la présence de teneurs potentiellement élevées en métaux de base ou en éléments traces (Hg, Cd...) d'une part mis en solution dans les eaux d'exhaure et les effluents de résidus miniers et d'autre part dans les sols mis en contact avec ces eaux d'exhaure ou effluents.

³ Concentration naturelle en un élément, en un composé ou en une substance dans un milieu donné, en l'absence de tout apport extérieur spécifique, telle que l'activité humaine.

D'une manière générale, la présence de minéraux sulfurés (pyrite notamment), au sein du gisement exploité ou des terrains encaissants, sera souvent source de nuisances environnementales (acidification des eaux avec mise en solution de métaux et production de sulfates...). À l'inverse, la présence d'un environnement carbonaté ou alumino-silicaté contribuera à une neutralisation de l'acidité des eaux avec, pour conséquence, une diminution des nuisances associées.

L'exploitation de gisements d'évaporites (potasse, sel...) peut, pour sa part, contribuer à la mise en solution de sels dans les eaux souterraines ou de surface.

La nature du matériau extrait joue également un rôle essentiel sur le risque d'éventuelles émanations de gaz de mine. Ainsi, la présence d'anciennes mines de charbon (grisou, CO₂, CO...), d'uranium (radon) et, dans une moindre mesure, de potasse (grisou) exigera une attention particulière vis-à-vis de ce risque (se référer au rapport INERIS pour les aléas gaz de mines).

Enfin, la nature du minerai et des terrains encaissants joue évidemment un rôle sur la tenue des ouvrages miniers et, de fait, sur la stabilité des terrains de surface. Ainsi, toutes choses égales par ailleurs (dimensions, profondeur...), un pilier de charbon ne présentera pas un comportement identique à celui d'un pilier constitué de calcaire dolomitique massif (se référer au rapport INERIS pour les aléas mouvement de terrain).

b) La taille et la configuration géologique du gisement

D'une manière générale et quelle que soit la nature des risques étudiés, l'échelle des désordres redoutés augmente généralement avec la taille de l'exploitation (étroitement liée à celle du gisement).

Cependant, en ce qui concerne l'impact environnemental, chaque type de gisement (couches sédimentaires, filons, amas, minéralisations disséminées) peut, selon la configuration rencontrée, favoriser ou, au contraire, réduire la mise en contact des roches minéralisées avec les agents d'altération (eaux météoriques et eaux souterraines).

c) Facteurs industriels : les méthodes d'exploitation et de concentration du minerai

Les techniques de concentration des minerais jouent, pour leur part, un rôle essentiel sur les impacts environnementaux. Deux facteurs sont notamment essentiels dans l'identification des nuisances prévisibles: le premier concerne la nature des produits chimiques utilisés dans la chaîne de traitement et le second concerne la taille des particules générées par les procédés de préparation et de traitement des minerais. Plus la taille des particules est petite et plus celles-ci sont sensibles au risque de dispersion dans l'environnement par l'eau ou le vent. De plus, des particules de petite taille présentent une surface spécifique de contact élevée avec les agents d'altération,

ce qui contribue à augmenter leur capacité de production d'acides, de matières en suspension ou de polluants dissous.

d) Le relief

Les nuisances relatives à l'eau souterraine ont le plus souvent pour origine la remontée de la surface piézométrique de la nappe suite à l'arrêt des pompages d'exhaure. Une morphologie accidentée de la topographie favorise les possibilités d'intersection de la nappe avec la surface du sol et, corrélativement, l'apparition de résurgences. De surcroît, les différences d'altitude sont un élément moteur pour la circulation des eaux souterraines dont le débit au sein des travaux miniers aura tendance à augmenter. Un relief marqué constitue donc de manière générale une présomption d'aggravation de l'aléa eau souterraine. En contrepartie, la présence de points bas facilement identifiables rend plus facilement prévisible la localisation des sorties d'eau ou des zones de faible profondeur de la nappe et la prédiction d'occurrence de nuisances potentielles s'en trouve facilitée.

2.2. LE PPRM : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES

2.2.1. L'outil PPR dans la politique française de prévention des risques

Il est de la responsabilité de l'État d'afficher le risque et de l'intégrer dans la gestion de l'aménagement du territoire.

Jusqu'en 1982, les principaux risques naturels faisaient l'objet d'une approche cartographique et réglementaire spécifique : Plans de Surfaces Submersibles (PSS) pour les inondations, Zones Exposées aux Risques de Mouvements du Sol et du soussol (cartes ZERMOS) pour les mouvements de terrain, Plans de Zones Sensibles aux Incendies de Forêts (PZSIF), etc.

Les règles d'urbanisme ont également intégré assez tôt des outils de prévention et de gestion des risques. On citera pour mémoire le recours à des périmètres de risques dits « périmètres R-111.3 » au sens de l'article R-111.3 du Code de l'urbanisme, l'intégration de contraintes d'urbanisme au sein des POS (désormais PLU), la mise en place de Projets d'Intérêt Général (PIG) et le contrôle des permis de construire au regard de la sécurité publique (article R-111.2 du Code de l'urbanisme).

La **loi n° 82-600** du 13 juillet 1982 traitant notamment de l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles créa, dans son article 5-1, les Plans d'Exposition aux Risques (PER) dont l'objectif était de synthétiser et d'homogénéiser les différents outils de prévention. La difficulté de leur élaboration (notamment l'analyse de vulnérabilité) et la lourdeur administrative de leur mise en œuvre induisirent toutefois un important retard dans le calendrier prévisionnel de leur élaboration. Face aux catastrophes majeures du début des années 1990 (Vaison-la-Romaine notamment) et compte tenu du fait que les PER n'avaient pas répondu aux attentes du législateur, la relance de la

prévention des risques par l'État se manifesta, pour partie, par la création d'un nouvel outil réglementaire, plus opérationnel : le Plan de Prévention des Risques (PPR).

C'est la **loi n° 95-101** du 2 février 1995, relative au renforcement de la protection de l'environnement (aujourd'hui intégrée par les articles L.562-1 à L.562-7 au Code de l'Environnement) qui donna naissance aux PPR, les conditions d'élaboration de cet outil étant précisées dans le **décret n° 95-101** du 5 octobre 1995. Depuis cette loi, le PPR constitue le seul document réglementaire spécifique aux risques naturels. L'affichage du risque relevant d'une compétence dévolue à l'État, la prescription, la réalisation et l'approbation des PPR sont placées sous la responsabilité du Préfet.

L'objectif majeur des PPR est la prise en compte des risques dans les décisions d'aménagement du territoire. Si les PPR sont généralement prescrits dans des secteurs exposés à des niveaux de risques importants, la démarche peut également être entreprise, de manière préventive, dans des zones à enjeux futurs au sein desquelles il convient de limiter l'urbanisme pour éviter une augmentation inconsidérée du niveau de risque. À ce titre, à l'inverse des PER institués par une loi d'indemnisation et essentiellement tournés vers la notion « d'exposition », les PPR, tout en continuant à gérer l'existant, se veulent résolument tournés vers l'avenir, dans une optique de « prévention ».

Les PPR ont pour but de délimiter les zones directement ou indirectement exposées, en tenant compte de la nature et de l'intensité du ou des risques encourus. Ils s'attachent, dans ces zones, à définir des prescriptions relevant des règles d'urbanisme et de construction qui s'appliqueront à la gestion des projets d'installations nouvelles aussi bien qu'à celle des biens et activités existants.

Les PPR peuvent également définir des mesures générales de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises en compte par les collectivités publiques et/ou les particuliers, en ce qui concerne notamment les mesures liées à la sécurité des personnes et à l'organisation des secours.

Les PPR sont des outils réglementaires puissants puisqu'ils constituent des servitudes d'utilité publique et, qu'à ce titre, ils sont annexés aux POS ou PLU et prennent autorité sur lui en cas d'incohérence entre les deux documents. Ils sont également dotés de nombreux moyens d'application, à commencer par des sanctions pénales en cas de non-respect des normes définies par le règlement.

Bénéficiant d'un retour d'expérience d'une petite dizaine d'années en ce qui concerne le domaine des risques naturels, on peut considérer que les PPR se sont désormais imposés comme un outil majeur de la politique nationale de prévention des risques. Plus de 4 000 PPR naturels étaient approuvés fin 2003 et l'objectif du gouvernement est d'atteindre les 5 000 PPR naturels approuvés en 2005, ce qui traduit une volonté politique forte d'aboutir à la mise en œuvre de ces outils de prévention.

Le concept et les apports de la démarche sont désormais bien assimilés et relayés par les principaux partenaires concernés par la gestion des risques (administration, collectivités...). L'implication et l'engagement des acteurs locaux dans cette démarche

de prévention sont d'ailleurs de toute première importance, car la définition des prescriptions réglementaires résulte d'une approche concertée entre les représentants de l'État et les responsables des collectivités locales.

S'appuyant sur l'expérience réussie des PPR naturels, le législateur a progressivement élargi le champ d'application des PPR aux risques miniers (PPRM) et, plus récemment, aux risques technologiques (PPRT).

2.2.2. Quelques principes du droit minier

a) Différences entre mines et carrières

L'esprit du droit minier français, tel qu'on le connaît aujourd'hui, date du début du XIX^e siècle. Soucieuse d'assurer la mainmise de l'État sur les ressources minérales considérées comme stratégiques pour la nation, la loi de 1810 a ainsi introduit la notion de matériaux « concessibles » et de matériaux « non concessibles ».

Parmi les matériaux concessibles, on peut citer notamment :

- les métaux (fer, plomb, argent, uranium, or...);
- les hydrocarbures, aussi bien solides (charbon, lignite...), liquides (pétrole) que gazeux (méthane) ;
- le sel, la potasse ou les phosphates...

L'extraction des matériaux concessibles donne naissance aux mines, l'extraction des matériaux non concessibles étant assurée par les carrières (principalement matériaux de construction). C'est donc bel et bien la nature du matériau extrait qui différencie les mines des carrières et nullement la méthode d'exploitation. Il existe ainsi des mines souterraines et d'autres à ciel ouvert et il en va de même pour les carrières.

Depuis cette réforme fondamentale, l'État exerce un contrôle complet sur les substances « concessibles », à l'inverse des substances « non concessibles ». Pour les premières, il accorde ainsi des concessions à des entreprises privées ou publiques, sans avis des propriétaires de surface et touche une redevance proportionnelle au tonnage de matériau extrait, tout en assurant le suivi des exploitations dans le cadre de la police des mines.

Les mines, en activité ou arrêtées, relèvent du droit minier, cadre réglementaire très spécifique au sein duquel les propriétaires des terrains de surface sont exclus en terme de responsabilité. À l'inverse, les carrières souterraines abandonnées (susceptibles de faire l'objet d'un PPR) relèvent du droit civil et c'est le propriétaire du sol qui est propriétaire du sous-sol. La jurisprudence a toutefois statué pour assimiler les anciennes carrières souterraines abandonnées soumises à des risques de mouvements de terrain à un risque naturel. Les carrières souterraines feront donc l'objet de PPRN. Les mines, quant à elles, feront l'objet de PPRM.

b) La procédure d'arrêt des travaux miniers

La prise en considération de l'importance des séquelles environnementales susceptibles de subsister à court, moyen et long termes, consécutivement à l'arrêt des travaux miniers, a conduit le législateur à renforcer la procédure d'arrêt des travaux miniers. Il a ainsi mis l'accent sur les mesures de prévention et de surveillance que l'autorité administrative, chargée de la police des mines, est habilitée à prescrire à l'explorateur ou à l'exploitant. Le renforcement du volet préventif, attaché à la procédure d'arrêt des travaux miniers, a été réalisé en plusieurs étapes : loi du 3 janvier 1992, loi du 15 juillet 1994, loi du 30 mars 1999.

La procédure d'arrêt des travaux miniers est actuellement régie dans :

- l'article 91 du Code minier ;
- le chapitre V du titre III du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines.

La procédure d'arrêt des travaux miniers s'initie par une déclaration d'arrêt des travaux que l'exploitant doit transmettre au préfet. Au vu de la déclaration de l'exploitant, l'autorité administrative prescrit, en tant que de besoin, les mesures à exécuter et les modalités de réalisation qui auraient été omises par l'exploitant. Enfin, lorsque les mesures édictées dans le décret prescrivant les mesures de police ont été mises en œuvre et validées, le préfet donne acte à l'exploitant de la bonne exécution des mesures prescrites.

La déclaration d'arrêt des travaux s'accompagne d'un dossier d'arrêt élaboré par l'exploitant et transmis à l'autorité administrative. Ce dossier a pour objectif de dresser le bilan des effets des travaux sur l'environnement lors de la fermeture de l'exploitation, identifie les risques ou nuisances susceptibles de persister dans le long terme en accordant une attention toute particulière aux risques importants pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes ou des biens. Il propose enfin des mesures compensatoires destinées à gérer les risques ainsi identifiés. Ce document, quand il existe, c'est-à-dire pour des mines relativement récentes, constituera donc la base technique essentielle de l'élaboration d'un PPRM.

On notera, à ce sujet, que les deux procédures sont complémentaires mais non redondantes. La procédure d'arrêt des travaux a pour objectif d'évaluer les risques en l'état et de mettre en œuvre des mesures destinées à annuler, réduire ou surveiller les risques pouvant persister dans le long terme.

Le PPRM identifie, pour sa part, les nuisances ou risques susceptibles de perdurer à long terme, en intégrant les mesures en sécurité mises en œuvre par l'exploitant lors de la procédure d'arrêt des travaux. On parle alors de « risque résiduel ». Enfin, il établit des règles d'usage du sol ce qui n'est, en aucun cas, l'objet de la procédure d'arrêt des travaux.

2.2.3. Le PPRM : cadre réglementaire et spécifique

Concernant les risques miniers, la **loi n° 99-245** du 30 mars 1999, dite loi « aprèsmine », précise dans son article 5 (introduction d'un article 94 au Code minier) :

L'État élabore et met en œuvre des plans de prévention des risques miniers, dans les conditions prévues aux articles 40-1 à 40-7 de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987 relative (...) à la prévention des risques majeurs, relatifs aux plans de prévention des risques naturels prévisibles. Ces plans emportent les mêmes effets que les plans de prévention des risques naturels prévisibles. Toutefois, les dispositions de l'article 13⁴ de la loi n° 95-101 du 2 février 1995 ne leur sont pas applicables.

Le principal objectif des PPRM est d'assurer la sécurité des personnes et des biens en définissant des principes d'utilisation du sol dans les zones soumises à des risques d'origine minière. C'est le **décret n° 2000-547** du 16 juin 2000 qui assure la mise en application des PPRM, en précisant notamment la nature des risques pris en compte.

Les textes sont clairs sur les très fortes similitudes entre PPRN et PPRM, tant en ce qui concerne les principes d'élaboration que les effets. Les objectifs et principes décrits pour les PPR naturels dans le paragraphe précédent demeurent donc pleinement valides dans le cadre des PPRM. C'est, de fait, les principaux textes qui définissent les PPRN (loi de février 1995 et décret d'octobre 1995) qui serviront de base aux PPRM.

Nous nous contenterons donc, dans ce qui suit, de préciser les spécificités fondamentales qui différencient les PPR naturels des PPRM.

La différence majeure porte, évidemment, sur la nature du risque. Le **décret n° 2000-547** du 16 juin 2000, précise à cet effet, dans son article 2, disposition I :

Les risques sont notamment, les suivants : affaissements, effondrements, fontis, inondations, émanations de gaz dangereux, pollutions des sols ou des eaux, émissions de rayonnements ionisants.

On notera que la mention, dans le décret, de l'adverbe « **notamment** » implique que la liste, quoique largement représentative des risques miniers, n'est pas strictement exhaustive.

Toute mine, arrêtée récemment ou abandonnée de très longue date, peut faire l'objet, quelle que soit sa situation administrative (exploitant identifié ou mine orpheline) de la prescription d'un PPRM (disposition III du décret du 16 juin 2000). Le bien fondé d'une telle prescription demeure évidemment conditionné à la justification d'un caractère prioritaire en ce qui concerne la nature du risque, l'ampleur des conséquences prévisibles et la probabilité de sa survenue.

⁴ Cet article concerne les procédures et conditions d'indemnisation des victimes par l'intermédiaire du fonds de prévention des risques naturels.

La disposition IV du décret du 16 juin 2000 précise que le règlement du PPRM s'attache à rappeler les mesures de prévention et de surveillance qui auraient été définies durant la procédure d'arrêt des travaux miniers, conformément aux articles 91 et 93 du Code minier. En revanche, en aucun cas l'élaboration d'un PPRM ne pourra contribuer à imposer à un quelconque exploitant d'autres mesures que celles qui auraient été définies et validées par l'autorité administrative lors de la procédure d'arrêt achevée à la date d'élaboration du plan.

Enfin, la disposition V du même décret élargit sensiblement les règles et servitudes susceptibles de s'imposer aux gestionnaires publics ou privés de réseaux ou infrastructures souterrains susceptibles d'induire des mouvements de sol. Ces règles peuvent aller d'un suivi du comportement des réseaux à un traitement des anciens travaux miniers (remblayage, confortement...), en passant par une surveillance en continu de l'évolution des ouvrages.

2.3. L'ÉLABORATION DES PPRM

2.3.1. Procédure administrative d'élaboration

a) La prescription

La procédure d'élaboration d'un PPRM s'initie par l'arrêté de prescription pris par le préfet (articles 1 et 2 du décret du 5 octobre 1995). Cet arrêté précise le périmètre de l'étude ainsi que la nature des risques pris en compte. Il est souhaitable qu'une analyse préalable à la prescription ait permis d'identifier les contours, même approximatifs, de la zone concernée ainsi que la nature des risques qu'il convient d'intégrer à l'analyse.

On privilégiera, autant que faire se peut, l'application de la démarche d'expertise et de prévention à des unités physiques cohérentes en termes de prédisposition au développement de désordres ou de nuisances. Ces unités physiques, appelées « bassins de risque », sont délimitées par des paramètres naturels (géologie, morphologie, bassins versants...) et d'exploitation (extension des travaux...).

Il n'y a donc pas lieu d'assimiler systématiquement le périmètre de prescription avec le périmètre de concession. Si, dans certaines situations, les deux peuvent coïncider de manière satisfaisante, dans d'autres, seule une petite partie de la concession a fait l'objet de travaux d'extraction et, dans d'autres encore, les perturbations prévisibles dépasseront largement les limites de la concession.

Dans son arrêté de prescription, le préfet désigne également le service déconcentré de l'État qui sera chargé d'instruire le dossier (« service instructeur »).

b) La réalisation

Le service instructeur s'appuie généralement sur un (ou plusieurs) bureau(x) d'études pour l'assister dans tout ou partie des différentes phases de l'élaboration du PPRM.

On notera que, s'il peut déléguer la phase informative et d'évaluation de l'aléa à un organisme spécialisé, par contre la phase réglementaire, qui est menée en concertation avec l'ensemble des partenaires concernés par la démarche, reste pilotée par le service instructeur sous la responsabilité du préfet.

De plus amples informations sur les phases d'élaboration du PPRM et sur les pièces constituant le dossier seront détaillées plus avant dans le rapport.

c) La consultation

L'ensemble des conseils municipaux des communes, sur le territoire desquelles le plan sera applicable, est systématiquement sollicité pour avis (article 7 du décret du 5 octobre 1995). En fonction de la nature des risques étudiés et de l'occupation des terrains en surface, d'autres organismes peuvent également être consultés (DDA, DRAC, Agences de bassins, DDASS...).

Si ces structures ou organismes ne rendent pas d'avis dans un délai de deux mois, ces avis sont réputés favorables. Le projet de plan est également soumis par le préfet à une enquête publique auprès des populations concernées. À l'issue de l'ensemble de ces consultations, le plan peut être éventuellement modifié pour tenir compte des avis ou compléments d'informations recueillis.

d) L'approbation

À l'issue des différentes consultations, le PPRM, éventuellement modifié par les remarques recueillies lors de la phase de consultation, est approuvé par arrêté préfectoral. Après approbation, le PPR, servitude d'utilité publique, doit être annexé au PLU, en application de l'article L. 126-1 du Code de l'urbanisme.

Dans certaines circonstances exceptionnelles et notamment en cas d'urgence liée à la sécurité publique (péril imminent, projets de nature à aggraver sensiblement le niveau de risque), l'article L. 562-2 du Code de l'environnement permet de rendre opposable tout ou partie des dispositions d'un projet de plan qui n'aurait pas encore fait l'objet de l'enquête publique. Cette possibilité renforce notablement l'efficacité de la procédure mais ne s'applique toutefois pas aux mesures destinées au bâti existant.

Une telle procédure peut être mise en œuvre après consultation des maires qui disposent alors d'un délai d'un mois pour présenter leurs observations.

e) Les modifications ou révisions

Les modifications ou révisions d'un PPRM sont réalisées selon la même procédure et dans les mêmes conditions que son élaboration initiale : prescription, élaboration, consultation, approbation (article 8 du décret du 5 octobre 1995).

Toutefois, lorsque le PPRM couvre l'ensemble d'un bassin de risques et que les modifications apportées ne concernent que l'une des communes, l'enquête publique se limite à cette commune, ce qui contribue à simplifier la procédure.

2.3.2. Les pièces constitutives réglementaires

Par comparaison à l'article 3 du décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995 relative aux PPRN, un projet de PPRM doit comporter les éléments suivants :

- une note (ou rapport) de présentation ;
- un (ou plusieurs) document(s) graphique(s) délimitant les zones à risques ;
- un règlement.

D'autres documents, notamment cartographiques, n'ayant pas de valeur réglementaire, peuvent toutefois être joints au dossier lorsqu'ils présentent un intérêt pour la mise en œuvre de la démarche.

a) La note de présentation

La note de présentation doit notamment expliciter les raisons de la prescription du PPRM et préciser le périmètre de l'étude ainsi que la nature des risques retenus pour l'analyse.

Cette note doit également restituer les résultats de la phase de collecte des données disponibles concernant l'ancienne exploitation (historique des travaux, contextes géologiques et hydrogéologiques, méthodes d'exploitation, localisation des vides, anciens désordres...).

La méthode de détermination des aléas et les résultats de son application au site concerné sont présentés de manière aussi didactique que possible pour permettre, autant que faire se peut, à un public non-spécialiste de s'approprier les principes de l'évaluation.

De la même façon, un descriptif des enjeux existants et futurs présents sur le secteur d'étude est à prévoir, tout comme la description des principes sur lesquels s'appuie la définition du zonage réglementaire.

Enfin, il est essentiel d'expliquer et de justifier les choix des mesures réglementaires. En effet, la compréhension par tous de la réglementation mise en place est une des conditions d'efficacité du PPR.

b) Les documents graphiques

En terme strictement réglementaire, les seuls documents cartographiques indispensables sont le(ou les) plan(s) de zonage réglementaire permettant de visualiser les zones de dispositions réglementaires homogènes.

Pour un souci de pédagogie et de transparence vis-à-vis des futurs destinataires du document, il est toutefois souhaitable que d'autres documents cartographiques soient joints au dossier.

On citera par exemple la carte informative qui constitue une base technique importante à l'étude mais également un support de communication et de concertation essentiel à l'attention des élus et de la population, car elle recense notamment les principales données d'exploitation (plans, orifices...), ainsi que l'ensemble des désordres et nuisances ayant, par le passé, affecté le site. De même, la présentation de la cartographie des aléas permet d'expliciter les raisons techniques qui prévalent à l'élaboration du zonage réglementaire.

La constitution et la mise à disposition de ces cartes, ainsi que de la carte des enjeux, permettent d'assurer une cohérence dans la démarche globale d'élaboration du PPRM. On veillera donc à les privilégier.

On veillera également à porter une grande attention à la présentation, à la lisibilité et au caractère synthétique des documents cartographiques pour faciliter, là encore, leur assimilation par la population.

c) Le règlement

Le règlement doit préciser les mesures définies pour s'appliquer à chacun des secteurs du zonage réglementaire. Quelle que soit la forme du document, il se doit d'être clair, concis et organisé de façon à détailler :

- les mesures sur les biens et activités existants ;
- la réglementation relative aux projets nouveaux ;
- les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

Le choix des différentes mesures édictées devra notamment s'appuyer sur leur facilité de mise en œuvre technique, leur coût, leur applicabilité réglementaire au regard des autres codes et, surtout, leur efficacité au regard des objectifs fixés.

2.3.3. Les principales phases de réalisation des PPRM

La réalisation d'un PPRM se décompose classiquement en quatre phases principales qui se concrétisent, chacune, par l'établissement d'un document cartographique :

- la phase informative;
- la phase d'évaluation des aléas ;

- la phase d'appréciation des enjeux ;
- la phase de zonage réglementaire et d'élaboration du règlement.

Les deux dernières phases, à caractère fortement réglementaire, seront détaillées au sein d'un ouvrage spécifique à paraître.

a) La phase informative

La phase informative a pour principal objectif de collecter l'ensemble des informations disponibles (voire d'entreprendre des investigations complémentaires si elles s'avèrent nécessaires). Elle exige une campagne d'investigation sur site (repérage des travaux miniers, recherche d'anciens désordres et d'indices de pollution, enquête auprès des populations...) et une consultation attentive des archives d'exploitation ou de tout document susceptible de fournir des informations utiles à la caractérisation du contexte des ouvrages étudiés (géologie, hydrogéologie, méthodes d'exploitation...). À ce titre, l'une des spécificités des PPRM est de pouvoir s'appuyer sur une source d'information fondamentale, notamment en ce qui concerne les exploitations arrêtées relativement récemment : le dossier d'arrêt des travaux miniers constitué par l'exploitant à l'attention des services de l'État.

Cette phase de l'étude donne naissance à l'établissement d'une carte informative qui a pour principale vocation d'informer et de sensibiliser la population aux risques et nuisances pressentis. Le recensement des pollutions et nuisances ayant affecté le site par le passé permet en effet de justifier le bien fondé de la démarche de prévention entreprise.

b) La phase d'évaluation des aléas

La phase d'évaluation des aléas a pour objectif de localiser et de hiérarchiser en plusieurs niveaux les zones exposées à des phénomènes potentiels, en fonction de leur intensité et de leur probabilité d'occurrence. Cette évaluation n'intègre pas la nature de l'occupation de la surface. Elle transcrit, de manière objective, le potentiel de nuisances que l'ancienne exploitation minière est susceptible d'engendrer, à terme, dans le secteur d'étude.

Cette phase requiert un niveau d'expertise technique élevé. Elle est, de fait, souvent confiée par le service instructeur à un organisme ou un bureau d'étude spécialisé dans le domaine concerné. La méthode d'évaluation adoptée doit être expliquée de manière aussi transparente que possible pour faciliter l'adhésion des futurs utilisateurs.

Cette phase de l'étude donne naissance à l'établissement d'une (ou de plusieurs) carte(s) qui localise(nt) les zones d'aléas identifiées par la démarche d'évaluation. Ces documents conditionnent, dans une large mesure, la définition du zonage réglementaire. Une attention toute particulière doit donc être apportée à leur caractère synthétique et aisément interprétable.

c) La phase d'appréciation des enjeux

La phase d'appréciation des enjeux a pour objectif de recenser l'ensemble des enjeux existants dans les territoires soumis à un ou plusieurs aléas et d'identifier les potentiels projets futurs qui pourraient s'y développer. On s'attachera notamment à reconnaître les populations soumises à un niveau de risque non nul, en recensant en particulier les cibles ou enjeux les plus sensibles, comme les établissements recevant du public, les zones maraîchères et d'élevage. On s'attachera également à identifier les enjeux susceptibles de constituer des facteurs aggravants (réseaux de gaz par exemple).

De par leur connaissance de l'occupation du sol, les services de l'État en charge de l'urbanisme sont souvent les mieux placés pour mener à bien cette démarche. Le recensement des enjeux se manifeste par une carte des enjeux qui, elle aussi, contribuera directement à l'élaboration du zonage réglementaire.

d) La phase de zonage réglementaire

La phase de zonage réglementaire a pour objectif de délimiter des zones homogènes en termes d'interdictions, de prescriptions ou de recommandations vis-à-vis de l'usage du sol et des eaux, tant en ce qui concerne les projets nouveaux que les activités et les biens existants. Les principes de ce zonage s'appuient notamment sur une confrontation entre les différents niveaux d'aléas préalablement identifiés et l'appréciation des enjeux existants et futurs affectant le secteur concerné.

L'identification de ces zones homogènes se traduit par l'élaboration d'une cartographie du zonage réglementaire de PPRM.

Directement relié à ce zonage, un règlement doit être établi. Il a pour objet d'énoncer, de manière claire et opérationnelle, les mesures appropriées qui s'appliquent à chacune des zones réglementaires.

2.3.4. Quelques principes d'élaboration

L'optimisation de l'efficacité de la politique de prévention des risques passe par la définition de priorités dans l'élaboration et le suivi des PPRM. Elle exige également la réalisation de documents simples et opérationnels, destinés à l'usage de la population et des services chargés de leur application. Pour ce faire, la démarche doit être réalisée de manière concertée avec l'ensemble des partenaires impliqués dans la gestion des risques miniers.

a) Définir les priorités

Les ressources disponibles, aussi bien financières qu'humaines (capacité d'expertise et de gestion administrative des dossiers), étant limitées, le nombre de procédures PPRM qui, chaque année, pourront être instruites jusqu'à leur terme, sera probablement restreint. Au vu du nombre très important d'anciens sites miniers

parsemant le territoire national, nul doute qu'il faudra de nombreuses années pour couvrir l'ensemble de ces sites.

Compte tenu de cette contrainte majeure, la définition de priorités s'avère essentielle. Elle permet d'éviter que certains sites sensibles ne soient étudiés et traités que très tardivement, autorisant, de ce fait, le développement d'enjeux et d'usages déjà existants ou l'apparition d'enjeux nouveaux dans des zones non adaptées à cet effet mais qui n'auraient pas encore été diagnostiquées.

La hiérarchisation des sites les plus sensibles, en termes de risque avéré ou potentiel, s'appuiera notamment sur des critères techniques et politiques :

- la connaissance d'importants événements récents ou historiques ayant affecté le site ;
- la conjugaison de paramètres défavorables (nature du matériau extrait présentant des risques d'émission de gaz ou de pollution, autres paramètres...);
- l'existence de forts enjeux en surface ou d'importants projets de développement de l'urbanisme ou d'aménagement.

Cette démarche pourra s'effectuer au travers d'analyses préliminaires sommaires et rapides. Ces analyses, menées par des spécialistes du risque minier, feront l'objet d'une approche globale, à l'échelle d'un bassin de risque.

Elles permettront de définir s'il y a lieu d'engager (et si oui avec quel ordre de priorité) des études plus approfondies de type PPRM sur l'une ou l'autre des exploitations présentes dans ces bassins de risques.

b) Des études principalement qualitatives

L'esprit des PPR, naturels ou miniers, est d'afficher, en l'état des connaissances et selon avis d'expert, les risques ou nuisances susceptibles de persister dans le long terme et pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes ou des biens ainsi qu'à l'usage du sol.

Sauf exception, le principe d'évaluation des aléas repose donc principalement sur des études qualitatives s'appuyant sur les données disponibles que l'on s'attachera à collecter sur le terrain ou dans les différents fonds d'archives consultables.

Ce parti pris a pour objectif de privilégier des études peu onéreuses et relativement rapides afin de couvrir, dans des délais raisonnables, la majorité des anciens sites miniers les plus préoccupants en termes de sécurité publique. Dans la grande majorité des cas, l'évaluation s'appuiera donc sur une approche « naturaliste » mettant à profit l'expertise de l'homme de l'art, plus que sur des modélisations numériques lourdes et complexes.

Il résulte inévitablement de ce choix une marge d'incertitude, parfois importante, dans les résultats énoncés. Cette marge d'incertitude peut parfois être réduite, voire levée, par la réalisation d'analyses, de prélèvements ou de modélisations complémentaires. La mise en œuvre de telles mesures devra toutefois être étudiée au cas par cas, en

fonction de la complexité des phénomènes étudiés, de l'importance des enjeux existants ou futurs caractérisant le site (investigations complémentaires légitimes dans des zones à forts enjeux, inutiles dans des zones non occupées et interdites à construction), ainsi que du temps nécessaire à la réalisation de ces recherches complémentaires.

On gardera également à l'esprit que, si le PPRM s'appuie sur les connaissances en l'état et n'a pas pour ambition de systématiser des mesures d'investigation lourdes, il a en revanche pour objectif de préciser, aux futurs aménageurs, la nature et les principes de mise en œuvre des investigations qu'il conviendra d'entreprendre pour connaître précisément la nature et l'ampleur du risque en un point considéré.

L'outil contribue ainsi pleinement à la politique de prévention des risques en permettant d'enrichir progressivement la connaissance des secteurs considérés comme « douteux ».

c) Une démarche à mener en concertation avec les principaux partenaires

Le PPR, qui se veut simple et opérationnel, constitue l'outil privilégié pour mettre en œuvre, à l'échelle locale, des actions de prévention des risques. Il contribue à réglementer le cadre de vie des habitants et intervient dans des domaines de compétence communale (urbanisme, sécurité publique). Son élaboration exige donc, autant que faire se peut, l'association de toutes les compétences disponibles : administratives, techniques et politiques.

La mise en commun de compétences concerne l'ensemble des services de l'Etat impliqués dans l'évaluation de l'aléa minier et la définition de mesures réglementaires ayant trait à l'utilisation du sol ou des ressources (eau notamment). La mise en place de comités de pilotage regroupant ces compétences et réunis autour du service instructeur désigné par le préfet est, de fait, fortement encouragée.

La concertation concerne également les autorités locales, de manière à faciliter la compréhension, l'appropriation et la participation des collectivités à la politique de prévention des risques. La collaboration des représentants locaux doit être initiée dès la prescription pour expliquer les raisons et le bien fondé de la démarche entreprise. Durant la phase de réalisation du PPRM, le comité de pilotage veillera à soumettre les différentes cartes techniques à l'avis des élus, de manière à recueillir leurs observations et à valoriser la connaissance qu'eux-mêmes et leurs administrés ont du contexte local.

La présence des élus est également essentielle lors de la phase d'élaboration du zonage réglementaire et du règlement, puisque c'est principalement eux qui auront la charge de l'appliquer et de l'expliquer auprès de la population. Dans la mesure du possible, le consensus sur les mesures à prendre est ainsi systématiquement recherché même si la priorité principale du PPRM reste, sans aucune ambiguïté possible, la prévention des risques et la mise en sécurité des personnes et des biens.

3. Phénomènes et mécanismes initiateurs de pollutions d'origine minière sur les eaux et les sols

Rappel : les phénomènes et mécanismes initiateurs de désordres d'origines minières liés aux mouvements de terrains, inondations et d'émissions de gaz de mines sont traités dans le document INERIS DRS-06-51198/R01 daté du 04 mai 2006.

3.1. ORIGINE DES PHÉNOMÈNES REDOUTÉS

L'exploitation minière a consisté à extraire par mines souterraines et à ciel ouvert de grandes quantités de matériaux du sous-sol dans le but de pouvoir, après des traitements plus ou moins poussés, en commercialiser une partie sous forme de minerai valorisable. Ces excavations ont modifié de manière irréversible le sous-sol où se trouvait le minerai. Leurs évolutions à long terme doivent être analysées avec soin car elles peuvent générer des contaminations des eaux et des sols. Parallèlement, l'exploitation s'est accompagnée de l'édification d'installations de traitement du minerai et d'ouvrages de dépôts de stériles et de résidus de traitement susceptibles de générer des pollutions, selon leur évolution dans le temps et en fonction de nombreux paramètres internes ou externes.

3.1.1. Origine

Pour le domaine minier, les nuisances environnementales trouvent leur origine à la fois dans des facteurs naturels (géologiques, gîtologiques, minéralogiques, géochimiques ou biogéochimiques) et des facteurs anthropiques liés à l'exploitation ou au traitement des minerais. Ce sont ces dernières activités qui induisent des perturbations dans le milieu naturel. En effet, qu'il s'agisse du milieu naturel modifié par les travaux d'extraction ou du stockage d'importantes quantités de déchets solides, les conséquences des pratiques d'exploitation conduisent le plus souvent à des instabilités physiques et chimiques durables dans le temps. Celles-ci, à leur tour, peuvent exercer des dégradations sur les ressources naturelles (les eaux de surface et souterraines les sols, et sédiments...), sur la biodiversité, provoquer la modification ou la dégradation d'écosystèmes et avoir des impacts, au final, sur des activités agricoles (cultures, élevages) et même sur la santé humaine.

L'une des causes fondamentales des pollutions et nuisances, après exploitation minière, est l'interaction entre les travaux miniers et les flux hydrauliques, avec des contaminations des sols, des eaux de surface et souterraines.

Pendant la phase d'exploitation, les pompages d'exhaure permettent d'éviter l'ennoyage des travaux miniers. Les impacts ont alors soit un caractère hydrodynamique avec rabattement des nappes, modification des débits des cours

d'eau (augmentation ou diminution), soit un caractère hydrochimique avec modification de la qualité des eaux qui sont le plus souvent (ou devraient être) traitées au cours de l'exploitation avant d'être rejetées dans le milieu naturel.

À l'issue de l'extraction, certains impacts hydrodynamiques⁵ peuvent subsister, mais ce sont surtout les désordres à caractère hydrochimique, liés à l'apparition artificielle de conditions de surface (air, eaux météoriques), qui se développent. À ces pollutions, peuvent se superposer les phénomènes générés par la forte turbidité des eaux en phase d'exploitation susceptibles de provoquer une contamination des sédiments après la fermeture de l'exploitation.

Dans l'évaluation des pollutions provoquées par les exploitations minières, subsiste une difficulté importante liée à l'existence de ce qui est appelé le fond géochimique naturel (FGN) auquel se superposent le plus souvent les nuisances d'origine anthropique créant ce que l'on appelle le **bruit de fond géochimique**⁶. Pour apprécier la différence entre contamination d'origine naturelle et pollution ayant pour origine les travaux miniers, on pourra avoir recours aux données disponibles sur les mesures réalisées à l'occasion des prospections ou des travaux de recherche.

À titre d'illustration, on trouvera en annexe 1, pour chaque région française, les caractéristiques de l'activité minière dominante ainsi que la nature des espèces minéralogiques et des éléments chimiques pouvant être associés.

3.1.2. Les contaminants et leurs actions

Les principaux contaminants mis en jeu sont des substances chimiques inorganiques (métaux lourds, sulfates...) ou organiques (hydrocarbures, composés phénoliques, phtalates et autres produits organiques industriels...), à l'exclusion de tout contaminant biologique.

Dans le cas de contaminants présentant également des propriétés radioactives, deux sources principales de nuisances sont à prendre en compte : d'une part, l'interaction entre les travaux miniers et les flux hydrauliques qui, comme dans le cas des autres polluants concourt à un transfert de la pollution et d'autre part, les émissions de rayonnements ionisants à partir du site lui-même, essentiellement dues à l'activité d'extraction qui conduit à la remontée et au stockage en surface de matériaux (minerai) et de résidus émettant naturellement des radioéléments.

Les pollutions d'origine minière qui agissent sur les eaux (contamination chimique et/ou radiologique par les substances dissoutes, présence de matières en suspension) et sur les sols/sédiments (contamination chimique et/ou radiologique par exemple par des retombées de poussières ou par épandage) peuvent avoir pour conséquences :

_

⁵ Traités plus haut dans les chapitres consacrés à l'aléa « inondation ».

⁶ Concentration représentative ambiante en un élément, en un composé ou en une substance dans un milieu donné. Elle tient compte des concentrations naturelles (fond géochimique naturel) et de celles provenant éventuellement de sources anthropiques autres que celles du site étudié.

- de détériorer de façon significative la qualité des ressources en eaux (de surface ou souterraines), des sédiments et des sols ;
- d'exercer un impact sur les écosystèmes, c'est-à-dire sur la flore, la faune, la chaîne alimentaire et en conséquence sur la santé humaine.

Un risque pour la santé ou pour les écosystèmes apparaît lorsque trois facteurs complémentaires, à savoir la présence d'une « source de pollution» dangereuse, d'un mode de « transfert » (vecteur) et de « cible ou milieu d'exposition » (enjeu) vulnérable ou sensible se trouvent réunis. Ce concept est semblable à ce qui est utilisé dans les méthodes classiques d'évaluation des risques environnementaux.

Ce type d'analyse passe par l'établissement d'un schéma conceptuel dont l'objectif est, à partir de l'ensemble des connaissances acquises sur le site et de la dynamique des transferts qui pilotent l'extension des pollutions depuis les sources, d'approcher au mieux les impacts prévisionnels et de préciser les relations entre sources, transfert et enjeux à protéger.

3.1.3. Les sources

On retiendra parmi les sources⁷ de pollutions résumées dans la Figure 1 :

- les travaux et ouvrages d'exploitation, de reconnaissance, d'accès aux gisements à partir de la surface et en souterrain;
- les résidus miniers, constitués de tous produits ou dépôts résultant de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai (voir encadré ci-dessous, cf. Directive Européenne 2006/21/CE du 15 mars 2006 sur la gestion des déchets de l'Industrie extractive);
- d'autres types de sources de contamination comme les stockages d'hydrocarbures (carburants, lubrifiants, fluides de maintenance), les explosifs, de nombreux réactifs (réactifs de flottation ou de lixiviation et de précipitation des éléments dissous) ou encore produits d'affinage et de purification;
- les anciennes exhaures et les émergences (exutoires naturels) qui, après exploitation, peuvent être considérées comme sources secondaires, puisque leur contamination résulte du passage des eaux profondes dans les travaux miniers dans certaines conditions. Ces eaux sont le siège de phénomène d'oxydation et de dissolution des minéraux, mais elles constituent également le vecteur des contaminants vers la surface et les eaux de nappes souterraines;
- les sols du milieu environnant et les sédiments des cours d'eau, après exploitation, peuvent être également considérés comme sources secondaires de pollution s'ils ont été contaminés par des eaux chargées en radioéléments ou en éléments métalliques par exemple.

_

⁷ Terme générique désignant une entité (spatialement délimité, foyer) ou un ensemble d'entités dont les caractéristiques ou les effets permettent de les considérer comme à l'origine de nuisances ou de dangers (extrait lexique sols pollués).

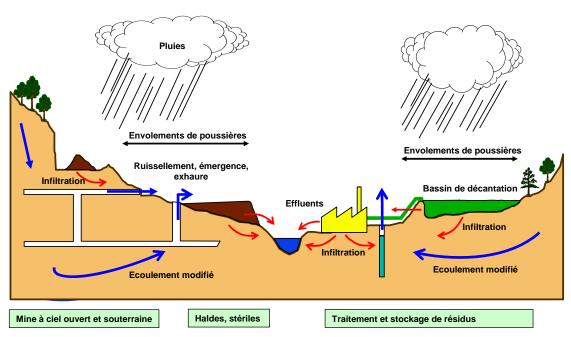


Figure 1 - Schéma montrant les différentes sources de pollution et les voies de transfert des polluants métalliques dans le contexte minier.

Chaque source est caractérisée par les propriétés chimiques des substances qu'elle libère, leur quantité, leur mobilité et leur état physique.

Dans le cas des contaminations radiologiques, chaque source est caractérisée également par le rayonnement qu'elle émet et/ou par sa teneur en radioéléments.

NB : Terminologie des déchets miniers

Concernant les déchets miniers, on s'appuiera sur les définitions données par la directive européenne sur la gestion des déchets de l'industrie extractive qui distingue :

- *les résidus* : déchets solides ou boueux subsistant après le traitement des minéraux par divers procédés ;
- *les stériles et morts-terrains* : roches déplacées pour atteindre le gisement de minerai ou de minéraux, y compris au stade de la pré-production ;
- la couche arable : couche supérieure du sol.

La directive européenne concerne les déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales. Elle vise à prévoir des mesures, des procédures et des orientations destinées à prévenir ou à réduire les effets néfastes résultant de la gestion des déchets de l'industrie extractive sur l'environnement, en particulier l'eau, l'air, le sol, la faune et la flore, les paysages, les risques pour la santé humaine. Elle s'applique à la gestion des déchets provenant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage des ressources minérales. Elle cherche à prévenir la détérioration de la qualité de l'eau et la pollution de l'air et du sol, notamment par une évaluation des risques environnementaux provenant des

déchets. Elle fournit, dans son annexe II, des recommandations pour la caractérisation des déchets, pour s'assurer de leur stabilité physique et chimique à long terme dans l'installation de traitement. Des informations provenant de la mise en œuvre de cette directive pourront donc être utilisées lors de la réalisation d'un PPRM.

La directive européenne 2006/21/CE du 15 mars 2006 relative à la « gestion des déchets de l'industrie extractive » donne les définitions suivantes :

- **Déchet** (directive 75/442/CEE relative aux déchets) : « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou a l'obligation de se défaire en vertu des dispositions nationales en vigueur » ;
- **Résidus** : « déchets solides ou boueux subsistant après le traitement des minéraux par procédés de séparation (par exemple, concassage, broyage, criblage, flottation et autres techniques physicochimiques) destinés à extraire les minéraux de valeur de la roche ».

D'une façon plus générique, on peut classer les déchets miniers en plusieurs groupes.

Les stériles francs de découverture et/ou de traçage de galerie. Ce sont les sols et morts-terrains qui recouvraient le minerai et sont décapés lors de l'exploitation (mine à ciel ouvert) ou les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies dans le cas d'une mine souterraine.

Les stériles de sélectivité. Ce sont les matériaux issus de l'exploitation sur lesquels le mineur opère un tri précoce entre minerai vendable et minerai pauvre non vendable. Ce dernier est alors stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal sont plus favorables.

Les résidus de lixiviation⁸ ("spent ore") sont formés, parfois sur une surface de plusieurs hectares, par des tas de minerais broyés ou concassés dont on a extrait les métaux par lixiviation.

- Les résidus de traitement. La valorisation du minerai vendable par pré-concentration du ou des minéraux économiques laisse, outre le concentré « vendable », des matériaux appauvris sur les sites miniers. On peut distinguer, parmi ces matériaux :
- les résidus issus de traitements physiques pouvant être constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent resédimentés dans des bassins de décantation retenus par des digues à résidus ("tailing dams") ou déposés en terril sur de grandes surfaces avec un potentiel contaminant notable (drainage minier acide) sur de longues durées;
- les résidus issus de **traitements chimiques.** Les boues issues d'une laverie conventionnelle contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires (pyrite [FeS2], arsénopyrite [FeAsS], etc.) et leurs produits d'oxydation (sulfates, oxyhydroxydes, etc.). Ils peuvent contenir également des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs (ex. : phosocrésols, xanthates, cyanures, mercure, etc.) ;
- les résidus de pyrométallurgie. Dans bon nombre d'exploitations anciennes polymétalliques (fer, cuivre, étain, plomb/zinc, or...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place. On peut alors retrouver, sur certains de ces sites anciens, des tas de scories. Des suies provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées.

3.1.4. Description sommaire des mécanismes de transfert des pollutions d'origine minière dans l'environnement

Dans le domaine minier, ce sont tout d'abord les eaux de surface et les eaux souterraines qui agissent par ravinement, dissolution ou échanges chimiques, etc. L'air, pouvant véhiculer des poussières ou des hydrocarbures volatils en phase

⁸ Lixiviation, dissolution et entraînement de substances d'un solide complexe sous l'action d'un solvant.

gazeuse ou du radon (gaz radioactif), est également considéré comme un vecteur. L'homme, au cours de manipulations, de déversements ou de mises en dépôt de déchets, peut agir lui-même comme un vecteur.

Les transferts dépendent :

- du potentiel de mobilisation du polluant de la source vers le milieu de transfert qui est fonction des précipitations annuelles, du potentiel d'inondation, du confinement de la source, etc.;
- du potentiel de transfert vers les populations et/ou milieux à protéger qui est fonction de la proximité de la nappe, de la perméabilité de la zone non saturée, de la perméabilité de l'aquifère, etc.

À partir d'un milieu (ou compartiment), le polluant peut être transporté vers un autre milieu, être transformé ou s'accumuler (précipitation ou adsorption, bioconcentration...). La pollution, se propageant selon des mécanismes différents, peut contaminer plusieurs lieux ou compartiments environnementaux avec lesquels les populations et/ou milieux à protéger sont susceptibles d'être en contact.

Les transferts potentiels de polluants chimiques, à partir d'une source puis dans les différents compartiments de l'environnement, sont liés aux propriétés intrinsèques des polluants (solubilité, densité, stabilité, polarité, volatilité, etc.), ainsi qu'aux propriétés du sol et du sous-sol contrôlant leur migration. Il peut s'agir de propriétés hydrauliques (porosité, perméabilité du milieu, etc.), physico-chimiques (minéralogie, teneur en eau, etc.) et biologiques (microflore, aptitude à la dégradation).

On distingue, dans le domaine minier, les pollutions de types minérales, qui sont très souvent des pollutions métalliques et les pollutions organiques. Leur comportement dans l'environnement diffère selon les propriétés intrinsèques des polluants correspondants.

a) Cas des pollutions métalliques

Les principaux mécanismes physico-chimiques qui interviennent sur la migration dans l'environnement des polluants minéraux sont les suivants : dissolution- précipitation, oxydo-réduction, complexation, réaction acido-basique, adsorption. Ces mécanismes dépendent essentiellement de la solubilité des différentes phases minérales. Ils régissent les transferts entre les polluants en phase solide (fragment de déchet, particule de sol, sédiment) et les polluants en phase liquide (eau d'exhaure, émergence minière, eau de ruissellement, etc.).

L'adsorption est un phénomène particulier de réaction de surface qui gouverne, en partie, le comportement des métaux dans le domaine naturel et qui correspond à la rétention d'éléments chimiques ou de molécules présents dans l'eau sur la surface d'une substance solide. Ce phénomène peut se produire en particulier sur les oxyhydroxydes de fer et les particules argileuses d'un sol qui sont mises en contact avec des eaux contaminées, via l'irrigation par exemple.

Le **drainage minier** (voir encadré ci-dessous) est un ensemble de processus importants et spécifiques pour le domaine minier. Il est initiateur de relargage dans l'environnement d'eaux acides et/ou contenant ou non des métaux lourds. Si ces drainages sont usuellement nommés « **drainage minier acide** » **ou** « **DMA** », en raison de l'importance des dissolutions entraînées par une eau acide, de nombreuses émergences neutres contiennent de grandes quantités de métaux ou de métalloïdes, tels que arsenic, zinc ou manganèse.

Le drainage minier acide (DMA)

Le phénomène est décrit comme un processus d'acidification des eaux de drainage dans l'environnement minier, résultant de l'oxydation de minéraux sulfurés sous l'effet des agents atmosphériques. Lorsque les eaux de drainage, acides et chargées de métaux en solution et de matière en suspension, sont libérées dans les cours d'eau naturels, en aval des sites miniers, elles sont susceptibles de causer des torts irrémédiables à la faune et à la flore aquatiques.

Le processus de production d'acide est d'abord un processus chimique, impliquant trois éléments essentiels : des minéraux sulfurés réactifs, de l'eau (terrestre ou atmosphérique) et de l'oxygène, provenant généralement de l'atmosphère. L'oxydation des sulfures de fer, tels la pyrite et la pyrrhotite, en présence d'eau, constitue, généralement, la réaction de départ du processus, entraînant la mise en solution de fer ferreux (Fe^{2+}), de sulfate et d'ions H_3O^+ . Graduellement, avec l'acidification progressive du milieu (ions H_3O^+) et la transformation du fer ferreux en fer ferrique (Fe^{3+}), capables d'oxyder directement les sulfures, un processus cyclique et rapide peut s'installer et produire de grandes quantités d'acide. La production nette d'acide dépendra, néanmoins, de la présence dans le milieu de minéraux neutralisants, tels les carbonates, capables de consommer l'acide produit.

L'activité bactérienne jouera également un rôle important dans le processus de production d'acide, car, dans certaines conditions, des bactéries ferro-oxydantes peuvent intensifier l'oxydation du fer et ainsi favoriser la production d'acide. Globalement, le mécanisme de production d'acide se présente comme un processus complexe et évolutif, résultant de l'interaction de nombreux facteurs et paramètres physiques, chimiques et biologiques. Les métaux lourds et autres éléments sont facilement mobilisés par le drainage acide et transportés dans les cours d'eau naturels. On notera la différence de mobilité des différents métaux en fonction du pH.

En pratique, sur les sites miniers actifs ou abandonnés, la production de DMA (drainage minier acide) est le plus souvent associée à l'émergence des eaux ayant circulé dans les galeries ainsi qu'au lessivage des stériles et des résidus miniers. Le phénomène s'amorce dés le début des travaux, mettant en contact les sulfures avec des eaux météoriques riches en oxygène et se poursuit après l'arrêt des travaux jusqu'à l'épuisement du stock de sulfures ce qui peut s'étendre sur une durée d'une décennie à plusieurs siècles en se localisant dans la zone de battement de la nappe.

b) Cas des pollutions organiques

Elles ne constituent pas une problématique majeure dans le domaine minier sauf dans quelques cas spécifiques où les hydrocarbures ont été exploités. On peut toutefois noter que les impacts potentiels d'une **pollution organique**, par des hydrocarbures ou des substances utilisées dans les usines de concentration ou stockées dans les zones d'exploitation, sont liés aux propriétés intrinsèques des polluants qui sont différentes de celles des polluants métalliques. Les substances organiques diffèrent par leur capacité à se volatiliser, par leur densité (hydrocarbures légers ou lourds), leur viscosité, leur polarité, leur hydrophobie, ou leur capacité à la biodégradation.

Ces propriétés mènent à des processus particuliers de migration dans l'environnement : migration en phase dissoute ou migration multi-phasique, dont les

phases peuvent plonger ou surnager dans les aquifères, migration dans la zone nonsaturée si les produits sont volatils, etc.

c) Notions de biodisponibilité et de bioaccessibilité

La contamination des sols et des eaux par les éléments en traces est un problème environnemental majeur pour deux raisons principales. D'une part, elle présente un risque écotoxicologique pour les chaînes alimentaires en raison des propriétés toxiques de certains de ces éléments pour des organismes vivants, y compris l'homme. D'autre part, cette contamination peut avoir des effets à très long terme, évoluer dans le temps ou s'étendre sur les terrains/milieux voisins.

La biodisponibilité peut être définie comme l'accessibilité aux organismes vivants (végétaux ou animaux) de ces éléments ainsi que l'évolution dans le temps de leurs propriétés physiques et chimiques.

La phytodisponibilité représente la quantité d'un élément trace métallique (ETM) qui peut être transférée dans une plante durant son développement. Ce transfert dépend de paramètres liés au sol (pH, matière organique, capacité d'échange...), de facteurs propres à la plante (capacité d'absorption et de translocation, phase de développement...) et de paramètres environnementaux (pluviométrie, ensoleillement, température...).

La plupart des éléments en traces, potentiellement toxiques, présentent une forte interaction avec le sol qui contrôle ainsi en grande partie le transfert des éléments en traces vers les végétaux.

En plus de cette notion, certaines études s'intéressent à la mesure de la bioaccessibilité qui est un paramètre qui permet d'approcher, de façon simplifiée, la biodisponibilité (cf. annexe 2).

En évaluation des risques sanitaires, on considère usuellement que la totalité de la concentration d'une substance présente dans un sol aura un effet toxique sur l'organisme humain lorsqu'elle est ingérée. Or, certaines études, qui visent à évaluer la fraction réelle d'une substance absorbée par un organisme, montrent que cette hypothèse est conservatoire dans la mesure où seule une fraction de la substance pénètre à l'intérieur de l'organisme.

Afin d'augmenter la pertinence des évaluations de risque, il a semblé utile d'introduire la notion de biodisponibilité des polluants pour l'homme (pour la voie orale, c'est-à-dire pour l'ingestion de terre).

Les définitions de la biodisponibilité et de la bioaccessibilité, les méthodes de mesures et leur utilisation en évaluation du risque sanitaire sont résumées en annexe 2.

Application au cas des mines

La caractérisation de la biodisponibilité des éléments traces dans les sols fait l'objet des travaux d'organismes de recherches français (INRA, ADEME...) et étrangers.

Une base de données sur les teneurs en éléments traces métalliques (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Ti, Zn), de plantes potagères dans un contexte de site et sol pollué dénommé BAPPET a été développée par l'ADEME, avec de nombreux partenaires. Elle permet une évaluation des expositions de l'homme aux polluants par la consommation de plantes potagères, ce qui peut s'avérer pertinent pour certains sites miniers où des cultures maraichères sont présentes ou peuvent se développer.

3.1.5. Les populations, usages des sites et des milieux, les ressources et les milieux naturels à protéger (enjeux)

Sur un même site minier, différents types enjeux (population et/ou milieux à protéger) peuvent être définis, chacun étant en contact avec des milieux différents.

Les milieux à protéger sont plus généralement les écosystèmes terrestres et aquatiques (biotopes et organismes vivants). Les populations peuvent entrer en contact avec différents milieux d'exposition. Ceux à prendre en compte sont principalement : les eaux des rivières, les eaux des puits, les poissons, les animaux d'élevage, les sols, les fruits et légumes, l'air extérieur avec les poussières.

On notera que, très souvent, les notions de séquence et d'enchaînement de phénomènes, notamment au niveau des transferts, apparaissent dans le domaine de l'environnement minier. Par exemple, un dépôt de résidus considéré comme une source peut être traversé par des eaux superficielles venant contaminer une nappe souterraine. Celle-ci peut, à son tour, marquer chimiquement une émergence et enfin contaminer les sédiments d'un ruisseau dans lequel elle se déverse.

Dans le cas des contaminants possédant des propriétés radioactives, les transferts de radioéléments d'un milieu à un autre sont gouvernés par les mêmes paramètres environnementaux et les mêmes lois que celles s'appliquant aux polluants présentant uniquement une toxicité chimique.

En revanche, l'exposition aux rayonnements ionisants correspond à une interaction directe entre la source (que celle-ci soit éloignée ou à proximité) et la population et/ou les milieux à protéger.

3.2. NATURE ET IDENTIFICATION DES PHÉNOMÈNES REDOUTÉS

Dans le cadre de l'évaluation des aléas environnementaux d'un site minier, les phénomènes redoutés sont de deux types :

- la dégradation des milieux naturels (eaux, air, sol) et leurs conséquences sur leurs usages (mortalité de la végétation, contamination des végétaux et/ou des animaux) ;

- les conséquences pour l'homme et sa santé, à plus ou moins long terme, directement ou indirectement (par ingestion d'eau, de sol ou de végétaux contaminés par exemple).

Ces phénomènes redoutés peuvent être générés par différents équipements ou ouvrages, liés à l'activité minière, présents sur le site.

3.2.1. Typologie des pollutions minières

On distingue en règle générale trois grands types de pollution qui correspondent à des configurations spécifiques :

- les pollutions diffuses, concernant d'importantes surfaces. Elles proviennent essentiellement d'épandages de produits liquides ou solides et sont également associées aux retombées atmosphériques (envol de poussières à partir de terrils par exemple);
- les pollutions ponctuelles qui ne concernent que des superficies limitées. On distingue plusieurs cas en fonction de la fréquence d'apparition :
 - · les **pollutions locales accidentelles** qui proviennent d'un déversement ponctuel dans le temps de substances polluantes. Elles engendrent, en règle générale, une dégradation brutale du milieu sur une surface limitée pouvant évoluer de façon catastrophique sans intervention efficace (mine d'or de Baia Mare en Roumanie et pollution du bassin du Danube),
 - les pollutions locales chroniques, correspondant à des apports de substances sur de longues périodes, qui ont souvent pour origine des eaux d'émergences contaminées, des lixiviats et infiltrations issus de dépôts de résidus ou encore des fuites sur des conduites ou sur des bassins de stockage non parfaitement étanches;
- les **pollutions à sources multiples et ponctuelles** qui peuvent correspondre à des problématiques complexes.

Ces notions sont importantes à considérer car le problème de la concordance entre l'extension physique des pollutions et les limites administratives prescrites se pose lors de l'analyse des phénomènes sur le site. Pour les phénomènes de pollution des eaux de surface notamment, il se peut que l'extension d'une pollution ne soit limitée ni à la concession minière, ni à la commune, d'où une difficulté parfois importante en terme de prescription du périmètre du PPRM.

3.2.2. Types d'ouvrages concernés

Les phénomènes de pollution redoutés sont définis par l'apparition de contaminations des milieux naturels. Ils concernent, dans le cadre d'une démarche de type PPRM, les eaux souterraines, les eaux de surface, les sédiments⁹ et les sols.

La délimitation de la zone d'étude intègre la prise en compte de l'ensemble des surfaces affectées par des phénomènes de pollutions anthropiques d'origine minière. Les phénomènes se superposent au fond géochimique naturel qui est la concentration en un élément, en un composé ou en une substance dans un milieu donné en l'absence de tout apport extérieur spécifique telle que l'activité humaine (cf. page 15).

Lors des études de pollution des eaux et des sols, comme cela a été indiqué précédemment, ce sont les teneurs mesurées qui seront prises en compte, sans distinction, le plus souvent, entre les origines naturelles ou anthropiques.

Les phénomènes retenus ici sont ceux qui prennent leur origine sur des sites soumis à l'application du Code minier. Cependant, dans un souci de cohérence, lorsque des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) exploitées ou ayant été exploitées par l'entreprise minière sont incluses dans le périmètre minier ou dans le périmètre du PPRM défini par la préfecture, les évaluations portent sur l'ensemble du site sans distinction dans l'affectation réglementaire des installations.

Il est donc nécessaire de prendre en compte les différents types d'ouvrages présents sur un site minier (travaux souterrains, travaux à ciel ouvert, ouvrages de dépôt et installations de traitement) en précisant leurs spécificités et les pollutions qu'ils sont susceptibles de générer à court, moyen et long terme et l'ampleur prévisible de cette pollution.

a) Cas des travaux souterrains

Une grande partie des anciennes exploitations minières françaises a été effectuée par des travaux souterrains (puits galeries, chambres d'exploitation...). Une grande diversité de méthodes d'exploitation (abattage, transport et extraction des minerais et stériles, remblayage...) a été utilisée selon la nature du gisement (filon, amas...), l'évolution des techniques mais aussi l'évolution des cours des matières premières. Du point de vue de l'apparition de pollution, on peut considérer que des impacts sur les eaux de surface et souterraines sont à redouter, ainsi que des contaminations des sols et des sédiments.

⁹ Dans le cas des processus d'origine minière, on considérera qu'il s'agit des matériaux provenant de n'importe quelle source, transportés par l'eau depuis le lieu d'origine jusqu'au lieu de dépôt et qui résultent de la sédimentation d'une suspension ou d'un charriage.

b) Cas des travaux à ciel ouvert

Lorsque la profondeur du gisement et les conditions technico-économiques le permettaient, l'exploitation du minerai s'est effectuée par mine à ciel ouvert. Ces travaux ont généré des fosses de dimensions très variables et des dépôts de roches considérées comme stériles en surface et issues des travaux de découvertures.

Selon leur importance, les fosses ont pu être remblayées par des matériaux plus ou moins inertes, souvent issus des formations de découverture. La qualité de ces matériaux peut avoir une incidence sur la contamination des eaux et des sols.

La nature, dure ou tendre, (résistance mécanique, cohésions, teneur en eau...) du massif rocheux encaissant jouera également un rôle important dans la dispersion de poussières dans l'air, sur les sols, dans les rivières et plans d'eau (ou de particules dans les rivières lors des opérations d'excavation ou de remblayage). Dans certains cas, les eaux souterraines sont drainées naturellement dans la fosse (Figure 2), ce qui augmente leur vulnérabilité à la pollution.



Figure 2 - Mine à ciel ouvert réhabilitée drainant les eaux de surface et souterraines.

c) Cas des ouvrages de dépôts et des installations de traitement

L'exploitation des mines et le traitement des minerais ont souvent entrainé la constitution de dépôts de résidus miniers à proximité des sites d'extraction. En restant cohérent avec la directive européenne sur la gestion des déchets de l'industrie

extractive (voir § 3.1.3.), on distingue généralement deux grands types de déchets en fonction de leur nature et de leur condition de mise en dépôt :

- les stériles d'exploitation: les dépôts de ces stériles sont appelés terrils, haldes ou verses suivant le type de matière première considéré, la forme du dépôt et la terminologie régionale. Ils sont constitués de matériaux pouvant contenir des métaux en faibles quantités non exploitables dans les conditions techniques et économiques existantes lors de la mise en dépôt;
- les résidus de traitement ou tailings : ces résidus sont constitués d'un mélange de matières fines solides et d'eau, le plus souvent issues d'un traitement physique du minerai (concassage, broyage, séparation gravimétrique ou par flottation, mais aussi de traitement chimique, lixiviation...). Ils se présentent sous la forme d'une pulpe provenant des lignes de traitement. Ils contiennent donc des éléments métalliques non récupérés ou non récupérables par les procédés utilisés, ainsi que des teneurs résiduelles en réactifs utilisés lors des traitements du minerai. Ils sont stockés en vrac (Figure 3) ou dans des bassins de rétention dont la localisation et la constitution sont variables d'un site à l'autre.



Figure 3 - Tailings (résidus de traitement) déposés en tas et repris par l'érosion.

	Impact sur les		Contamination des		Production de	
	eaux souterraines	eaux de surface	sédiments	sols	poussières	gaz
Ouvrage souterrain						
Exploitation souterraine						
Exploitation saline par cavités de dissolution						
Ouvrage minier débouchant au jour (puits, galeries, fendues)						
Ouvrage à ciel ouvert						
Zone d'affleurement (anciens grattages)						
Fosse						
Ouvrage de dépôt et installations de traitement du	minerai		•			
Terril, verse, bassin de décantation / rétention de matériaux fins avec ou sans digue						
Zone de traitement par voie physique (concassage, broyage, ,)						
Zone de traitement par voie chimique (lixiviation, cyanuration,)						
secteurs de dépôts de produits chimiques ou d'hydrocarbures						

Tableau 1 - Relation entre types de contaminations et ouvrages miniers.

Pour l'ensemble de ces ouvrages, les pollutions redoutées sont attendues aux niveaux des eaux de surface et souterraines, des sols et des sédiments.

Le Tableau 1 synthétise l'ensemble des impacts et contaminations susceptibles d'apparaître sur un site minier en fonction des types d'ouvrages et d'installations.

3.2.3. Conditions d'apparition des phénomènes redoutés (processus)

Les tableaux ci-dessous (Tableau 2, Tableau 3, Tableau 4) reprennent l'ensemble des processus qui, en fonction des différentes sources et des différents vecteurs identifiés dans le domaine minier, peuvent provoquer des impacts environnementaux sur les milieux (pollution des sols et des eaux) et, par conséquent, des risques pour l'homme ou les écosystèmes.

Ils mettent en évidence les processus physiques et chimiques (lessivage, entraînement, etc.) qui découlent de la mise en contact de chaque source (travaux miniers, stockage de résidus, stockages autres) avec chaque vecteur (circulation souterraine, circulation de surface, circulation aérienne et mobilisation anthropique), ainsi que leurs conséquences en terme d'impact, c'est-à-dire de contamination d'un milieu pour chacun des quatre milieux évoqués (eaux souterraines, eaux de surface, sédiments et sols).

Dans ces tableaux, on distingue les impacts primaires issus d'une interaction directe entre la source et le vecteur désigné des impacts secondaires qui découlent des premiers.

Les flèches indiquent la migration des contaminations chimiques et/ou radiologiques entre les différents milieux et permettent ainsi de matérialiser une dynamique de contamination.

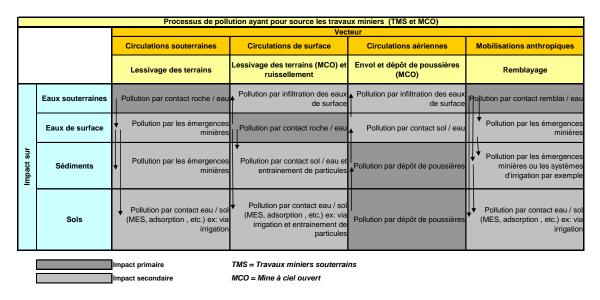


Tableau 2 - Processus de pollution ayant pour source les travaux miniers.

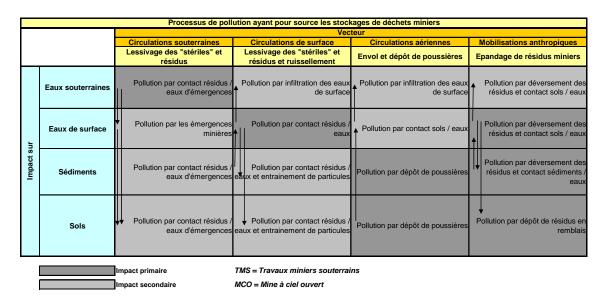


Tableau 3 - Processus de pollution ayant pour source les stockages de déchets miniers.

	Processus de pollution ayant pour source les stockages d'hydrocarbures et de produits chimiques					
Circulations souterraines		Vecteur Circulations de surface Circulations aériennes		Mobilisations anthropiques		
Entra		Entrainement des produits	Entrainement des produits	Envol et dépôt de produits	Déversement de produits	
	Eaux souterraines	Pollution par déversements et contact sols / eaux		Pollution par infiltration des eaux de surface		
sur	Eaux de surface	Pollution par les émergences minières				
Impact su	Sédiments	▼ Pollution par les émergences et les déversements	Pollution par fuites, déversements et entrainement de produits		·	
	Sols	Pollution par fuites et déversements		Pollution par fuites et dépôt de produits		
	Impact primaire TMS = Travaux miniers souterrains Impact secondaire MCO = Mine à ciel ouvert					

Tableau 4 - Processus de pollution ayant pour source les stockages d'hydrocarbures et produits chimiques (hors ICPE).

Il ressort de l'analyse des relations entre les milieux (notamment entre les milieux sources, de transfert et les cibles) que la typologie la plus adaptée pour évaluer les impacts sur l'environnement est fondée sur celle du milieu impacté.

Mais il faut noter que ces processus de pollution sont également conditionnés par les caractéristiques climatiques: vent (vitesse, fréquence, direction), précipitations (intensité, quantité) et topographiques (pente) du site minier. L'expert chargé de l'évaluation de l'aléa doit donc acquérir ces informations lors de la caractérisation du site (phase informative) et les prendre en compte pour l'évaluation des aléas.

On retiendra ainsi deux types de phénomènes de pollution :

- la pollution des eaux souterraines et/ou des eaux de surface ;
- la pollution des sédiments et des sols.

3.2.4. Scénario de pollution

a) Caractères généraux

Parmi les différentes situations qui sont prises en compte pour évaluer les prédispositions d'un site à générer une pollution, on distingue :

- d'une part, les cas où les phénomènes de pollution sont en cours, déjà engagés et ceux où ils peuvent éventuellement se produire ;

- d'autre part, les cas où les phénomènes sont chroniques et ceux où ils sont accidentels. Dans les cas de phénomènes chroniques, il faut, par ailleurs, identifier ceux qui sont stabilisés et ceux qui peuvent évoluer.

Le caractère accidentel de certains phénomènes et les conséquences qui en découlent sont notamment liés à l'existence d'ouvrages de protection ou de rétention (digues, bassins) mis en place au moment de l'exploitation. Leur dimensionnement et les pratiques d'utilisation, conformes aux règles de l'art, assurent aujourd'hui un comportement satisfaisant au regard de la réglementation en vigueur et des contraintes imposées lors des procédures d'arrêt définitif de travaux. À l'avenir, cependant, des actions extérieures, d'origines accidentelles (naturelles ou anthropiques) ou des comportements imprévisibles, peuvent générer des pollutions importantes à l'aval de ces sites (rupture de digues, inondations accidentelles...) par dégradation ou destruction de ces ouvrages.

Dans ce cas, la source de pollution peut être aisément caractérisée, les concentrations, les extensions peuvent être également appréhendées à partir de scénarios d'accidents. La prédisposition de déclenchement d'un tel phénomène accidentel demeure, en revanche, très délicate à identifier et reste à l'appréciation du spécialiste.

Dans le cas d'une **pollution chronique**, un point délicat est l'évaluation des phénomènes cumulatifs, comme l'accumulation de sédiments pollués dans une rivière ou le dépôt de poussières contaminées autour d'un site; en effet il n'est pas toujours facile d'évaluer la vitesse du phénomène et l'ampleur qu'il pourra prendre. Il faut également évaluer si le phénomène concerné est stable dans le temps et dans l'espace ou s'il risque d'évoluer.

À partir des tableaux 1, 2 et 3, il est possible d'identifier les principaux processus pouvant générer une pollution des sols, des eaux et des sédiments, puis d'évaluer pour chacun d'eux le caractère accidentel et chronique et sa probabilité d'occurrence.

b) Pollution des eaux souterraines et de surface

L'analyse de ces milieux de contamination peut, suivant les contextes et les choix de l'expert, donner lieu à une évaluation et une cartographie spécifique. Les spécificités propres à ces deux milieux seront distinguées lorsqu'elles peuvent être identifiées.

• Définitions et effets

Les activités minières peuvent être à l'origine de la pollution des eaux, qu'il s'agisse des nappes d'eau souterraines ou qu'il s'agisse des cours d'eau superficiels. Cette pollution se traduit par la présence dans les eaux à des concentrations anormales de substances chimiques et/ou radiologiques indésirables, se présentant sous des formes essentiellement dissoutes ou particulaires (matières en suspension dans les eaux).

Les aquifères concernés par ce type de phénomènes peuvent être des aquifères miniers développés dans les anciens travaux. Il peut s'agir également d'aquifères

naturels qui ne sont pas concernés par les exploitations souterraines, mais qui peuvent se trouver contaminés par des infiltrations d'eaux de surface polluées. Il peut s'agir également de nappes superficielles développées dans des stockages de résidus miniers (sables, boues) de grande ampleur.

Les eaux superficielles sont :

- les cours d'eau, qu'ils soient naturels et qu'ils interfèrent avec les installations minières ou qu'ils aient pour origine les anciennes exhaures devenues émergences naturelles après l'arrêt des opérations de pompage;
- les bassins et plans d'eau créés lors de l'exploitation : digue à stériles, bassins de décantation...;
- les eaux de ruissellement et les effluents (lixiviats) issues des ouvrages miniers.

La présence d'éléments ou de substances potentiellement dangereuses, à des concentrations parfois élevées, peut provoquer un risque réel ou potentiel pour la santé humaine et peut être à l'origine de la détérioration des ressources biologiques ou des écosystèmes (via l'irrigation par exemple).

Les voies d'exposition potentielles des cibles humaines aux contaminations chimiques des eaux souterraines et superficielles sont les suivantes :

- ingestion d'eau directe (eau de boisson, douche, loisirs aquatiques) ;
- ingestion de produits végétaux arrosés par des eaux contaminées ;
- ingestion de produits d'origine animale, issus d'animaux abreuvés par des eaux contaminées :
- contact cutané avec des eaux contaminées (douche);
- ingestion de poissons pêchés dans les eaux contaminées.

La minéralisation des eaux souterraines et de surface peut également être à l'origine de la contamination des milieux de surface et des milieux souterrains, en cas de contact entre ces différents milieux.

Scénarios de contamination

Les eaux souterraines peuvent être contaminées dans différentes situations :

Lessivage des travaux miniers. Pendant l'exhaure, mais surtout pendant et après la remontée des eaux dans les travaux miniers, les parois rocheuses minéralisées sont lessivées par les eaux d'infiltration qui se chargent en éléments devenus solubles en présence d'un milieu oxygéné (voir encadré drainage minier acide). Il en résulte une concentration dans les eaux souterraines, à des teneurs parfois très élevées, de métaux et de sulfates. Le phénomène peut être amplifié dans le cas du stockage de déchets miniers en remblai dans les anciennes galeries d'exploitation. Les déchets utilisés en souterrains comme matériaux de remblayage subissent, de même que les cavités, un drainage minier acide, puis un lessivage lors de la remontée des eaux

dans le réseau souterrain. Ce phénomène persiste tant que le matériau reste dans la zone non saturée ou de battement de la nappe.

- Lessivage de déchets miniers stockés en surface. Dans un stockage de déchets miniers de type résidus de traitement, s'il est de taille suffisamment importante, il est courant qu'une nappe s'y développe et que le stockage se comporte comme un aquifère poreux perméable. Un front d'oxydation en surface peut alors se développer et provoquer un phénomène de drainage minier acide au sein d'une couche superficielle de déchets dont l'épaisseur va en augmentant, au fur et à mesure de l'oxydation des résidus. Les eaux d'infiltration deviennent alors très acides et se chargent en éléments métalliques dissous (Figure 4), ainsi qu'en matières en suspension (MES). Le réseau de drainage du stockage contribue à l'évacuation de ces eaux vers le milieu extérieur et peut provoquer une pollution des eaux de surface. Ce phénomène est susceptible de se produire, pour tous types de dépôt de déchets, s'il présente une perméabilité de nature à favoriser les circulations d'eaux d'infiltration. Dès que l'oxygène ne peut plus pénétrer, on passe en milieu réducteur et le phénomène de DMA n'existe plus.
- Déversements d'hydrocarbures et autres produits chimiques. La contamination d'une nappe souterraine peut également être provoquée par un déversement (par exemple dans un puits) ou par une fuite, à partir d'un stockage d'hydrocarbures ou de produits chimiques divers en phase liquide.
- Infiltration d'eaux de ruissellement. Toute eau ayant ruisselé sur des matériaux aptes à libérer des éléments polluants subissant ou non un Drainage Minier Acide (déchets miniers, parois rocheuses d'une MCO, sol contaminé par des poussières ou des substances organiques, etc.) peut provoquer, en s'infiltrant, la contamination des eaux souterraines sous-jacentes.



Figure 4 - Petit drainage minier acide à la base d'un tas de résidus de traitement.

Pour les eaux de surface, on retiendra les scénarios suivants :

- les émergences minières peuvent constituer l'une des sources principales de contamination des milieux aquatiques de surface. Les eaux souterraines ayant circulé dans les réseaux miniers peuvent être très concentrées (au moins temporairement) en éléments indésirables ou toxiques¹⁰, de type métaux et sulfates ou acides (Figure 5). Par ailleurs, ces eaux peuvent provoquer un impact important sur les milieux superficiels, du fait qu'elles constituent parfois, notamment pendant les périodes d'étiage, une part importante du débit des cours d'eau;
- le déversement direct d'hydrocarbures ou de produits chimiques dans un cours d'eau est un scénario de contamination primaire ;
- le *ruissellement d'eaux de surface* sur des terrains contenant des polluants (contact sol/eau) peut provoquer leur enrichissement en éléments indésirables ou toxiques. Ces terrains peuvent être des sols riches en déchets miniers, en produits chimiques, en poussières et en minerai mis à nu en carrière, etc.;
- la surverse de bassins de décantation ou de digues à stériles, dont les eaux rejoignent les milieux aquatiques.



Figure 5 - Émergence minière à la sortie d'une ancienne galerie obstruée.

-

Dans le domaine des normes de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, la distinction est faite entre substances indésirables (fer, manganèse, cuivre, zinc, fluor, bore et baryum) et substances toxiques (arsenic, cadmium, cyanure, chrome, plomb, mercure, sélénium), ceci pour les paramètres pouvant dépendre de l'activité minière.

c) Pollution des sédiments et des sols

Dans ce chapitre, également par souci d'homogénéité, sont réunis les phénomènes ayant trait aux sédiments et aux sols qui constituent deux milieux solides. L'analyse de ces deux types de pollutions peut, suivant les contextes et les choix de l'expert, donner lieu à une évaluation et une cartographie spécifique. Les spécificités propres à ces deux milieux sont cependant distinguées lorsqu'elles peuvent être identifiées.

Rappelons qu'une des spécificités des sédiments par rapport aux sols est qu'ils sont fortement mobilisables dès que le régime hydraulique est modifié. Ainsi, les sédiments se déplacent et se redéposent avec des phénomènes de reconcentration ou de dillution en fonction du régime hydraulique. Les dépôts peuvent s'effectuer très loin du lieu d'origine.

Il faut par ailleurs noter qu'il existe souvent des liens entre la pollution des eaux de surface et celle des sédiments et des sols.

Définition et effets

Les différentes activités exercées sur un site minier avant, pendant, voire après l'exploitation, peuvent être à l'origine de la pollution des sédiments et des sols. Elle se traduit par la présence, à des concentrations anormales (différentes de celles naturellement présentes), en surface ou dans les premiers mètres de sol, d'éléments indésirables ou toxiques et se présentant sous forme de particules solides (déchets de type résidus d'extraction ou résidus de traitement de minerais, sédiments, particules argileuses présentant des métaux adsorbés, etc.) ou sous forme de liquides (hydrocarbures en imprégnation dans les sols).

Ces concentrations en éléments ou substances potentiellement dangereuses peuvent provoquer un risque réel ou potentiel pour la santé humaine et peuvent être à l'origine de dégradations des ressources biologiques, des écosystèmes ou des biens matériels (notamment des matériaux de constructions).

Les voies d'exposition potentielles des cibles humaines aux contaminations des sédiments et des sols sont les suivantes :

- ingestion directe accidentelle de sol;
- ingestion de produits végétaux cultivés sur sols contaminés ;
- ingestion de produits d'origine animale, issus d'animaux ayant ingéré des particules de sol contaminé ou des produits végétaux croissant sur sol contaminé ;
- inhalation de poussières contaminées ;
- contact cutané avec des sols contaminés.

Scénarios de contamination

Un sol ou des sédiments peuvent être contaminés via différents scénarios :

- Contamination par des polluants issus de déchets miniers via les circulations d'eaux. La contamination d'un sol ou d'un sédiment peut être provoquée par un dépôt de résidus miniers dans l'environnement, sans confinement. Du fait de l'humidité du milieu et du contact avec l'atmosphère provoquant des conditions oxydantes, les déchets peuvent s'oxyder et subir un Drainage Minier Acide. Ces sols peuvent relarguer ultérieurement les polluants dans l'environnement, en particulier dans les eaux de ruissellement et les eaux d'infiltration qui lessivent le sol ou les sédiments contaminés.
- Des déchets miniers peuvent également avoir été déposés sur un sol ou avoir contaminé les sédiments d'un cours d'eau à la suite d'un événement accidentel de type rupture de digue et épandage de sables présentant des teneurs en métaux non négligeables pour l'environnement, dans la vallée sous-jacente. Dans un même ordre d'idée, l'utilisation de déchets miniers ou de sédiments contaminés en remblai de chemin ou de voie ferrée, par exemple, entre dans ce scénario de contamination.
- Dépôt de poussières par voie éolienne. L'envol de poussières, à partir d'un dépôt de résidus miniers ou du minerai mis à nu dans une mine à ciel ouvert, leur dépôt et leur accumulation sur des sols, peut être à l'origine de leur contamination. Un phénomène limité de drainage minier acide peut éventuellement être envisagé dans cette situation.
- Déversements fuites à partir de stockages d'hydrocarbures ou de produits chimiques. Des stockages d'hydrocarbures ou d'autres produits chimiques utilisés pour le traitement de minerai, peuvent être à l'origine de la pollution d'un sol, par imprégnation, à la suite de fuites à partir des lieux de stockage ou de déversements dans l'environnement (Figure 6). Selon les propriétés intrinsèques des produits, ces derniers pourront éventuellement migrer dans l'environnement, vers les compartiments « eaux de surface » ou « eaux souterraines ».
- Concentration par contact avec eaux contaminées (irrigation par ex.). La contamination d'un sol peut également résulter du ruissellement des eaux contaminées sur le terrain. Ce processus peut aboutir à la concentration de métaux dans un sol, par exemple à la suite de l'irrigation régulière d'une parcelle agricole par des eaux très minéralisées. Ces eaux peuvent être des eaux captées dans un aquifère minier ou dans un cours d'eau, pollué lui-même par des résurgences minières. Les métaux ou les radioéléments dissous ou les matières en suspension présentes dans les eaux peuvent, à la suite de différents phénomènes physicochimiques, aboutir à l'adsorption d'ions sur des particules (argiles, hydroxydes de fer) de la terre, ainsi qu'à l'accumulation de matières solides sur le sol. Les précipitations chimiques de type oxyhydroxyde de fer, qui sont des pièges à polluants, peuvent aussi conduire à la pollution du sol. Dans certains cas, les solides contaminés peuvent ultérieurement subir un drainage minier acide et contaminer les milieux aqueux ou les sédiments.



Figure 6 - Dépôt de vieux fûts de produits chimiques au niveau d'une usine de traitement du minerai.

4. Identification, caractérisation et cartographie des aléas environnementaux

4.1. GÉNÉRALITÉS SUR L'ALÉA

4.1.1. Préambule

Dans la démarche d'évaluation des aléas, il convient de prendre en compte les phénomènes constatés et ceux non encore observés. Par souci d'homogénéité, le même vocabulaire est appliqué aux différents types de phénomènes étudiés. Il convient néanmoins de rappeler certaines différences fondamentales entre les phénomènes « mouvement de terrain » et ceux de « pollution ».

Concernant les mouvements de terrain, les désordres, c'est-à-dire les mouvements ayant eu lieu, renseignent sur la capacité des terrains à présenter ce type de phénomène en un point distant similaire, mais suppriment ou réduisent fortement la probabilité de les voir se reproduire à l'endroit impacté. Si un fontis s'est créé, la probabilité de le voir se reformer au même endroit est nulle ou faible mais cela signifie qu'il existe une forte probabilité que des fontis se créent ailleurs dans une configuration identique (zone homogène).

Dans le domaine environnemental, le constat d'une pollution ne réduit en rien la possibilité de voir cette pollution disparaître (dans le cas de disparition de la source et de phénomène d'atténuation naturelle), mais aussi de s'intensifier et de se complexifier à l'endroit du constat, par exemple dans le cas d'événements modifiant les caractéristiques de la source et des voies de transfert. Ainsi, en liaison avec la mobilité des éléments chimiques, l'évolution dans le temps et dans l'espace des pollutions constatées doit être systématiquement considérée dans le cas de l'évaluation de l'aléa environnement.

4.1.2. Définition de l'aléa

L'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

Dans une optique de prévention des risques et d'aménagement du territoire telle que retenue dans le cadre de l'élaboration d'un PPRM, la période de référence pour identifier le niveau d'aléa est généralement le long terme, de l'ordre du siècle. Il est ainsi nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des caractéristiques des matériaux ou des déchets ainsi que la propagation, dans l'espace, des fluides (eau ou gaz) soumis aux lois d'écoulement qui les caractérisent.

L'intensité du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cette notion intègre à la fois une notion de hiérarchisation des grandeurs caractérisant les conséquences des événements redoutés (taille et profondeur d'un cratère, hauteur de tranche d'eau, nature et teneur d'une émission de gaz ou de substances toxiques...), mais également leur potentiel de gravité sur les personnes, les biens, l'usage du sol et des eaux susceptible de caractériser potentiellement le site à terme (possibilité de faire des victimes ou des dégâts, existence et/ou coût de parades de prévention...).

La notion de **probabilité d'occurrence**, qui traduit pour sa part la sensibilité que présente un site à être affecté par l'un ou l'autre des phénomènes analysés, est généralement moins aisée à appréhender et à quantifier que celle d'intensité. Quelle que soit la nature des événements redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère très partiel des informations disponibles et le fait que de nombreux désordres, séquelles ou nuisances ne soient pas répétitifs, expliquent qu'il est généralement impossible de raisonner sur la base de probabilités quantitatives (x % de risque de développement d'un désordre). On privilégiera donc une classification qualitative caractérisant une **prédisposition** du site à subir tel ou tel type de désordres ou nuisances. C'est donc cette notion de **prédisposition** (au détriment de la probabilité d'occurrence) qui sera retenue dans la suite du document. L'évaluation de cette prédisposition dépend de la combinaison d'un certain nombre de facteurs favorables ou défavorables à l'initiation et au développement des mécanismes pressentis.

4.1.3. Principes de qualification de l'aléa

a) Classes d'intensité

L'intensité du phénomène caractérise l'ampleur des répercussions attendues en cas de déclenchement d'un événement redouté. De manière à hiérarchiser les pollutions ou nuisances potentielles en cas de survenue du désordre, il est d'usage de définir plusieurs classes d'intensité (par exemple limitée, modérée et élevée), dont on s'attachera à définir le nombre et le contenu en fonction de la nature des mécanismes et phénomènes attendus sur le site.

La démarche d'évaluation de l'intensité des phénomènes consiste tout d'abord à identifier la ou les grandeurs physiques les plus représentatives, pour permettre de caractériser les conséquences des événements redoutés. On pourra ainsi choisir de s'intéresser à des critères portant sur la nature, la teneur et le débit d'éventuelles émanations gazeuses ou sur le flux et la composition des rejets potentiellement toxiques dans l'environnement, etc.

Ensuite, l'expert évalue, en intégrant l'ensemble des informations collectées, la valeur prévisible de cette grandeur pour le site concerné, afin de définir à quelle classe d'intensité ce phénomène redouté correspond. Pour ce faire, il faut donc avoir, préalablement, défini les classes d'intensité retenues et, de fait, les valeurs seuils ou les critères adaptés au site concerné permettant de différencier ces classes entre elles.

Cette étape exige de se rapporter à la notion de « gravité » des phénomènes redoutés, à l'ampleur des séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté et d'affecté la santé et les écosystèmes.

Dans ce type de démarche, c'est la notion de dangerosité du phénomène redouté qui l'emporte. On s'appuie donc principalement sur les notions de cinétique (caractère dynamique et brutal d'un effondrement, dangerosité d'une vague d'eau déferlante) et de flux ainsi que des compositions (mélange explosible de gaz, rejets potentiellement toxiques pour la sécurité publique ou l'environnement).

Le nombre de classes d'intensité retenues pour l'analyse peut varier en fonction du contexte de l'étude et notamment de la précision et de l'exhaustivité des données d'entrée. Lorsque les circonstances le permettent, on se gardera de dégrader l'information disponible en réduisant au minimum le nombre de classes retenues.

Pour limiter les confusions entre les classes d'intensité, de prédisposition et d'aléa, on veillera à adopter une terminologie spécifique à chaque concept. Nous suggérons l'emploi des termes « limitée, modérée et élevée » pour définir l'intensité d'un phénomène.

b) Classes de prédisposition

Du fait du manque quasi systématique ou de la grande complexité des informations disponibles (composition minéralogique et comportement mécanique des terrains, hétérogénéité du milieu), on raisonne en terme de prédisposition (ou sensibilité) d'un site à être affecté par l'un ou l'autre des phénomènes redoutés.

• Prédisposition d'un site à l'apparition de désordres ou nuisances

La prédisposition d'un site, à l'apparition de désordres ou nuisances, est évaluée en fonction de paramètres caractérisant l'environnement du secteur considéré et ses caractéristiques physico-chimiques, ces facteurs exprimant la « sensibilité » d'un site.

La détermination de la prédisposition s'appuie, en premier lieu, sur le retour d'expérience, à savoir l'existence sur le site ou sur un site voisin similaire, de désordres ou nuisances du même ordre. Si certains de ces désordres ou nuisances peuvent être identifiés sur site, il convient également de tenir compte des évènements passés, désormais non observables, mais dont on aura retrouvé trace au travers d'archives ou de témoignages (pollutions...).

En complément de cette analyse de retour d'expérience, la détermination de la prédisposition repose également sur l'analyse des scénarios et mécanismes d'apparition des phénomènes susceptibles d'affecter la qualité des sols et des eaux de surface. La conjugaison de paramètres favorables à cette survenue contribuera naturellement à surclasser la classe de prédisposition.

Cette identification des classes de prédisposition est une démarche délicate qui relève en pratique de l'expertise du spécialiste dans le domaine concerné par l'étude (hydrogéologie, géochimie, environnement). Elle doit être décrite et explicitée avec la plus grande attention, de manière à rendre la démarche aussi transparente que possible vis-à-vis des différents partenaires impliqués à un moment ou un autre dans la procédure d'évaluation des aléas. À ce titre, le choix de paramètres, aisément justifiables et quantifiables, doit être privilégié autant que faire se peut.

• Prise en compte de l'insuffisance des informations disponibles

On ne dispose pas systématiquement, notamment lorsque les études portent sur de très anciennes exploitations, de l'ensemble des informations requises pour mener à bien une analyse précise et exhaustive de l'aléa. Il n'est en effet pas rare de ne pas connaître avec certitude l'existence et/ou la localisation des anciens tailings, stockages de minerais souvent pauvres et de déblais ou de ne pas disposer des données indispensables à la détermination de l'extension précise des désordres ou nuisances possibles. On est alors régulièrement amené à gérer le manque d'information disponible par des mesures de terrain complémentaires, si les moyens budgétaires le permettent ou par la notion de « présomption ».

Autant il n'irait pas dans le sens de la sécurité de s'en tenir aux seules données prouvées, autant il serait déraisonnable d'accorder la même susceptibilité aux zones pour lesquelles on suspecte seulement que puisse se développer le phénomène redouté qu'aux zones pour lesquelles le risque est avéré. Il est, de fait, recommandé de « pondérer » la prédisposition du site à l'apparition de désordres par cette notion de présomption intégrant les doutes résultant des lacunes d'informations.

• Qualification de la prédisposition d'un site

La combinaison, lorsque nécessaire, des deux concepts précédents aboutit à qualifier la sensibilité d'un site à voir se développer tel ou tel type de manifestation et permettre ainsi d'identifier les secteurs les plus sensibles au développement de nuisances et de pollution.

Notons que la démarche doit être mise en œuvre pour chaque type de phénomène qui se voit attribuer une sensibilité spécifique (en un point donné, les probabilités de voir se développer un effondrement généralisé, un affaissement progressif, une inondation par remontée de nappe ou une pollution n'ont aucune raison d'être identiques).

Pour limiter les confusions entre les classes d'intensité, de prédisposition et d'aléa, nous suggérons l'emploi des termes suivants pour définir la prédisposition d'un site à la contamination : peu sensible, sensible, très sensible.

c) Qualification des classes d'aléa

La qualification de l'aléa a pour objectif de hiérarchiser les niveaux d'aléa. Les termes « aléa fort » ou « aléa très fort » signifient que les zones concernées sont plus prédisposées à l'apparition de manifestations importantes que les zones « d'aléa moyen » ou « aléa faible ».

L'aléa résulte du croisement d'une intensité avec la prédisposition correspondante. Le principe de qualification de l'aléa consiste donc à combiner les critères permettant de caractériser l'intensité d'un phénomène redouté avec les critères permettant de caractériser sa classe de prédisposition.

Plusieurs principes, explicites ou implicites, permettent de combiner entre elles des valeurs qualitatives ou de croiser des critères qualitatifs et quantitatifs. On citera pour mémoire les techniques par cotation, par surclassement, par hiérarchisation multicritères, etc.

Si c'est le principe des tableaux croisés qui est retenu, on utilise une matrice de synthèse dont les principes de constitution sont illustrés dans le tableau suivant (Tableau 5), en précisant bien, une fois encore, que chaque site peut donner lieu à des ajustements pour s'adapter au contexte spécifique qui le caractérise¹¹.

Pour ne pas compliquer inutilement les analyses et leur valorisation en vue du zonage réglementaire, on se limitera, autant que faire se peut, à trois classes d'aléas : faible, moyen et fort.

Aléa pollution des eaux souterraines				
		Prédisposition - conditions d'apparitions		
		Peu sensible	Sensible	Très sensible
	Limitée	Aléa faible		
Intensité	Modérée		Aléa moyen	
	Elevée			Aléa fort

Tableau 5 - Définition des trois niveaux d'aléa en fonction de l'intensité et de la prédisposition.

Il est souhaitable de privilégier une démarche visant à faciliter une homogénéisation des classes d'aléa à l'échelle du territoire national et ce quelle que soit la nature des désordres pressentis. Les différentes valeurs guides qui seront proposées dans la suite de l'ouvrage, bien qu'elles ne soient fournies qu'à titre indicatif, ont pour objectif d'y contribuer.

Il n'en demeure pas moins que les classifications proposées dans l'évaluation des aléas restent souvent **relatives**.

Afin de conserver l'ensemble des informations disponibles et des analyses mises en œuvre, l'expert en charge de la réalisation des aléas environnement peut toutefois envisager d'établir des cartes d'intensité ou de prédisposition indépendantes. Ces documents optionnels ne seront pas joints au dossier officiel, mais resteront à la disposition du service instructeur. Ces cartes ne se limitent pas, pour leur part, à un nombre de classe limité, comme c'est recommandé pour l'aléa.

4.1.4. Cartographie de l'aléa

a) Principes cartographiques

L'aléa dépend de l'emplacement géographique des objets miniers considérés. Il a donc vocation à être cartographié sur l'ensemble du secteur concerné par l'évaluation des aléas de manière à faire ressortir les secteurs les plus sensibles au développement de désordres ou nuisances.

L'échelle de cartographie constitue souvent un problème délicat. Si les principes généraux des PPR poussent à envisager une cartographie à petite échelle (1/25 000), les attentes et demandes des communes vont plutôt vers une cartographie à plus grande échelle, plus aisée à retranscrire à l'échelle cadastrale. Le retour d'expérience tend à montrer que l'échelle du 1/10 000 est souvent suffisante pour la qualification de l'aléa. Le recours à du 1/5 000 peut également être envisagé, principalement dans des cas d'exploitations de petites dimensions. Suivant l'extension de la zone d'étude, la restitution pourra être envisagée sous forme « papier » ou « informatique ».

Les contours du zonage de l'aléa doivent s'appuyer sur le contexte « naturel » (géologie, morphologie...) et sur l'existence d'ouvrages liés directement ou indirectement à l'activité minière (puits, galerie, usine, dépôt...).

Il faut privilégier l'établissement d'une seule carte d'aléa, mais dans le cas de phénomènes très différents et ayant des effets différents et complexes plusieurs cartes peuvent être réalisées. S'il n'existe pas de codes normalisés pour la couleur des différentes classes d'aléas définies, on veillera à éviter les codes de couleur pouvant porter à confusion avec ceux classiquement utilisés pour le zonage réglementaire.

b) Extension des effets en surface

La cartographie de l'aléa englobe l'ensemble des terrains de surface concernés par les effets possibles des phénomènes résultant des activités minières.

Il est ainsi nécessaire de prendre en compte l'extension latérale possible des pollutions ou nuisances initiées par l'utilisation, le stockage et déversements de produits polluants ou contaminés et se développant en surface ou dans les eaux souterraines. L'expérience montre en effet que les migrations de flux polluants ne se limitent pas à l'aplomb strict des secteurs anciennement exploités mais peuvent déborder, parfois très largement, sur des terrains, non directement concernés par l'exploitation.

c) Marges d'incertitudes accompagnant la cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa doit intégrer les incertitudes inhérentes aux informations disponibles et aux résultats des estimations et modélisations qui sont nécessaires à l'évaluation de l'aire d'influence des aléas.

Ainsi, en ce qui concerne les aléas « mouvements de terrain » ou « émission de gaz de mine », la cartographie doit tenir compte du fait qu'il est parfois nécessaire de recaler, sur un fond topographique moderne, les surfaces actualisées concernées par les travaux miniers, sur lesquelles l'aléa mouvement de terrain s'exprimera. Ce recalage peut mettre en évidence des incertitudes particulièrement importantes si les archives sont anciennes, d'origine variée ou même contradictoire.

En ce qui concerne les aléas « inondations » et « impacts environnementaux », les surfaces cartographiées (extension de zones inondables ou polluées, profondeurs de nappe...) seront le plus souvent le résultat d'estimations relevant d'un calcul basé sur des hypothèses ou le résultat d'un avis d'expert. Il est généralement très difficile d'assortir une modélisation d'un calcul d'incertitude chiffré. Une méthode possible courante pour représenter l'incertitude consiste à effectuer deux calculs, l'un avec des hypothèses « les plus probables », l'autre avec des hypothèses « raisonnablement pénalisantes ».

Les incertitudes devront être présentées et expliquées dans la note de présentation.

4.1.5. Collecte des informations : la phase informative de l'étude

a) Principes et objectifs de la phase informative

L'élaboration et la restitution de la phase informative d'un Plan de Prévention des Risques constituent l'assise et la garantie de succès de la démarche d'analyse de l'aléa et de prévention des risques. Seule une connaissance aussi détaillée que possible du site et de son histoire permet en effet une précision satisfaisante dans la démarche d'analyse des aléas. Une telle démarche contribue également à asseoir fortement la crédibilité de l'expert et de son jugement vis-à-vis des populations locales.

Au cours de cette phase, on s'attachera à chercher les documents et informations nécessaires à la description et l'analyse des phénomènes redoutés présentés au § 3.2.3.

La phase informative de l'évaluation de l'aléa et sa restitution cartographique, sous forme de carte informative, doivent avoir pour principales vocations :

- de justifier la démarche de prévention entreprise en recensant notamment toutes les sources de pollution ou nuisances actuelles ou anciennes ayant été identifiées sur le périmètre d'étude. Ceci est particulièrement vrai lorsque la totalité (ou quasi-totalité) de ces désordres est ancienne et oubliée de la population locale;
- de rechercher, trier, ordonner et synthétiser l'ensemble des informations qui s'avèreront utiles à la démarche d'identification et de hiérarchisation des aléas.

La carte informative constitue, avant tout, un outil de communication. Il est donc essentiel d'insister sur l'importance de son caractère synthétique. L'objectif n'est, en aucun cas, de constituer des cartes « fourre-tout », en se contentant de reporter sur un fond cartographique l'ensemble des données récoltées sans que ces dernières aient

été préalablement évaluées et critiquées et sans que leur importance, pour la démarche d'identification et d'affichage des risques, ait été clairement identifiée.

La carte informative, qu'il est souhaitable de présenter aux principaux partenaires au cours de la démarche d'évaluation des aléas, doit permettre de faire clairement ressortir les éléments essentiels connus (désordres ou nuisances passés ou présents, données géologiques, plans d'exploitation, ouvrages débouchant au jour, émergences, AEP, station de surveillance de la qualité des eaux...) ou inconnus/douteux (plans d'exploitation manquants, indices douteux en surface...) qui serviront de données d'entrée à la méthode d'identification des aléas.

b) Collecte des informations

• Sources d'informations présentes dans les archives écrites

La première et principale source d'informations à valoriser pour l'évaluation des aléas est, sans nul doute, quand il existe, le dossier d'arrêt des travaux miniers (DADT) que l'exploitant a déposé auprès de l'administration pour obtenir l'autorisation officielle d'arrêt de son exploitation. Les dossiers les plus récents contiennent généralement la grande majorité des informations indispensables à l'identification et la hiérarchisation des aléas, bien que les objectifs des deux démarches ne soient en rien identiques. On constate que généralement les DADT contiennent peu ou pas d'informations sur les sols, mais surtout de grandes quantités de données sur les eaux de surface et parfois souterraines. Néanmoins, les données sont souvent limitées aux éléments exploités et au site industriel lui-même, sans considération de son environnement.

Pour les exploitations orphelines où les dossiers d'arrêt de travaux ou d'abandon anciens sont parfois peu détaillés, des recherches permettant de retrouver tout ou partie des informations essentielles doivent en revanche être entreprises. Des compléments aux dossiers d'arrêt récents peuvent également parfois s'avérer nécessaires.

L'évaluation des aléas concerne fréquemment des exploitations anciennes à très anciennes, parfois totalement oubliées, dont l'exploitant peut avoir disparu et à propos desquelles les données sont très parcellaires et difficiles à collecter. Aucune source d'information ne doit alors être négligée même si, au regard de notre expérience, certaines d'entre elles s'avèrent suffisamment stratégiques pour être analysés en priorité (DRIRE, Archives départementales ou nationales, Banques de données du Sous-sol BRGM, cartes géologiques, publications spécialisées).

C'est évidemment le cas des archives des Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement qui possèdent, quasi-systématiquement, des dossiers, même minimaux, sur les anciens sites d'extraction répertoriés dans la région. Dans bon nombre de cas, c'est toutefois au sein des Archives départementales et, plus rarement, des archives communales que les informations les plus complètes et les plus essentielles sont retrouvées.

La consultation de monographies anciennes, d'ouvrages ou de publications spécialisés, de thèses ou de banques de données peut également fournir des renseignements précis importants tout comme les archives de la presse locale.

Dans les archives ou dans la documentation disponible, le recueil des éléments suivants est utile :

- les données relatives à l'historique de l'activité minière en phase d'exploitation, en particulier ce qui concerne le gisement, les méthodes d'exploitation, les volumes extraits en fonction du temps, les volumes remblayés et la nature des remblais, le dispositif d'exhaure, les débits pompés;
- les données relatives au traitement effectué sur le site, les méthodes, les types et emplacements de stockage (en tenant compte du fait que les usines ont pu traiter des minerais qui ne proviennent pas nécessairement du site), les produits utilisés ;
- les données relatives aux dispositifs de gestion des eaux mis en œuvre (collecteurs d'effluents, conduites de dérivation, bassins de stockage, de décantation, barrages, etc.);
- les données relatives aux éventuels dispositifs de surveillance environnementale (réseau piézométrique, points de prélèvements des eaux de surface, etc.);
- les procédures mises en œuvre au moment de l'arrêt des travaux, les traitements, les analyses effectués, les résultats des contrôles ;
- les informations sur la géologie locale, sur l'hydrogéologie et sur les données climatiques, en intégrant les reconnaissances spécifiques, les études effectuées au moment de l'exploration ou de l'exploitation ;
- les études réalisées à d'autres fins, pour l'alimentation en eau par exemple ou pour le suivi de la qualité des eaux ; tout ce qui permet d'avoir une connaissance des milieux et de leur comportement.

• Collecte des informations lors des reconnaissances sur site

Il est inconcevable que l'évaluation des aléas puisse être convenablement réalisée sans une reconnaissance détaillée du site.

Lorsque l'accessibilité aux vides et les conditions de sécurité le permettent, les visites de reconnaissance des cavités permettent de valider ou de préciser les plans d'exploitation existants ou, si nécessaire, de les lever. Elles fournissent également des informations essentielles sur la ou les méthodes d'exploitation mises en œuvre (zones remblayées, niveaux superposés...), ainsi que sur les mécanismes et phénomènes de pollution qui prennent naissance au sein des vieux travaux (écoulements d'eau, remblayage par des matériaux contaminés...).

La reconnaissance en surface permet également de recenser les indices de pollution ayant affecté récemment ou de façon plus ancienne les secteurs concernés. On s'attachera à identifier la présence de zones humides ou inondées, les secteurs de dépôts, les bassins de traitement des eaux..., en veillant à les localiser aussi précisément que possible (l'utilisation d'un GPS est, à ce titre, particulièrement

indiquée) de manière à les mettre en regard avec le contexte géologique et d'exploitation.

Le recours à l'analyse de photographies aériennes à différentes époques peut également fournir des informations importantes sur l'évolution dans le temps de l'ancienne exploitation et des conditions environnementales caractérisant le site.

Les visites sur site doivent également permettre de recenser les indices topographiques, géologiques (affleurements, failles) ou hydrogéologiques (sources, zones inondées) importants pour l'analyse, ainsi que les enjeux majeurs présents dans le secteur d'étude. Ces indices seront évidemment complétés et précisés par les informations transcrites sur les cartes topographiques et géologiques de la zone.

Il peut s'avérer nécessaire d'avoir recours à des prélèvements et des analyses d'échantillons de sols, d'eau ou de gaz lorsque l'on suspecte des pollutions ou des émanations potentiellement nuisibles ou dangereuses pour l'environnement et qu'aucune donnée n'existe dans les documents disponibles.

Enfin, les visites sur site sont l'occasion de recueillir des informations auprès des personnes connaissant le mieux l'environnement, à savoir les populations locales. Ces contacts, au hasard des reconnaissances sur le terrain ou à l'occasion de réunions de présentation de l'avancement des travaux, organisées par le service en charge de l'évaluation des aléas, sont l'occasion de collecter des renseignements oraux, voire d'anciens plans d'exploitation non disponibles dans les archives publiques. L'implication des responsables communaux, la préparation de ces réunions et le contenu des messages qui y sont délivrés sont essentiels pour instaurer un climat de confiance favorable à la transmission d'informations.

Il est ainsi essentiel de bien faire comprendre au public, qui peut avoir comme premier réflexe de ne pas diffuser toute l'information disponible afin de limiter les contraintes susceptibles de s'appliquer à ses parcelles, que l'absence d'information peut parfois aboutir à l'inverse de l'objectif recherché, à savoir la prise de mesures sécuritaires en cas de doute.

Sur le site, des vérifications et des observations se révèlent fondamentales, notamment pour préciser ou actualiser les données sur :

- les sources de pollution (bâtiments, stockages, dépôts de résidus, usines, etc.) et leur évolution (transferts et dépôts éoliens, affaissement des digues, etc.) ;
- les ouvrages miniers lorsqu'ils sont encore accessibles (galeries, puits, travers-bancs, etc.);
- les éléments essentiels d'observation des eaux souterraines et de surface (sources, puits ou forages, émergences, cours d'eau, etc.) ;
- les enjeux de surface, l'occupation du sol, les aménagements.

c) Investigations complémentaires

D'une façon générale, dans le domaine de la pollution des eaux et des sols, la mise en œuvre d'une étude pertinente nécessite la réalisation d'analyses et de mesures. Par ailleurs, l'extrapolation est généralement très délicate et la prévision des comportements reste limitée à quelques cas simples, ce qui implique également que des mesures régulières soient réalisées pour bien connaître la dynamique des pollutions (cycles annuels, dérive de long terme, progression dans l'espace, etc.).

Lorsque les éléments recueillis sont insuffisants, il est nécessaire de pouvoir disposer d'un nombre minimal d'analyses chimiques des liquides et d'analyses géochimiques pour les solides (paramètres physico-chimiques, anions, cations et métaux), pour pouvoir établir un diagnostic initial le plus précis possible. Dans ce cadre, on note qu'il sera utile de pouvoir disposer d'éléments sortant du cadre administratif géographique limité de l'évaluation des aléas, notamment par examen de l'amont et de l'aval hydraulique par exemple.

Au-delà du constat initial, il est important d'apprécier l'évolution des contaminations dans le temps (situation à terme et gradient) et dans le champ retenu pour l'évaluation des risques et l'évaluation des aléas « pollution ». On pourra envisager le recours à des outils de mesures complémentaires, plus qualitatifs que les mesures de laboratoire sur prélèvement et moins coûteux (mesures sur site). Ces techniques nécessitent une méthodologie tenant compte de la précision et de la limite de détection des appareils utilisés. Les prélèvements et analyses de laboratoire serviront soit de calage, soit de validation pour ces méthodes plus qualitatives. On notera que, pour les sols, certaines mesures *in situ* (en dehors des méthodes classiques) peuvent se heurter à des difficultés liées à l'hétérogénéité du milieu, à l'humidité, à la granulométrie, à la gamme des teneurs et aux effets de matrice.

L'acquisition des éléments complémentaires résulte d'une stratégie fondée sur un diagnostic initial correct comprenant à la fois une bonne connaissance des concentrations des polluants potentiels et de leur répartition dans l'espace. Pour l'identification des scénarios de pollution et l'évaluation de l'aléa, il est nécessaire d'utiliser un minimum de connaissance sur les comportements des polluants. Ceci implique de bien rechercher les paramètres pilotant l'évolution des pollutions (voir encadré ci-dessous).

L'évaluation du caractère évolutif des situations chroniques nécessite d'acquérir des informations sur différents paramètres physico-chimiques déterminant le comportement des éléments contaminants dans l'environnement comme :

- la réactivité contrôlée par la vitesse de dissolution des phases minérales porteuses, la précipitation d'éventuelles phases secondaires, la granulométrie, la porosité des roches favorisant l'accès aux agents d'altération, etc.;
- la mobilité chimique vers les compartiments eaux et sols, contrôlée par la spéciation des éléments (AsIII/As, V, Cr, VI/Cr III...), les phénomènes de sorption, de co-précipitation, de conditions Eh et pH, et d'une manière générale les déplacements des éléments à l'état dissout dans un fluide;

 la dispersion physique ou l'aptitude d'un élément à se déplacer par des voies non chimiques comme par exemple le mouvement des particules en suspension dans les eaux superficielles, la sédimentation dans le lit des cours d'eaux ou encore le transport par voie aérienne (érosion éolienne ou émissions atmosphériques des usines métallurgiques par exemple).

4.2. L'ALÉA POLLUTION DES EAUX ET DES SOLS

Les objectifs et les démarches de la politique « sites et sols pollués », développés par le MEDAD, ne sont pas comparables à ceux des PPRM. En effet, les PPRM ont pour vocation d'identifier les secteurs les plus sensibles au développement de risques ou nuisances dans le moyen et le long terme et d'établir des règles d'aménagement du territoire adaptées aux différentes contraintes liées à l'après-mine, alors que la politique des « sites et sols pollués » visent l'examen du risque plus que celui d'un niveau de pollution. La gestion du site s'effectue en fonction de l'usage auquel il est estimé.

Cependant, certains outils de caractérisation des sites ou d'évaluation des risques peuvent être communs et appuyer la qualification de l'intensité d'une pollution. Les informations collectées dans le cadre d'une démarche « sites et sols pollués » pourront être valorisées dans le cadre d'un PPRM, et réciproquement.

4.2.1. Politique de gestion des sites pollués du MEDAD : rappel de la réglementation et de la méthodologie

Une politique de réhabilitation et de traitement des sites et sols pollués a été définie par la circulaire du 3 décembre 1993 du ministre de l'environnement. Elle s'appuie notamment sur la loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et aux installations classées pour la protection de l'environnement.

La démarche générale suivante est alors proposée :

- la recherche des sites et sols pollués ;
- l'évaluation des risques et de la vulnérabilité de chaque site ;
- la création de structures adaptées d'information et de conception ;
- le fichier national des sites et sols pollués.

En 1996, cette politique a été précisée par une nouvelle circulaire qui prévoit de :

- recenser les sites (potentiellement) pollués ;
- sélectionner les sites pollués ;
- surveiller et si nécessaire traiter les sites pollués.

Des guides méthodologiques ont été diffusés dès 1995 pour mettre en place cette politique de gestion des sites et sols pollués. Le ministère chargé de l'écologie a réalisé en 2005/2006 un retour d'expérience sur la politique de gestion des sites et sols pollués. Cela a conduit à la réécriture des textes réglementaires et des outils

méthodologiques permettant de renforcer la cohérence et l'efficacité de cette politique. Une note ministérielle « sites et sols pollués - modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués » et une circulaire relative aux installations classées « Prévention de la pollution des sols - Gestion des sols pollués » ont été publiées le 8 février 2007. Ces nouveaux outils sont présentés en annexe 3.

4.2.2. Qualification de l'aléa pollution des eaux et des sols

a) Aléa pollution des eaux souterraines et superficielles

• Intensité du phénomène

La notion d'intensité qui caractérise le phénomène de pollution des eaux est étroitement liée à la concentration attendue ou estimée d'un ou de plusieurs éléments chimiques (Pb, Cu, As, etc.) ainsi qu'à leur spéciation.

La concentration en éléments polluants conditionne l'usage que l'on peut faire des eaux, ce qui permet de rattacher l'intensité d'un phénomène de pollution à des usages et à leur altération.

La gestion de l'eau est encadrée à l'échelle de l'Europe et de la France par une série de directives, lois, décrets, arrêtés et circulaires, sur lesquels il est nécessaire de s'appuyer pour l'évaluation des intensités et des aléas. Ces textes sont listés et présentés en annexe 4. Ils définissent, entre autre, la notion de « bon état » des eaux, de normes de qualité environnementale provisoire (NQEp) et donnent la liste des substances impliquées (dangereuses, prioritaires, à suivre) dans l'évaluation de l'état des milieux aquatiques avec des valeurs à ne pas dépasser pour respecter le bon état.

Dans la pratique, pour l'évaluation des aléas, il est nécessaire d'avoir une double approche :

- une caractérisation des rejets ou des écoulements provenant du site minier, avec recherche des substances dangereuses possibles ;
- une caractérisation des milieux aquatiques récepteurs, en amont, sur le site et en aval, selon les méthodologies en vigueur, en prenant en compte les objectifs de qualité, les exigences particulières et les substances prioritaires.

Les effets des rejets miniers doivent ensuite être évalués en se référant :

- au « bon état » du milieu aquatique et à la dégradation éventuelle due aux rejets provenant du site minier. La circulaire 2007/23 du 7 mai 2007 définit les normes de qualité environnementales provisoires (NQEp) des 41 substances impliquées dans l'évaluation de l'état chimique des cours d'eau, ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances dangereuses dans l'eau. Elle fixe également les objectifs nationaux de réduction des émissions de ces substances et modifie la circulaire DCE 2005/12 du 28 juillet 2005 relative à la définition du bon état. À partir de 2008, un système d'évaluation de l'état des eaux, validé au niveau européen, devrait se mettre en place;

- à la non-détérioration de l'état existant du milieu aquatique, qui doit s'entendre comme le non-changement de classe d'état de la qualité de l'eau en se référant à la qualité de l'eau connue en amont hydraulique du secteur concerné ;
- au respect des exigences particulières (SAGE, SDAGE qui seront révisés en 2008-2009) dans des zones faisant l'objet de législation spécifique sur la protection des eaux : zones de captages destinées à l'alimentation en eau potable, enjeux piscicoles...

La reconnaissance de la qualité de l'eau en amont hydraulique du secteur minier et la reconnaissance des exigences particulières font partie de la phase informative.

Les éléments chimiques, retenus pour caractériser les altérations des eaux, sont ceux qui sont strictement liés au domaine minier, à l'exclusion de toute autre substance naturelle ou anthropique non issue de l'activité d'exploitation minière. Il s'agit bien d'apprécier l'impact des phénomènes d'origine minière sur les eaux et non les conséquences d'autres pratiques dérivées, par exemple de l'agriculture ou de l'industrie. La connaissance des valeurs du bruit de fond géochimique et de la NQEp (norme de qualité environnementale provisoire) est essentielle pour la détermination de la concentration maximale admissible par le milieu. Les NQEp sont données dans la circulaire 2007/23 ou calculées à partir de la valeur du bruit de fond. Le bruit de fond géochimique est mesuré directement en amont du site concerné. La valeur du bruit de fond peut également être estimée sur la base de la meilleure information disponible relative à la concentration de l'élément suivi dans le même type de milieu naturel soumis à une faible pression anthropique.

La détermination des différents niveaux de concentration est menée par le spécialiste chargé de la réalisation des documents techniques d'évaluation des aléas. Elle lui permet ensuite de construire une gradation pour caractériser l'intensité du phénomène concerné qui peut être calée sur :

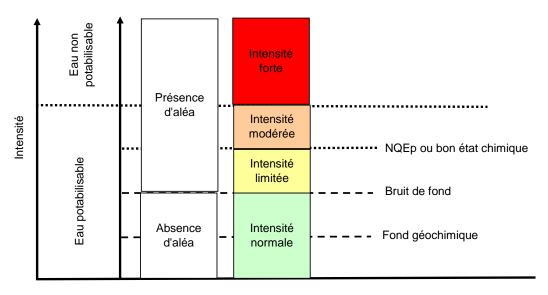
- le respect ou non du bon état chimique des eaux tel que définit dans la circulaire DCE/2007/23 du 7 mai 2007 ;
- le respect des exigences particulières figurant dans les SAGE et les SDAGE ;
- une détérioration des valeurs de référence caractérisée par un dépassement des valeurs du bruit de fond géochimique ;
- l'influence des valeurs mesurées sur le potabilisation des eaux brutes (arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R.1321-2, R.1321-3, R.1321-7 et R.1321-38 du code de la santé publique);
- la prise en compte de la typologie nationale des eaux de surface, telle qu'elle est définie dans la circulaire DCE 2005/11 du 29 avril 2005.

À titre d'exemple, l'échelle d'intensité peut être construite à partir des critères tels que ceux qui sont définis dans le Tableau 6 et la Figure 7. Cette approche doit être faite pour chacun des éléments polluants concernés et est susceptible d'être réajustée par

la personne en charge de l'étude pour tenir compte de la situation locale où certains critères peuvent ne pas être pertinents.

Classe d'intensité	Critères d'altération
Limitée	Respect du bon état, mais détérioration des valeurs de référence dans le secteur d'étude par dépassement du bruit de fond géochimique (§ 3.1.1.). Aucune influence sur la potabilisation des eaux brutes (arrêté du 11/01/07).
Modérée	Non-respect du bon état et des exigences particulières. Dépassement du bruit de fond (§ 3.1.1.) géochimique. Influence sur la potabilisation des eaux brutes.
Élevée	Non-respect du bon état et présence de substances prioritaires caractérisées par un dépassement des valeurs seuils. Eaux brutes non potabilisables.

Tableau 6 - Pollution des eaux : classes d'intensité.



NQEp = Norme de qualité environnementale provisoire

Figure 7 - Pollution des eaux : classes d'intensité.

Une intensité normale est définie par le « respect du bon état chimique» et des valeurs inférieures au bruit de fond géochimique (voir § 3.1.1.). Dans ce cas, il n'y a pas d'aléa.

L'approche proposée est applicable sur les polluants issus de l'activité minière pour lesquels on dispose d'un NQEp, c'est-à-dire des polluants qui font partie des 41 substances impliquées dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances dangereuses dans l'eau (circulaire 2007/23 du 7 mai 2007). Pour les autres polluants comme les sulfates et les chlorures, on ne peut que se rattacher aux valeurs affichées dans l'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées dans le code de la santé publique.

• Facteurs de prédisposition à voir apparaître des pollutions

Cas de processus observés, actuels

Lorsqu'une contamination est observée, avec des analyses le confirmant, le phénomène est avéré, il s'agit d'un constat et l'on ne parlera pas d'aléa sur ce qui est observé s'il n'y a pas de possibilité d'évolution dans le temps et l'espace. Il sera par contre nécessaire d'analyser les processus pouvant provoquer une évolution spatiotemporelle du phénomène afin d'anticiper une possible augmentation ou un déplacement de cette pollution. Un aléa devra alors être déterminé sur cette évolution et/ou ce déplacement potentiel.

Cette contamination peut résulter d'une situation définie dans les tableaux 1, 2 et 3, du point « identification des phénomènes redoutés » avec des mécanismes tels qu'ils sont identifiés dans ces mêmes tableaux, lorsque l'on est en présence d'un ancien site minier avec des travaux souterrains, des installations de traitement et des sites de stockage en surface.

Les prédispositions à une évolution spatio-temporelle d'une pollution connue se présentent :

- lorsque des déchets ou produits dangereux stockés en surface avec un confinement plus ou moins efficace se déversent accidentellement dans le réseau de drainage ou les travaux souterrains et en conséquence dans les secteurs ennoyés suite à une forte pluviométrie et des ravinements ;
- lorsque les caractéristiques physico-chimiques de la source de pollution sont modifiées par une reprise d'érosion par exemple ;
- lors de l'apparition d'une émergence au niveau d'une zone déjà polluée dans le cas de remontée de la nappe par exemple.

Cas de processus non encore observés, à venir

Lorsque la pollution n'est pas constatée, il s'agit de trouver les facteurs de prédisposition pour qu'un processus de pollution se déclare. Il s'agit de situations où les phénomènes sont identifiés ou prévisibles et où il n'y a pas nécessairement de stabilisation des processus d'évolution physico-chimique.

Les conditions climatiques et géographiques de la zone sont également à intégrer, car elles vont influer sur l'évolution de la pollution, par exemple par des phénomènes de dispersion.

Les prédispositions les plus caractéristiques se présentent lorsqu'il y a :

- contact direct et lessivage des terrains au sein des anciens travaux (voir drainage minier acide), ruissellement sur des ouvrages à ciel ouvert avec des déversements dans les eaux de surface et dans les eaux souterraines;
- contact direct et lessivage des résidus miniers ou de tous autres produits stockés en souterrain, ce qui peut être le cas lorsque les travaux ont été remblayés avec des

résidus miniers au sens large ou à la suite de ces contacts directs, déversement dans des exutoires de surface ;

- déversement direct de produits contaminants dans les travaux souterrains ennoyés ou dans les eaux de surface ;
- entraînement des produits contaminants stockés en surface et déversés dans les eaux de surface ;
- infiltrations d'eaux de drainage acides provenant d'une exploitation à ciel ouvert vers les travaux miniers sous-jacents ;
- de façon moins courante, alimentation des nappes souterraines par les eaux de surface elles-mêmes contaminées ;
- alimentation des cours d'eau par les émergences minières elles-mêmes contaminées ;
- contact et entraînement par les eaux de surface des sols et des poussières transportées par voies aériennes ;
- rejets des eaux provenant de digues à stériles ou de bassin de décantation.

• Qualification de la prédisposition

Les principaux facteurs permettant de qualifier la prédisposition à l'apparition de scénario de pollution sont les suivants :

- présence ou apparition possible d'émergences contaminées ;
- conditions chimiques;
- existence de pollutions historiques ou observées dans des contextes identiques ;
- rejets d'effluents d'installation de traitement et de bassins de décantation ;
- lessivage des travaux miniers par les eaux de ruissellement ou variation de la nappe ;
- réseau de drainage des résidus miniers ;
- fuite/défaillance de bassin de stockage, de traitement de résidus ou d'effluents ;
- présence d'anciennes zones de stockage de produits chimiques ou d'hydrocarbures ;
- régime hydrologique ;
- perméabilité de la formation géologique du site.

Pour chaque situation observée sur le site, il appartient à l'expert en charge de l'élaboration des documents techniques d'évaluation des aléas en fonction de la situation observée et des évolutions possibles, prévisibles, d'évaluer les prédispositions des sites à évoluer vers des contaminations potentiellement dommageables pour l'homme ou l'environnement.

À titre d'exemple, une échelle des classes de prédisposition peut être construite à partir des critères tels que ceux figurant dans le Tableau 7.

Eaux de surface et souterraine: prédisposition				
	Classes de prédisposition			
Facteurs de prédisposition	Peu sensible	Sensible	Très sensible	
Eaux de surface et souterraines				
Conditions chimiques				
pH acide				
pH neutre	Fonction du polluant			
pH basique		r onolion da polidan	•	
Milieu réducteur				
Milieu oxydant				
Abondance d'éléments complexants			Selon polluant	
Abondance de MES				
Existence de pollutions historiques ou observées dans des contextes identi	ques			
Oui				
Non				
Existence d'une source de pollution avec polluants mobiles (dont sédiments	, sols, poussières)			
Oui				
Non				
Incertitude sur les données/ sur la présence du phénomène	Fonction du polluant et des conditions ci-dessus			
Phénomène (espace)				
Généralisé				
Ponctuel				
Phénomène (temps)				
Continu				
Discontinu				
Eaux de surface seules				
Régime hydrologique. (Importance du cours d'eau, débit, pluviométrie, hautes et basses eaux)	Fonction du rapport débit émergence / débit du milieu récepteur)			
Eaux souterraines seules				
Relation eaux souterraines et travaux miniers (TMS et MCO)				
Oui				
Non				
Perméabilité des formations géologiques concernées				
Forte				
Faible				

Tableau 7 - Pollution des eaux de surface : classes de prédisposition.

b) Aléa pollution des sédiments

• Intensité du phénomène

Les sédiments constituent des accumulateurs de pollution ou des sources secondaires de pollution. Ils peuvent être fortement remobilisés lors des épisodes de crues et transportés sur de longues distances. Ainsi, la cartographie de l'aléa sédiment peut s'étendre bien au-delà des limites du site minier ou de la concession concernée.

Les classes d'intensité se rattacheront à celles définies pour les sols.

Les classes de prédisposition seront calées sur l'évaluation de l'existence de zones susceptibles d'accumuler les sédiments comme les retenues et barrages ou les zones de rupture de pente avec affaiblissement du courant d'eau et sédimentation. On prendra aussi en compte les possibilités de relarguage de polluants lors de changements des conditions physico-chimiques du milieu (pH...), mais aussi du déplacement particulaire.

c) Aléa pollution des sols

Contexte général

Dans le domaine des sols, il faut noter que la Commission européenne propose une nouvelle stratégie de protection des sols européens. Elle a rédigé une proposition de directive définissant un cadre pour la protection des sols en septembre 2006 (COM (2006) 232 Final). Ce projet de directive, adopté en première lecture le 17 novembre 2007 par le Parlement européen, définit le sol comme « la couche supérieure de l'écorce terrestre située entre le substratum rocheux et la surface ». Dans le domaine de la contamination des sols, elle propose des actions de prévention et d'inventaire, ainsi que leur assainissement. Ce nouveau texte, quand il sera adopté, aura donc une incidence sur l'évaluation des aléas « pollution des sols et des eaux ».

En France, la méthode de gestion des sites et sols pollués vient d'être réactualisée et est basée sur deux démarches qui peuvent être indépendantes, simultanées ou successives (ann. 3), avec :

- une première démarche lorsque les usages des milieux concernés sont fixés et qui consiste à s'assurer que l'état des milieux est compatible avec les usages constatés.
 Une interprétation de l'état des milieux (IEM) est alors réalisée;
- une seconde démarche où l'on peut agir sur l'état du site ou sur les usages. Un plan de gestion est alors réalisé.

Dans le cas de l'évaluation de l'aléa environnement (cadre des PPRM), ces deux démarches sont applicables simultanément sur les sites miniers, puisque ces secteurs présentent d'une part des zones à usages déjà fixés et d'autre part des zones de développement urbanistique possible inscrit dans les PLU et dont l'urbanisation sera fonction des aléas.

La phase d'appréciation des enjeux et du zonage règlementaire, qui doit être réalisée après la phase d'évaluation des aléas, peut alors s'appuyer sur la démarche de gestion des sites et sols pollués décrite en annexe 3, mais doit être adaptée. Le but est d'identifier les secteurs les plus sensibles au développement probable de pollution dans le long terme et d'établir « *in fine* » des règles d'aménagement ou de gestion du territoire adaptées aux contraintes liées à l'après mine.

• Intensité

Dans le cas des sols, la notion d'intensité est étroitement liée à la concentration d'un ou plusieurs éléments chimiques présents sur le site concerné (Pb, Cu, As, Hg, Cd...) ayant un impact sur le milieu et l'homme. Ces classes d'intensité peuvent être définies en tenant compte pour chacun des éléments chimiques concernés :

 du dépassement du fond géochimique naturel. Mais l'utilisation de cette valeur en tant que seuil déclencheur pour la prise en compte de l'aléa environnement ne doit pas être appliquée de façon systématique mais basée sur avis d'expert;

- de certains paramètres physico-chimiques influant sur la mobilité des polluants concernés telles que la réactivité, la mobilité chimique et la dispersion physique. Ainsi, le classement du niveau d'intensité ne se fera pas sur la concentration chimique totale seule, mais devra prendra en compte, autant que possible, la fraction biodisponible de l'élément chimique concerné (voir annexe 2);
- des gammes de valeurs « ordinaires » et d'anomalies naturelles dans les sols fournis dans le tableau de synthèse établi par l'INRA et résumées dans l'annexe 5 http://etm.orleans.inra.fr/gammes3.htm;
- de la démarche d'Interprétation de l'État des Milieux (IEM) développée dans le cadre de la nouvelle politique de gestion des sites et sols pollués. Cette approche comporte une comparaison aux valeurs de références ou au bruit de fond, suivie, s'il y a lieu, d'une partie calculatoire effectuée polluant par polluant.

En tout état de cause, l'avis d'expert est nécessaire à ce stade, car chaque outil et paramètre retenu doit être utilisé avec esprit critique et précaution afin de ne pas sous-estimer ou sur-estimer la gradation, le niveau de l'intensité.

Il est possible d'élaborer des classes d'intensité selon le principe du Tableau 8 en tenant compte du fond géochimique naturel, des fortes anomalies géochimiques naturelles et des effets attendus sur l'homme et le milieu.

Une intensité nulle sera caractérisée par des valeurs ne dépassant pas le fond géochimique naturel rencontré sur l'ensemble du secteur en dehors des sources identifiées de pollution.

Classe d'intensité	Critères de classement
Limitée	Valeurs supérieures au fond géochimique naturel et se rapprochant des fortes anomalies naturelles mais avec des effets peu sensibles sur l'homme et le milieu.
Modérée	Valeurs dépassant les fortes anomalies naturelles et pas d'effet grave sur l'homme et le milieu.
Elevée	Valeurs dépassant les fortes anomalies naturelles avec possibilité d'effet(s) grave(s) sur l'homme et le milieu

Tableau 8 - Pollution des sols : classes d'intensité.

La gravité des effets sur les milieux et sur l'homme s'appréciera en fonction des données bibliographiques disponibles sur les éléments chimiques identifiés, ou sur des constats effectués sur site (notamment l'absence de végétation ou son dépérissement à proximité de certaines installations).

En dehors des zones de stockage de déchets miniers, les teneurs en éléments métalliques dans les sols sur un site minier sont liées à l'anomalie géochimique locale. Par contre, sur les zones de stockage de déchets miniers ou à proximité, par des phénomènes de dispersion éolienne de ruissellement ou épandage de matière solide issue des dépôts, elles peuvent atteindre des valeurs susceptibles de dégrader les milieux naturels (végétaux, milieux aquatiques...) et a fortiori directement l'homme. Il se pose donc parfois la question de l'accumulation dans la chaîne alimentaire (via les végétaux et les animaux), et les conséquences à terme sur la santé humaine. La question de la consommation directe de sols par les enfants en bas âge ne se posera qu'exceptionnellement, pour des sites miniers urbanisés où des éléments présentant une certaine toxicité, tels que le cadmium ou l'arsenic, ont été identifiés à des concentrations notables. Cette situation justifiera une intensité élevée, du fait de la possibilité d'effet grave sur la santé humaine.

• Pondération de l'intensité

L'intensité est liée non seulement à la valeur brute des éléments chimiques retenus, mais aussi à :

- la granulométrie, la nature minéralogique et l'acidité du sol ;
- la biodisponibilité/bioaccessibilité de l'élément chimique concerné ;
- la présence de matière organique dans le sol ;
- l'existence d'anomalie naturelle modérée à élevée.

Ces facteurs peuvent avoir une influence notable sur l'intensité, il est donc proposé de pondérer les valeurs brutes de cette intensité afin d'en tenir compte. Cette démarche est purement qualitative et basée sur avis d'expert.

• Facteurs de prédisposition à voir apparaître des pollutions

Cas de processus observés, actuels

Lorsqu'une contamination est observée avec des analyses le confirmant, le phénomène est avéré, il s'agit d'un constat et l'on ne parlera pas d'aléa sur ce qui est observé. Il sera par contre nécessaire d'analyser les processus pouvant provoquer une évolution spatio-temporelle du phénomène afin d'anticiper une possible augmentation ou un déplacement de cette pollution. L'aléa se déterminera donc sur cette augmentation ou ce déplacement potentiel.

Cette contamination peut résulter d'une situation définie dans les tableaux 1, 2 et 3 du point « identification des phénomènes redoutés » avec des mécanismes tels qu'ils sont identifiés dans ces mêmes tableaux, lorsque l'on est en présence d'un ancien site minier avec des travaux souterrains, des installations de traitement et des sites de stockage en surface.

Les prédispositions à une évolution spatio-temporelle d'une pollution connue se présentent :

- lorsque l'activité existante sur la zone polluée est modifiée, provoquant un changement de l'état des sols avec une possible remobilisation des polluants dans l'environnement ;
- lorsque les caractéristiques physico-chimiques de la source de pollution sont modifiées provoquant par exemple une augmentation des envols de poussières, une reprise d'érosion...

Cas des processus non encore observés, à venir

Lorsque la pollution n'est pas constatée, il s'agit d'identifier et de caractériser les facteurs de prédisposition pour qu'un processus de pollution se déclare. Il s'agit de situations où les phénomènes sont identifiés ou prévisibles et où il n'y a pas nécessairement de stabilisation des processus d'évolution physico-chimique.

Comme pour les eaux, il faudra aussi prendre en compte l'influence des facteurs climatiques et topographiques.

Les prédispositions les plus caractéristiques se présentent lorsqu'il y a :

- envol et dépôt de poussières provenant d'un site exposé, surtout dans le cas de stockages de produits à fine granulométrie ;
- déversement direct de déchets mis en remblais au voisinage ou dans l'environnement des sites de stockage;
- déversement ou fuites de produits dangereux directement sur les sols ou dans les eaux de surface :
- d'une façon plus générale, lorsqu'il y a contact entre des eaux polluées et des sols dans lesquels viennent se fixer les éléments contaminants (adsorption), comme par exemple l'apparition d'émergence lors de la remontée des nappes ou l'ennoyage de travaux miniers ou bien lors d'inondations avec apport d'eaux polluées et/ou dépôts de matières pollués en suspension...

Qualification de la prédisposition

Les principaux facteurs de prédispositions sont les suivants :

- l'accessibilité physique du matériau ;
- la perméabilité;
- l'abondance de phase adsorbante ;
- les conditions chimiques du sol;
- le retour d'expérience (existence de pollutions historiques ou observées dans des contextes semblables) ;
- l'existence ou l'influence d'une source avec polluants mobilisables.

• Classes de prédisposition

Les critères permettant d'établir les différentes classes de prédisposition sont résumés dans le Tableau 9.

Peu sensible		
	Sensible	Trés sensible
F	onction du polluar	<u>ıt</u>
F	onction du polluar	nt
	F	Fonction du polluan Fonction du polluan Fonction du polluan

Tableau 9 - Pollution des sols : classes de prédisposition.

4.2.3. Cartographie de l'aléa pollution des eaux et des sols

Une des spécificités de l'aléa « pollution des eaux et des sols » est de pouvoir affecter des surfaces qui dépassent, parfois largement, l'emprise des travaux miniers et même de la concession. En effet, l'impact relatif aux eaux de surface et souterraines, ainsi que celui relatif aux sédiments, concerne, *a priori*, le bassin versant dans son extension. Sa structure de fonctionnement peut être perturbée par les contaminations provenant des travaux miniers.

Pour la pollution des sols, la contamination peut également déborder du site minier, mais sur une surface plus limitée, même si on prend en compte la dispersion de poussières contaminées.

L'échelle des cartographies sera donc, en général, le 1/10 000 ou le 1/25 000, mais des échelles plus petites (1/100 000 ou 1/250 000) seront nécessaires lorsque des risques de dispersion des polluants, notamment dans les cours d'eau, seront identifiés.

Comme pour les autres thématiques, cas des phénomènes de pollution des eaux souterraines, des eaux de surface, l'analyse des phénomènes de pollution des sédiments et des sols s'appuie sur :

- l'intensité des phénomènes, définie à partir des concentrations avérées ou potentielles des différents contaminants, calée elle-même par rapport aux valeurs du bruit de fond géochimique biodisponible (sols), du fond géochimique et de valeurs seuils (eaux et sédiments);
- les prédispositions des sites aux contaminations qui résultent de l'analyse des différents scénarios.

Ainsi l'aléa pollution est cartographié pour chacun des phénomènes définis et peut être illustré par le Tableau 5 pour les eaux, les sédiments et les sols.

Une première zone cartographique appelée « zone affectée par l'activité minière » sera tracée. Elle est définie comme incluant l'ensemble des aléas faible, moyen et fort mais aussi l'ensemble des ouvrages miniers. Elle pourra de ce fait contenir des secteurs d'aléa nul mais permettra de localiser géographiquement l'ensemble de la zone concernée par l'activité minière.

On notera que, dans le cas où les phénomènes sont avérés et mesurés sur certains secteurs, l'aléa est dimensionné non seulement sur l'intensité du phénomène actuel, mais aussi sur l'extension qu'il pourrait prendre à long terme.

Pratiquement, en fonction de la situation observée et des évaluations menées, on peut avoir recours à plusieurs types de documents graphiques. Le choix est laissé au spécialiste chargé de l'exécution des documents d'évaluation des aléas. Il peut ainsi établir une carte d'aléa pour chaque type de phénomène, ce qui se justifie par :

- la grande différence des contaminations en termes d'extension, ce qui peut justifier des cartographies à des échelles différentes. La pollution des eaux de surface concerne en effet des tracés linéaires qui peuvent s'étendre sur de grandes distances, les eaux souterraines affectent fréquemment de très grandes surfaces, les sédiments suivent généralement les tracés des cours d'eau et les sols contaminés ont une extension généralement limitée autour des sites miniers;
- le niveau d'homogénéité et de cohérence qu'il convient de respecter afin de présenter une cartographie compréhensible.

Dans de nombreuses situations, la difficulté consiste à trouver une limite dans l'extension des phénomènes de pollution qui s'étend parfois au-delà des périmètres des sites miniers, des communes ou des périmètres d'évaluation des aléas. Il s'agit, dans la mesure du possible, de préciser le contour de la zone d'extension maximale de la nuisance / de la zone où la contamination sera perceptible.

Des liens sont à établir avec le risque « inondation » pour l'extension des crues et leur relation avec la dispersion de polluants, de même, en cas de rupture de digues, la dispersion des boues est à évaluer.

Enfin, on retient que cartographie et règlement sont étroitement liés et que les unités cartographiées ont une correspondance en terme de réglementation, ce qui implique que la cartographie soit effectuée avec réalisme.

5. Bibliographie

Artignan D., Cottard F. (2003) - Méthodologie pour la réalisation de la phase informative du volet risque-pollution d'un PPRM. État d'avancement des travaux en avril 2003. BRGM Rapport RP-52048-FR.

Baranger, P., Kimmel M., Mazenc B., Hadadou R., Lefebvre O., Franck C. (2005) - Assessment and mapping of the environmental hazard in the MRPP approach; from application to development needs. Post-mining 2005, November 16-17, Nancy, France.

Didier C., Leloup J. (2005) - The MRPP: a powerfull operational regulatory tool to prevent and manage post-mining risks. Post-mining 2005, November 16-17, Nancy, France.

INERIS (2006) - L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique : Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport d'étude DRS-06-51198/R01.

INERIS (2007) - Principaux textes réglementaires en lien avec l'après-mine et pollutions minières potentielles impactant les milieux eaux et sols. Programme EAT-DRS-03. Rapport d'étude n° DRC-07-86106-09249C. 04/09/07.

Jeannot R., Lemière B., Chiron J.C. (2001) - Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Documents BRGM 298. 83 p.

Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. (2001) - Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau. Documents BRGM 300. 119 p.

AUTRES DOCUMENTS

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du Code de la santé publique. NOR: SANP0720201A.

Arrêté du 21 mars 2007 modifiant l'arrêté du 20 avril 2005 pris en application du décret du 20 avril 2005 relatif au programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses et l'arrêté du 30 juin 2005 relatif au programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses.

Circulaire DCE 2005/11 relative à la typologie nationale des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eau de transition et eaux côtières), en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

Circulaire DCE 2005/12 du 28 juillet 2005 relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (cours d'eau, plan d'eau) en application de la directive européenne 2000/60/DCE du 23 octobre 2000, ainsi qu'à la démarche à adopter pendant la phase transitoire.

Circulaire DCE 2006/18 du 21 décembre 2006 relative à la définition du « bon état » pour les eaux souterraines en application de la Directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement européen et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, ainsi que la définition de valeurs seuils provisoires applicables pendant la phase transitoire.

Circulaire DCE 2007/23 du 07 mai 2007 définissant les « normes de qualité environnementale provisoires (NQEp) » des 41 substances impliquées dans l'évaluation chimique des masses d'eau, ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances dangereuses dans l'eau.

Décret n° 2000-547 du 16 juin 2000 relatif à l'application des articles 94 et 95 du Code minier. NOR: ECOI0000189D.

Décret n° 2005-378 du 20 avril 2005 relatif au programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses.

Décret n° 2006-649 du 02 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains.

Directive cadre sur l'eau DCE 2000/60 du 23 octobre 2000.

Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil du 12 décembre 2006 sur la protection es eaux souterraines contre la pollution et la détérioration.

Loi n° 99-245 du 30 mars 1999 relative à la responsabilité en matière de dommages consécutifs à l'exploitation minière et à la prévention des risques miniers après la fin de l'exploitation. NOR: ECOX9903413L. Version consolidée au 31 mars 1999.

Gestion des sites et sols pollués :

http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/OutilsMethodologiques/Visite V0-022007.pdf

- La visite de site : février 2007 ;
- Schéma conceptuel et modèle de fonctionnement : février 2007 ;
- Diagnostics du site : février 2007 ;
- La démarche d'Interprétation de l'État des Milieux : février 2007 ;
- Calcul de grille IEM : février 2007 ;

- La démarche d'analyse des risques résiduels : février 2007 ;
- Aide à l'élaboration du plan de gestion : à paraître.

Annexe 1

Activité extractrice dominante en France et type de pollution attendue

Activité extractrice dominante en France et type de pollution attendue (BRGM/RP-52048-FR)

Région	Activité extractive dominante	Nature des pollutions attendues
Alsace	Sel, potasse, huile, sulfures de Pb-Ag-	- K, Na, Br dans les eaux
	Cu	- pH, métaux et traces
Aiti	Heilan was abankan Dhanakata ad	- Huiles dans les eaux et sols
Aquitaine	Huiles, gaz, charbon, Phosphate, sel, sulfures Pb-Zn	turbidité, SO4, As K, Na, Br dans les eaux turbidité, SO4, As
	Sulfiles PD-ZII	- pH, métaux et traces
		- Huiles dans les eaux et sols
Auvergne	Charbon, sulfures As,Sb, Pb-Zn-Ag,	- U dans les eaux et les sols, radon
	oxydes W-Sn-Li, REE, Au, Uranium,	
	Fluorine et barytine	- pH, métaux et traces
		- turbidité, SO4, As
Basse Normandie	Fer	Fe-Mn, SO4
Bourgogne	Charbon, Uranium, Fer, Sulfures Cu,	K, Na, Br dans les eaux
	Fluorine et Barytine, sel	PH, métaux et traces
		Turbidité, SO4, As Fluor dans les eaux
		U dans les eaux et les sols, radon
Bretagne	Sulfures de Cu-Pb-Zn-Sb, oxydes Sn-	PH, métaux et traces
Brotagno	W-Ti-REE, Fer, Au	Fe-Mn, SO4
Centre	Charbon, huiles, Fluorine, Barytine	Huiles dans les eaux et sols
		Turbidité, SO4, As
		Fluor dans les eaux
Champagne Ardenne	Huile	Huiles dans les eaux et sols
Corse	Sulfures de Sb	PH, métaux et traces
Franche-Comté	Tungstene, charbon, Fer, sel	Turbidité, SO4, As
		K, Na, Br dans les eaux
		PH, métaux et traces
Haute Normandie	- 11.31-	I hallon done los comestantes
Ile de France	Huile	Huiles dans les eaux et sols
Languedoc Roussillon	Charbon, Uranium, Au, Sulfures As-Bi-Ag-Cu, Pb-Zn-Ag, Sb, Fer, Bauxite, sel,	K, Na, Br dans les eaux PH, métaux et traces
	Fluorine et Barytine	Turbidité. SO4. As
	Tidoffic ct Barytine	Fluor dans les eaux
		U dans les eaux et les sols, radon
		Fe-Mn, SO4
Limousin	Uranium, charbon, Au, sulfures As-Ag-	PH, métaux et traces
	Sb-Mo, Oxydes de W-Sn et Nb+Ta,	Turbidité, SO4, As
	Fluorine et barytine	Fluor dans les eaux
		U dans les eaux et les sols, radon
Lorraine	Charbon, Fer, Sel, Sulfures Pb-Ag-Cu,	K, Na, Br dans les eaux
	Fluorine et Barytine	PH, métaux et traces Turbidité, SO4, As
		Fluor dans les eaux
		Fe-Mn, SO4
Midi Pyrénées	Gaz, charbon, Uranium, Au Oxydes W,	PH, métaux et traces
,	sulfures Zn-Pb-Ge-Cd, Fluorine	Huiles dans les eaux et sols
	Barytine, Fer et Manganèse, Uranium	Turbidité, SO4, As
		Fluor dans les eaux
		U dans les eaux et les sols, radon
Nord-Pas de Calais	Charbon	Turbidité, SO4, As
Pays de Loire	Sulfures de Cu-Pb-Zn-Sb-Hg, Uranium,	PH, métaux et traces Turbidité, SO4, As
	Charbon, Au,Fer	U dans les eaux et les sols, radon
		Fe-Mn, SO4
Picardie	Phosphate	P dans les eaux
Poitou Charentes	Uranium	U dans les eaux et les sols, radon
Provence-Alpes-Cote d'Azur	Charbon, sel, sulfures Pb-Zn-Ag-Sb-Cu,	K, Na, Br dans les eaux
•	Fer, Bauxite, Fluorine Barytine, oxyde	PH, métaux et traces
	W	Turbidité, SO4, As
		Fluor dans les eaux
		Fe-Mn, SO4
Rhône-Alpes	Charbon, Uranium, sulfures Cu-Zn,	K, Na, Br dans les eaux
	sulfures Pb-Zn-Ag-Sb, Fluorine et	,
	barytine, sel, amiante	Turbidité, SO4, As Fluor dans les eaux
		U dans les eaux
		O dans les eaux et les sols, lauoli

Annexe 2

Caractérisation de la biodisponibilité en risque sanitaire

Définitions de la bioaccessibilité et biodisponibilité et méthodes de mesure

La **bioaccessibilité** est la fraction de polluant qui est extraite par les fluides digestifs au niveau du tractus gastro-intestinal (Figure 1). Sa mesure se fait via un test in vitro dont l'objectif est de simuler les conditions chimiques de la digestion.

La biodisponibilité absolue est la fraction de composés ingérés, inhalés ou appliqués à la surface de la peau, qui est absorbée et atteint la circulation systémique. La biodisponibilité absolue se définit comme le ratio de la dose absorbée sur la dose administrée (Basta et Gradwhohl, 2000; Ruby et al., 1996). La biodisponibilité se mesure directement par un prélèvement sanguin ou par un dosage sur un organe cible.

La notion de **biodisponibilité orale** intègre la solubilisation du contaminant dans la tube digestif ou lumière gastro-intestinale (bioaccessibilité), le transport du contaminant au travers de la barrière gastro-intestinale et la fraction métabolisée du contaminant.

Ainsi, la fraction biodisponible d'un contaminant est inférieure à la fraction bioaccessible de ce même contaminant.

Biodisponibilité absolue (%) =
$$\frac{\text{dose absorbée}}{\text{dose administrée}} \times 100$$
.

La notion de **biodisponibilité relative** vise à comparer l'absorption d'un composé sous deux spéciations (tel que le carbonate de plomb versus l'acétate de plomb), ou du même composé administré par différents milieux (tels que la nourriture, le sol ou l'eau) (Kelley et al., 2002).

La biodisponibilité relative peut être exprimée comme le ratio de la fraction adsorbée dans le milieu d'exposition, ici le sol, sur la fraction absorbée de ce même contaminant dans la matrice utilisée pour les études de toxicité (Semple et Kieron, 2004).

Biodisponibilité relative (%) =
$$\frac{\text{Dose adsorbée dans le sol}}{\text{Dose absorbée dans le milieu utilisé dans les études de toxicité}} \times 100$$

Nota : la biodisponibilité relative mentionnée ci-après fait référence à cette dernière définition de Semple et Kieron.

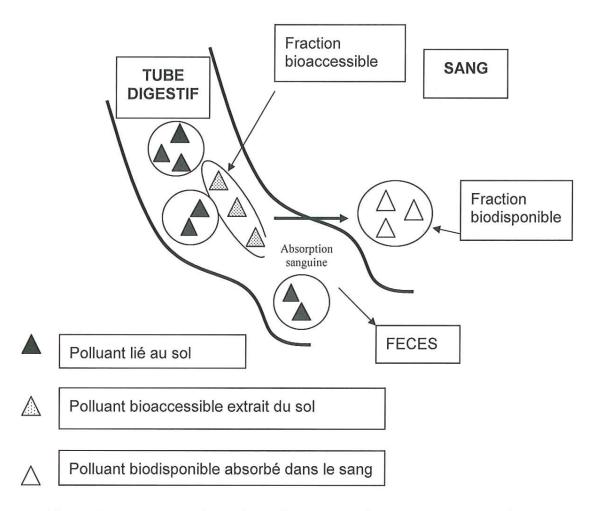


Figure 1 : Représentation schématique des notions de bioaccessibilité et biodisponibilité

Utilisation de la bioaccessibilité et de la biodisponibilité en évaluation du risque

La biodisponibilité:

Une limite importante pour l'utilisation de la biodisponibilité en évaluation de risque est qu'elle nécessite une mesure sur l'homme ou sur un modèle animal dont la physiologique digestive est proche de celle de l'homme. La faisabilité de ces mesures semble difficile puisque celles-ci sont coûteuses, longues et nécessitent un savoir-faire expérimental de pointe.

En outre, l'utilisation de la biodisponibilité absolue imposerait que les valeurs toxicologiques de référence (VTR) soient construites à partir de doses internes (ou absorbées), ce qui n'est pas le cas pour la majorité des substances rencontrées. En conséquence, l'utilisation de cette notion n'est actuellement pas possible.

Néanmoins, il est possible d'utiliser des facteurs de biodisponibilités relatives issus de la littérature et mesurés pour des sols dont les propriétés (pH, teneur en matière organique, texture notamment) sont similaires à celles des sols rencontrés sur le site et pour des historiques de contamination identiques. Dans ce cas, il faut que l'opérateur s'assure que la matrice utilisée dans le calcul de la biodisponibilité relative corresponde à celle qui a été utilisée dans la construction de la VTR qu'il a sélectionné, sur la base des critères actuellement admis pour une telle sélection.

Dans ce cas, le dose d'exposition ajustée par la biodisponibilité relative se calcule comme suit :

Avec $DE_{ajustée}$: la dose d'exposition ajustée, $DE_{concentration\ totale}$: la dose d'exposition calculée à partir de la concentration totale, BR : la biodisponibilité relative

La bioaccessibilité :

En toute rigueur, la bioaccessibilité d'un polluant dans un sol devrait être ramenée à la bioaccessibilité de ce polluant dans la matrice ayant servi de base à l'élaboration de la VTR. Toutefois, la fraction bioaccessible étant équivalente à une dose administrée, et étant donnée la difficulté de renseigner la bioaccessibilité du polluant dans la matrice ayant servi de base à l'élaboration de la VTR (cette donnée n'est pas disponible dans la littérature), il est possible d'utiliser la bioaccessibilité en vue de corriger la dose d'exposition calculée à partir de la concentration totale.

Avec $DE_{ajustée}$: la dose d'exposition ajustée, $DE_{concentration\ totale}$: la dose d'exposition calculée à partir de la concentration totale, FB : la fraction bioaccessible.

Ci-dessous, une illustration de ce calcul est proposée pour un scénario relatif à un enfant (350 j d'exposition par an, VTR = 3,5µg kg⁻¹ jour⁻¹)¹.

Les résultats montrent que l'utilisation de la fraction bioaccessible mesurée pour cet échantillon permet de réduire d'un facteur 5 les indices de risque calculés selon les méthodes de calculs de l'évaluation du risque.

Concentration en plomb (mg/kg)	Fraction bioaccessible	Dose administrée ajustée ¹ (mg/kg)	Indice de Risque (IR) non ajusté	IR ajusté ¹
2140	0,2	428	5,8	1,1

Tableau 1 : Exemple de calcul d'indice de risque intégrant ou non la mesure de bioaccessibilité.

^{1 «} ajustée » entend prise en compte de la fraction de plomb bioaccessible dans les sols

¹: En aucun cas les calculs réalisés ici n'ont servi à la mise en place de mesure de gestion des terres concernées. La mesure de la bioaccessibilité du plomb, dans ce cas, s'est faite en utilisant le test RIVM (INERIS, 2005).

Une limite majeure associée à la prise en compte de la bioaccessibilité est l'absence de validation de certains de ces tests à partir de mesures sur animal. En effet, il faut pouvoir s'assurer que la méthode utilisée pour la mesure de la bioaccessibilité soit représentative des mécanismes physiologiques de la digestion et que les résultats obtenus par ces méthodes permettent d'approcher la biodisponibilité de façon pertinente.

En outre, en procédant à ce calcul, il est admis que la bioaccessibilité du polluant dans la matrice ayant servi à l'élaboration de la VTR est proche de 100 %, ce qui reste à démontrer.

En l'état actuel des connaissances et de l'expérience acquise sur ces notions, on recommande donc à l'expert en charge de l'étude de ne pas recourir directement à la notion de biodisponibilité relative dans le calcul de risque. En effet, les éléments tangibles démontrant le bien fondé des valeurs pouvant être retenues pour la biodisponibilité demeurent à établir. Par conséquent, il conviendra d'employer la concentration totale dans ces évaluations des risques.

En revanche, l'expérience ayant prouvé qu'on ne peut pas raisonnablement exclure que seule une partie de la concentration totale est effective, on propose de moduler le résultat du calcul de risque classiquement réalisé. Cette modulation peut porter en premier lieu sur la nature du porteur minéralogique. Pratiquement, on suggère de s'appuyer sur les études existantes. En particulier dans le cas du Plomb, on pourra se référer au tableau suivant reliant la biodisponibilité relative à la nature minéralogique du porteur.

Potentiellement faiblement biodisponible < 25 %	Biodisponibilité intermédiaire 25 to 75 %	Biodisponibilité élevée > 75 %
Galène Anglésite Oxydes de Plomb Pb(O) PbFe Sulfates Pb natif	Oxydes de Pb Oxydes de plomb ferrique PbFe Phosphates de plomb Scories	Cérusite PbMn Oxydes

Biodisponibilité relative de différentes formes minérales du plomb (source US-EPA, 1999).

En ce qui concerne d'autres substances, la littérature est moins riche et les taux de biodisponibilité moins éprouvés. En particulier, le cas de l'arsenic est révélateur. En effet, la littérature et le retour d'expérience INERIS sur des sites miniers montrent que la bioaccessibilité de l'As est faible (de l'ordre de 10 % de la concentration totale d'As). Sur ces sites, il apparaît que l'arsenic est essentiellement lié aux oxydes de fer et aux sulfures. En revanche, il n'est pas à exclure que, dans des zones calcaires, des associations entre l'arsenic et les carbonates accroissent la bioaccessibilité de cette substance. Toutefois, ceci n'est qu'une hypothèse et demeure à vérifier.

À la vue de l'ensemble de ces éléments, on recommande donc que la notion de biodisponibilité ne puisse être employée que pour diminuer la valeur du niveau de risque estimé par calcul. En effet, les calculs de risque en retenant la concentration totale sont majorants et supposent implicitement que la totalité du polluant est biodisponible.

Enfin, on réserve la possibilité de pondérer le résultat du calcul de risque par la granulométrie du sol. En effet, plus le sol est grossier, moins il est facilement accessible pour l'ingestion. Néanmoins, contrairement, à la nature minéralogique du porteur, le pourcentage de la fraction fine peut amener soit à augmenter, soit à diminuer le niveau de risque établi par le calcul. En effet, dans le scénario retenu pour le calcul, la quantité de sol ingérée est une valeur moyenne estimée à partir d'un sol classique. Il est donc possible que dans le cas de sol où la fraction de fines est supérieure à 30 % (respectivement < 10 %), l'accessibilité soit plus élevée (respectivement moins élevée) que celle retenue dans le scénario du calcul.

Annexe 3

Rappel sur la nouvelle démarche de gestion des sites et sols pollués en France

RAPPEL SUR LA GESTION DES SITES ET SOLS POLLUÉS

Pour **les sols**, une nouvelle démarche de gestion des sites et sols pollués est mise en place en 2007, et une partie des outils est déjà disponible sur le site du MEDAD. L'objectif est de maîtriser les sources et les impacts afin de garantir la santé des populations riveraines ainsi que la préservation de l'environnement et notamment des ressources en eau.

Les retours d'expériences de l'utilisation des outils méthodologiques ont en effet fait ressortir la nécessité de réaliser un certain nombre d'ajustements et de clarifications. Pour ce faire :

- les bases essentielles de la politique de gestion des risques ont été réexaminées en 2006 en tenant compte de l'usage et des règles qui permettent une mise en œuvre de cette politique sur des critères argumentés, transparents et équilibrés, prenant par ailleurs pleinement en compte les dispositions réglementaires déjà en vigueur;
- les guides méthodologiques existants ont été complétés et actualisés (la liste de l'ensemble des documents et des outils figure en annexe 1);
- en fonction des bases et des règles détaillées ci-après, deux démarches de gestion sont ainsi proposées : la démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM) et de plan de gestion.

Les démarches de gestion, que ce soit une Interprétation de l'État des Milieux (IEM) ou un plan de gestion, doivent reposer sur une phase préliminaire d'étude et de réflexion. Il s'agit de réaliser un bilan factuel de l'état du milieu ou du site étudié. Cet état des lieux, appelé **schéma conceptuel**, constitue les fondations sur lesquelles toute démarche de gestion doit reposer. Il doit permettre de véritablement appréhender l'état des pollutions des milieux et les modes de contamination potentiels au regard des activités et des usages qui existent sur le site étudié et dans son environnement.

Le schéma conceptuel doit, d'une manière générale, permettre de préciser les relations entre :

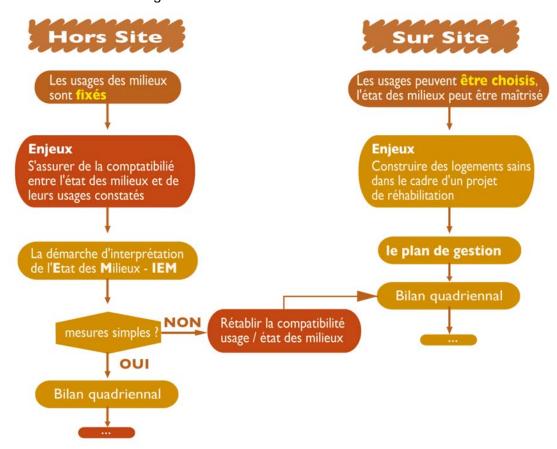
- les sources de pollution ;
- les différents milieux de transfert et leurs caractéristiques ;
- l'étendue des pollutions ;
- les populations riveraines, les usages du site et des milieux, les milieux d'exposition ;
- les ressources naturelles à protéger.

La construction du schéma conceptuel repose sur une collecte d'informations pouvant nécessiter des recherches documentaires, des enquêtes auprès des utilisateurs du site ou du milieu, et/ou des campagnes de mesures réalisées sur place.

Selon la démarche de gestion considérée, le schéma conceptuel peut être unique (cas de la démarche IEM) ou évolutif (plan de gestion).

En revanche, lorsqu'elles s'avèrent nécessaires et particulièrement urgentes, des premières mesures de maîtrise des pollutions et de protection des personnes peuvent être mises en place sans attendre l'aboutissement de la caractérisation de l'état des milieux.

Les deux démarches de gestion :



L'une consiste, lorsque les usages des milieux sont fixés, à s'assurer que l'état des milieux est compatible avec les usages constatés : il s'agit de la démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM).

Cette démarche consiste ensuite à comparer les résultats donnés par les campagnes de mesures dans les milieux d'exposition avec :

- l'état initial de l'environnement ou à l'état des milieux naturels voisins ;
- les valeurs de gestion et les dispositions réglementaires en vigueur (ex. directive Cadre sur l'eau, ZICO, ZNIEFF...).

L'autre concerne les situations qui permettent d'agir aussi bien sur l'état du site (par des aménagements ou des mesures de dépollution) que sur les usages qui peuvent être choisis et adaptés : il s'agit du plan de gestion.

La mise au point d'un plan de gestion est basée sur un processus progressif et itératif entre :

- la connaissance des milieux, l'acquisition de connaissance sur les populations, sur les ressources naturelles à protéger ainsi que le choix des usages dans le cas d'un projet de réhabilitation;
- les contraintes réglementaires de toute nature ;
- les mesures de maîtrise des sources primaires, les mesures de maîtrises des impacts;
- le devenir et la gestion des terres excavées ;
- les différentes mesures de gestion : les actions de réhabilitation (excavation, traitement sur site ou hors site), les mesures constructives actives ou passives, les mesures de confinement, les possibilités de régénération ou d'atténuation naturelle,
- les outils de conservation de la mémoire et de restriction d'usage (SUP...) ;
- le contrôle et le suivi de l'efficacité des mesures de gestion.

Lorsque les caractéristiques du plan de gestion ne permettent pas de supprimer tout contact possible entre les pollutions et les personnes, alors les risques sanitaires potentiels liés aux expositions résiduelles, doivent être évaluées et appréciées.

Annexe 4

Directives, Circulaires et Décrets applicables au PPRM dans le cadre de la gestion des eaux

- Directive Cadre sur l'Eau DCE 2000/60 du 23/10/00
 - Directive 2006/118/CE du 12 décembre 2006
 - Circulaire DCE 2005/12 du 28/07/05
 - Circulaire DCE 2006/18 du 21/12/06
 - Circulaire DCE 2007/23 du 7/05/07
 - Décret N°2005-378 du 20/04/05
 - Arrêté du 11/01/07

LISTE DES DIRECTIVES, CIRCULAIRES ET DÉCRETS APPLICABLES AU PPRM DANS LE CADRE DE LA GESTION DES EAUX

Au niveau européen, dans le domaine de l'eau, le texte de référence est la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60 du 23 octobre 2000) qui fixe plusieurs objectifs :

- atteindre le « bon état » des milieux aquatiques en 2015, sauf impossibilités motivées;
- ne pas dégrader le milieu aquatique existant ;
- assurer la « continuité écologique » des cours d'eau ;
- supprimer les rejets de substances dangereuses prioritaires (41 molécules listées en annexes IX et X de la DCE.).

Un programme est en cours (2005-2006) pour définir le « bon état » des milieux aquatiques, tant pour les paramètres physico-chimiques qu'écologiques.

La Directive 2006/118/CE du Parlement européen et du Conseil vise à prévenir et lutter contre la pollution des eaux souterraines. Les mesures prévues à cette fin comprennent :

- des critères pour évaluer l'état chimique des eaux ;
- des critères pour identifier les tendances à la hausse significatives et durables de concentrations de polluants dans les eaux souterraines et pour définir les points de départ d'inversion de ces tendances;
- la prévention et la limitation des rejets indirects (après percolation à travers le sol et le sous sol) de polluants dans les eaux souterraines

Au niveau français, la circulaire DCE 2005/12 du 28 juillet 2005 définit le « bon état » des milieux aquatiques de surface et fournit des informations sur :

- la liste des 41 substances prioritaires dont 4 substances métalliques (Cd, Pb, Hg, Ni), avec leurs valeurs seuils provisoires ;
- le support à prélever : eau ou sédiment selon les substances recherchées ;
- les modalités de calcul (moyenne, médiane...) ;
- les critères à prendre en compte.

Le texte de cette circulaire est fourni en annexe 2.

La circulaire DCE 2006/18 du 21 décembre 2006 définit le « bon état » pour les eaux souterraines et propose des valeurs-seuils provisoires applicables pendant la phase transitoire.

La circulaire DCE/2007/23 du 7 mai 2007 modifie la circulaire DCE 2005/12 et définit des « normes de qualité environnementale provisoires (NQEp) » des 41 substances impliquées dans l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau ainsi que des substances pertinentes du programme national de réduction des substances

dangereuses dans l'eau. Pour les métaux et métalloîdes, elle indique des valeurs à calculer en fonction du bruit de fond géochimique.

La caractérisation de la qualité des eaux par le système d'évaluation SEQ-Eau doit être abandonnée en 2007, pour être remplacée par un nouveau système commun au niveau européen.

Le décret n° 2005-6378 du 20 avril 2005 relatif au programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses prévoit :

- un programme national d'action destiné à prévenir, réduire ou éliminer la pollution des eaux de surface et de transition pour des substances dangereuses, citées en annexe 2 :
- des arrêtés de normes de qualité pour toutes les substances dangereuses citées en annexe 2 :
- des autorisations de déversements, devant prendre en compte les objectifs du programme d'action et les normes de qualité.

L'arrêté du 11 janvier 2007 fixe des limites et des références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine en application de code de la santé publique, notamment des limites de qualité des eaux brutes de toutes origines pour la production d'eau destinée à la consommation humaine pour certains éléments métalliques (arsenic, cadmium, chrome, zinc...).

Plusieurs types d'usages des eaux sont envisageables :

- pour les cours d'eau : production d'eau potable (AEP et industries alimentaires), loisirs et sports aquatiques, irrigation, abreuvage, aquaculture auxquels est ajoutée une « potentialité biologique » pour exprimer l'aptitude de l'eau à soutenir les équilibres biologiques ;
- pour les eaux souterraines : production d'eau potable, utilisation dans l'industrie, énergie, abreuvage des animaux, irrigation auxquels vient s'ajouter l' « état patrimonial » destiné à fournir une indication sur le degré de pollution des nappes souterraines.

La qualité de l'eau peut donc être directement évaluée par son aptitude à être utilisée pour différents usages potentiels en fonction d'une série d'altérations mesurées par des concentrations en éléments polluants.

Annexe 5

Gammes de valeurs « ordinaires » et d'anomalies naturelles dans les sols. INRA.

► Teneurs totales en éléments traces dans les sols (France) •

▼ Gammes de valeurs "ordinaires" et d'anomalies naturelles

Les gammes de valeurs présentées ci-dessous correspondent à divers horizons de sols, pas seulement les horizons de surface labourés. Les teneurs sont exprimées en mg/kg de "terre fine" (< 2 mm). Les numéros entre parenthèses renvoient à des types de sols effectivement analysés, succinctement décrits et localisés ci-dessous.

aaa	gamme de valeurs couramment observées dans les sols "ordinaires" de toutes granulométries	gamme de valeurs observées dans le cas d'anomalies naturelles modérées	gamme de valeurs observées dans le cas de fortes anomalies naturelles
As	1,0 à 25,0	30 à 60 (<u>1</u>)	60 à 284 (<u>1</u>)
Cd	0,05 à 0,45	0,70 à 2,0 (<u>1</u>)(<u>2</u>)(<u>3</u>)(<u>4</u>)	2,0 à 46,3 (<u>1</u>)(<u>2</u>)(<u>4</u>)
Cr	10 à 90	90 à 150 (<u>1</u>)(<u>2</u>)(<u>3</u>)(<u>4</u>)(<u>5</u>)	150 à 3180 (1)(2)(3)(4) (5)(8)(9)
Co	2 à 23	23 à 90 (1)(2)(3)(4)(8)	105 à 148 (<u>1</u>)
Cu	2 à 20	20 à 62 (1)(4)(5)(8)	65 à 160 (<u>8</u>)
Hg	0,02 à 0,10	0,15 à 2,3	a ,
Ni	2 à 60	60 à 130 (<u>1)(3)(4)(5</u>)	130 à 2076 (1)(4)(5)(8) (9)
Pb	9 à 50	60 à 90 (<u>1)(2)(3)(4)</u>	100 à 10180 (<u>1</u>)(<u>3</u>)
Se	0,10 à 0,70	0,8 à 2,0 (<u>6</u>)	2,0 à 4,5 (Z)
TI	0,10 à 1,7	2,5 à 4,4 (<u>1</u>)	7,0 à 55,0 (<u>1</u>)
Zn	10 à 100	100 à 250 (<u>1</u>)(<u>2</u>)	250 à 11426 (<u>1</u>)(<u>3</u>)

- (1) zones de "métallotectes" à fortes minéralisations (à plomb, zinc, barytine, fluor, pyrite, antimoine) au contact entre bassins sédimentaires et massifs cristallins. Notamment roches liasiques et sols associés de la bordure nord et nord-est du Morvan (Yonne, Côte d'Or).
- (2) sols argileux développés sur certains calcaires durs du Jurassique moyen et supérieur (Bourgogne, Jura).
- (3) paléosols ferrallitiques du Poitou ("terres rouges").
- (4) sols développés dans des "argiles à chailles" (Nièvre, Yonne, Indre).
- (5) sols limono-sableux du Pays de Gex (Ain) et du Plateau Suisse.
- (6) "bornais" de la région de Poitiers (horizons profonds argileux).
- (7) sols tropicaux de Guadeloupe.
- (8) sols d'altération d'amphibolites (région de La Châtre Indre).
- (9) matériaux d'altération d'amphibolites (région de La Châtre Indre)

http://etm.orleans.inra.fr/gammes3.htm



Centre scientifique et technique Service ressources minérales

3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34