

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-06-51198/R01

04/05/2006

**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**

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

PRELIMINAIRE

Le présent guide d'élaboration des PPR Miniers a été élaboré sous la coordination et la direction scientifique de Christophe DIDIER, directeur adjoint et délégué scientifique de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS.

Il s'agit d'un ouvrage collectif, établi sous l'égide du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie et résultant du travail de différents organismes impliqués dans l'évaluation des risques liés à l'après-mine : INERIS, GEODERIS, Ecole des Mines De Paris, BRGM, CSTB. Plusieurs représentants des DRIRE ont également participé activement à son élaboration.

Trois groupes d'experts nationaux ont été constitués pour traiter les différentes thématiques abordées dans le document.

Le groupe « mouvements de terrains » était animé par Jean-Pierre JOSIEN (GEODERIS).

Le groupe « inondations » était animé par Emmanuel LEDOUX (Ecole des Mines de Paris).

Le groupe « gaz de mine » était animé par Zbigniew POKRYSZKA (INERIS).

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	9
CHAPITRE 1 : PLACE ET ROLE DES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS.....	11
1. LE CONTEXTE DE L'APRÈS-MINE EN FRANCE.....	13
1.1 Bref historique de l'exploitation minière française	13
1.2 Les risques et nuisances dans la phase « après-mine ».....	14
1.3 Principaux paramètres influant sur la nature des risques et nuisances.....	17
2. LE PPRM : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PRÉVENTION DES RISQUES	19
2.1 L'outil PPR dans la politique française de prévention des risques	19
2.2 Quelques principes du Droit minier	21
2.2.1 Différences entre mines et carrières.....	21
2.2.2 La procédure d'arrêt des travaux miniers	21
2.3 Le PPRM : cadre réglementaire et spécificités.....	22
3. L'ÉLABORATION DES PPRM.....	25
3.1 Procédure administrative d'élaboration	25
3.2 Les pièces constitutives réglementaires.....	26
3.3 Les principales phases de réalisation des PPRM	28
3.4 Quelques principes d'élaboration.....	29
CHAPITRE 2 : PHENOMENES ET MECANISMES INITIATEURS DES DESORDRES D'ORIGINE MINIERE.....	33
1 PROBLÉMATIQUE DE L'EAU EN RAPPORT AVEC LES TRAVAUX MINIERS	35
1.1 Origine des phénomènes redoutés	35
1.1.1. Interaction des travaux miniers avec le cycle de l'eau	35
1.1.2 Les perturbations hydrologiques liées à l'arrêt de travaux miniers	37
1.2 Les phénomènes redoutés.....	37
1.2.1 Modification du régime des émergences	37
1.2.2. Apparition de zones détrempées ou de marécages	40
1.2.3 Inondation des sous-sols et points bas.....	42
1.2.4 Modification du régime des cours d'eau	42
1.2.4.1 Accroissement du débit des cours d'eau.....	42

1.2.4.2	Diminution du débit d'étiage	43
1.2.5	Inondations brutales	44
2.	LES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	45
2.1	Origine des phénomènes redoutés	45
2.1.1	Les travaux souterrains	46
2.1.2	Les travaux à ciel ouvert.....	46
2.1.3	Les ouvrages de dépôts	47
2.1.4	Synthèse des désordres possibles par type d'ouvrages miniers	48
2.2	Les phénomènes redoutés.....	53
2.2.1	Les tassements.....	53
2.2.2	Les affaissements progressifs	54
2.2.3	Les effondrements localisés	60
2.2.4	Les effondrements généralisés.....	63
2.2.5	Les glissements ou mouvements de pente.....	66
2.2.6	Les coulées	69
2.2.7	Les écroulements rocheux.....	71
3.	L'EMISSION EN SURFACE DE GAZ DE MINE.....	73
3.1	Origine du phénomène redouté.....	73
3.2	Le phénomène redouté	75
3.2.1	Description et effets	75
3.2.2	Mécanismes ou scénarios initiateurs.....	79
CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION, HIERARCHISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA ET DES ENJEUX		85
1.	GÉNÉRALITÉS SUR L'ALÉA	87
1.1	Définition de l'aléa.....	87
1.2	Principes de qualification de l'aléa	88
1.2.1	Qualification des classes d'intensité	88
1.2.2	Qualification des classes de prédisposition	89
1.2.3	Qualification des classes d'aléa.....	91
1.3	Cartographie de l'aléa	92
1.3.1	Principes cartographiques	92
1.3.2	Extension des effets en surface.....	92
1.3.3	Marges d'incertitudes accompagnant la cartographie de l'aléa	93
1.4	Collecte des informations : la phase informative	93
1.4.1	Principes et objectifs de la phase informative	93

1.4.2	Collecte des informations	94
1.4.2.1	Sources d'informations présentes dans les archives écrites	94
1.4.2.2	Collecte des informations lors de reconnaissances sur site	96
1.4.3	Investigations complémentaires	97
2.	L'ALEA INONDATIONS	97
2.1	Qualification de l'aléa inondations	97
2.1.1	Aléa « modification du régime des émergences »	97
2.1.2	Aléa « apparition de zones détremées ou de marécages	99
2.1.3	Aléa « Inondation des sous-sols et points bas »	99
2.1.4	Aléa « modification du régime des cours d'eau »	100
2.1.4.1	Crués et inondations	100
2.1.4.2	Etiages	101
2.1.5	Aléa « Inondations brutales »	102
2.2	Cartographie de l'aléa inondations	103
2.3	Recueil des données nécessaires à l'analyse de l'aléa inondations	105
2.3.1	Recherche de données d'archives	105
2.3.2	Données à rechercher sur site	106
2.3.3	Investigations complémentaires	106
3.	L'ALÉA MOUVEMENTS DE TERRAINS	106
3.1	Qualification de l'aléa mouvements de terrain	106
3.1.1	L'aléa « tassement »	107
3.1.2	L'aléa « affaissement progressif »	109
3.1.3	L'aléa « effondrement localisé »	114
3.1.4	L'aléa « effondrement généralisé »	118
3.1.5	L'aléa « glissement ou mouvement de pente »	120
3.1.6	L'aléa « coulée »	121
3.1.7	L'aléa « écroulement rocheux »	123
3.2	Cartographie de l'aléa mouvements de terrain	124
3.3	Recueil des données nécessaires à l'analyse de l'aléa mouvements de terrain	125
3.3.1	Recherche de données d'archives	125
3.3.2	Données à rechercher sur site	126
3.3.3	Investigations complémentaires	126
4.	L'ALÉA EMISSION DE GAZ DE MINE EN SURFACE	126
4.1	Qualification de l'aléa émission en surface de gaz de mine	126

4.1.1 Intensité du phénomène	126
4.1.2 Prédisposition	128
4.2 Cartographie de l'aléa émission de gaz de mine.....	130
4.3 Recueil des données nécessaires à l'analyse de l'aléa émission de gaz de mine	132
4.3.1 Recherche de données d'archives	132
4.3.2 Données à rechercher sur site.....	132
4.3.3 Investigations complémentaires	133
BIBLIOGRAPHIE.....	135
LISTE DES ANNEXES.....	139

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Après 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, 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 pour ce qui concerne le schéma de circulation des eaux (inondations des points bas, perturbation du régime des cours d'eau) que pour ce qui concerne leur qualité (pollution des eaux ou des sols). Notons toutefois que le volet environnemental ne sera pas traité au sein du présent ouvrage mais fera l'objet d'un document ultérieur.

Afin d'afficher ces différents risques et de les gérer au mieux, l'Etat s'est doté d'un outil réglementaire opérationnel et performant : les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM). Etablis 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 la mise en œuvre de ces PPRM. Il est destiné à l'ensemble des acteurs qui interviennent lors de l'élaboration d'un PPRM (services de l'Etat, collectivités, bureaux d'études...). Outre une présentation générale de l'outil PPRM (objectifs, procédure d'élaboration), il s'attache également à détailler les principes techniques et réglementaires qui gouvernent à l'élaboration des différentes phases (aléas, enjeux, zonage réglementaire...).

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 en 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 risques ou des nuisances d'origine minières en surface 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.

CHAPITRE 1 : PLACE ET ROLE DES PLANS DE PREVENTION DES RISQUES MINIERS

1. LE CONTEXTE DE L'APRES-MINE EN FRANCE

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^{ème} au III^{ème} 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^{ème} 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^{ème} – XIII^{ème} 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 (XVII^{ème} – XVIII^{ème} 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^{ème} 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^{ème} 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 et 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, la seule industrie minière active en France métropolitaine¹ résulte de l'extraction du sel, par mine souterraine ou par dissolution.

La France se trouve donc désormais confrontée à la gestion de la phase « d'après-mine », bien plus qu'à la gestion de l'activité minière à proprement parler. Cette situation et ces problématiques nouvelles ont conduit l'Etat 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 terme 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.

1.2 LES RISQUES ET NUISANCES DANS LA PHASE « APRES-MINE »

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. Même non exploités, 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 de perturber l'utilisation possible des terrains concernés.

L'importance des travaux menés au sein du sous-sol est souvent d'une ampleur telle qu'un retour à l'état initial est totalement impossible. A titre d'exemple, on estime, au sein du seul bassin ferrifère lorrain, à environ 40 000 km le linéaire des galeries de mines forées en souterrain (soit une longueur équivalente à la circonférence du globe terrestre !).

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

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

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 gisement 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 pour ce qui concerne le devenir à long terme des travaux miniers.

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, phénomènes qui ne seront toutefois pas abordés ici.

Nous nous contenterons, ci-dessous, de décrire très courtement les principaux risques et nuisances traités dans cet ouvrage et 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.

Inondation des points bas ou perturbation du débit des rivières

A la fin des travaux d'extraction, l'arrêt des pompages d'exhaure 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. A 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 ou de la rupture d'une digue ou d'un barrage étanche retenant un gros réservoir d'eau en amont.

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.

Pour ce qui concerne les travaux souterrains, les instabilités les plus caractéristiques susceptibles d'affecter les terrains de surface se manifestent sous forme de tassements, d'affaissements souples ou d'effondrements susceptibles de présenter un caractère brutal. Les dimensions de ces phénomènes d'instabilité, ainsi que leur dangerosité dépendront étroitement des contextes géologiques et d'exploitation caractérisant la zone concernée.

Dans le cas de travaux miniers menés à ciel ouvert, c'est principalement la déstabilisation de masses rocheuses depuis les parois des fronts de taille qui constitue le phénomène à redouter. Suivant les caractéristiques de ces fronts, les instabilités peuvent varier de la simple chute de pierres à un écroulement majeur mettant en jeu des volumes rocheux supérieurs à plusieurs dizaines de milliers de m³.

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.

Emanations 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 constitué 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).

1.3 PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUANT SUR LA NATURE DES RISQUES ET 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 susceptible d'affecter un ancien site minier, quel qu'il soit.

Les risques d'inondations, de mouvements de terrain ou d'émission de gaz x 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 sensiblement similaires en termes de désordres et nuisances prévisibles à terme.

Parmi ces principaux paramètres, on en détaillera quatre : la nature du matériau extrait, la structure du gisement, la méthode d'exploitation et la morphologie de la topographie.

La nature du matériau extrait et la minéralogie des terrains encaissants

La nature du matériau extrait joue 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.

Enfin, la nature du minerai et des terrains encaissants joue évidemment un rôle sur la tenue des ouvrages miniers et, de fait, 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.

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).

La configuration géologique du dépôt influe notamment sur le risque de mouvements de terrain, notamment pour ce qui concerne la nature et l'extension des désordres possibles.

Ainsi, les exploitations menées au sein de couches sédimentaires en plateaux constituent souvent, lorsque les travaux sont peu profonds, la configuration la plus défavorable en termes d'intensité des désordres (notamment lorsque la puissance exploitée est importante) aussi bien que de superficie potentiellement concernée (plusieurs centaines voire milliers d'hectares pour une même exploitation).

A l'inverse, dans la majorité des cas, les gisements filoniens présentent des puissances de minerai relativement limitées, un pendage très marqué et des terrains encaissants souvent résistants. Les principaux risques pour la sécurité des personnes et des biens seront donc souvent concentrés en tête de filon, sur des superficies relativement limitées. Il en va de même pour la plupart des gisements en amas dont les dimensions latérales sont souvent assez réduites.

A mi-chemin entre ces deux configurations, les désordres prévisibles à l'aplomb de gisements stratifiés, moyennement à fortement pentés, devront être étudiés au cas par cas, à la lumière d'autres paramètres décisifs (puissance de la couche et méthode d'exploitation notamment).

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

La méthode d'exploitation mise en œuvre joue un rôle décisif sur la nature et l'intensité du risque de mouvements de terrain et du risque d'émission de gaz de mine.

De nombreux ouvrages se sont attachés à recenser, en les classifiant les différentes méthodes d'exploitation minières mises en œuvre sur notre territoire. Ils mettent en évidence la très grande diversité de techniques développées au cours des siècles, en fonction des configurations rencontrées. Ces classifications différencient parfois la nature des gisements (dépôts sédimentaires, gisements intrusifs) ou parfois les caractéristiques de la couche (puissance, pendage...).

Nous privilégierons pour notre part une classification qui différencie :

- les exploitations permettant un traitement systématique des vides créés par l'exploitation, soit par remblayage, soit par foudroyage, soit par une convergence naturelle des terrains qui referment progressivement ces vides ;
- les exploitations laissant, après l'arrêt définitif des travaux, des vides miniers importants, susceptibles d'évoluer dans le temps.

Dans une optique d'évaluation des risques miniers, la classification proposée permet d'identifier deux types d'exploitation qui présentent des comportements fondamentalement différents en terme de stabilité à long terme des terrains de surface, mais également en terme de remontée des eaux et de migration de gaz de mine.

On veillera à ne pas confondre le concept d'exploitation laissant des vides résiduels après exploitation avec celui d'*exploitation partielle* (technique d'exploitation dans laquelle on extrait uniquement une partie du matériau exploitable) que l'on oppose classiquement à *exploitation totale* (on extrait quasiment l'intégralité du matériau exploitable).

Si la quasi-totalité des techniques d'exploitation laissant des vides résiduels sont des exploitations partielles, la réciproque n'est pas forcément vraie. Pour de plus amples informations techniques, on se reportera à l'annexe A qui décrit sommairement quelques-unes des principales méthodes d'exploitation utilisées dans les mines françaises.

La morphologie de la topographie

Les nuisances relatives à l'eau souterraine ont toutes pour origine la remontée de la surface piézométrique de la nappe suite à l'arrêt des pompes 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 hydrogéologique. 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. LE PPRM : UN OUTIL AU SERVICE DE LA PREVENTION DES RISQUES

2.1 L'OUTIL PPR DANS LA POLITIQUE FRANÇAISE DE PREVENTION DES RISQUES

Il est de la responsabilité de l'Etat 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 sous-sol (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'Etat 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'Etat, 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 risque 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. A 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, pour 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 de non-cohérence 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 règles définies par le règlement.

Bénéficiant d'un retour d'expérience d'une petite dizaine d'années pour 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 4000 PPR naturels étaient approuvés fin 2003 et l'objectif du gouvernement est d'atteindre les 5000 PPR naturels approuvés en 2005, ce qui traduit une volonté forte d'aboutir à la réalisation 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'Etat 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 QUELQUES PRINCIPES DU DROIT MINIER

2.2.1 DIFFERENCES ENTRE MINES ET CARRIERES

L'esprit du droit minier français, tel qu'on le connaît aujourd'hui, date du début du XIX^{ème} siècle. Soucieuse d'assurer la mainmise de l'Etat 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'Etat 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. A 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.

2.2.2 LA PROCEDURE D'ARRET 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 par les dispositions du titre IV, chapitre III du code minier intitulé : *De l'arrêt des travaux miniers et de la prévention des risques*, en particulier les articles 91, 92 et 93, ainsi que par les

prescriptions du titre III, chapitre V du décret n° 95-696 du 9 mai 1995 relatif à l'ouverture des travaux miniers et à la police des mines intitulé : *Arrêt des travaux et d'utilisation d'installations minières*, modifié en dernier lieu par le décret n° 2001-209 du 6 mars 2001, en particulier les articles 44 à 49-2.

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 des travaux 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 et 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 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 de mise en sécurité mises en œuvre par l'exploitant lors de la procédure d'arrêt des travaux. 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.

2.3 LE PPRM : CADRE REGLEMENTAIRE ET SPECIFICITES

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

L'Etat 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 13² 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.

² Cet article concerne les procédures et conditions d'indemnisation des victimes par l'intermédiaire du fonds de prévention des risques naturels.

Les textes sont très clairs sur les très fortes similitudes entre PPRN et PPRM, tant pour 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 pris en compte, au titre de l'article 2 du décret n°95-101 du 5 octobre 1995, 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 16.6.00). Le bien fondé d'une telle prescription demeure évidemment conditionné à la justification d'un caractère prioritaire pour ce qui concerne la nature du risque, l'ampleur des conséquences prévisibles et la probabilité de sa survenue.

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.

On notera enfin que l'Agence de prévention et de gestion des risques miniers sera associée à l'élaboration des PPRM (**décret n° 2002-353** du 15 mars 2002 relatif à l'agence de prévention et de surveillance des risques miniers).

3. L'ELABORATION DES PPRM

3.1 PROCEDURE ADMINISTRATIVE D'ELABORATION

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 terme 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'Etat qui sera chargé d'instruire le dossier (« service instructeur »).

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, la phase réglementaire, bien que 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.

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). Il en va de même pour l'Agence de prévention et de surveillance des risques miniers. En tant que de besoin, 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. A l'issue de

l'ensemble de ces consultations, le plan peut être éventuellement modifié pour tenir compte des avis ou compléments d'informations recueillis.

L'approbation

A 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.

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.

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.

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 l'explicitation 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.

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 futures 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'explicitier 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.

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.

3.3 LES PRINCIPALES PHASES DE REALISATION DES PPRM

La réalisation d'un PPRM se décompose classiquement en 4 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.

La phase informative

La phase informative d'un PPRM 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, 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...). A ce titre, l'une des spécificités des PPRM est de pouvoir s'appuyer sur une source d'information fondamentale, notamment pour 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'Etat.

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 anciens désordres ayant affecté le site par le passé (inondations, mouvements de terrain...) permet en effet de justifier le bien fondé de la démarche de prévention entreprise.

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 prévisible. Cette évaluation n'intègre pas la nature de l'occupation de la surface. Elle transcrit, de manière objective, le potentiel de risque ou 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, cartes qui localisent 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.

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 évaluer les populations soumises à un niveau de risque non nul, en recensant, en particulier, les équipements les plus sensibles, les établissements recevant du public et les voies de circulation prioritaires pour l'éventuel acheminement de secours. 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'Etat 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.

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 ou vis-à-vis de l'usage du sol, tant pour ce qui concerne les projets nouveaux que 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 caractérisant la surface.

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 réglementaires qui s'appliquent à chacune des zones réglementaires.

3.4 QUELQUES PRINCIPES D'ELABORATION

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.

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, par le fait, le développement d'enjeux 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 terme 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 (vides importants proches de la surface ...) ;
- l'existence de forts enjeux en surface ou d'importants projets de développement de l'urbanisme.

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.

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 terme 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, parfois importante, d'incertitude 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 investigations 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 ».

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 déjà 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 participation 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.

CHAPITRE 2 : PHENOMENES ET MECANISMES INITIATEURS DES DESORDRES D'ORIGINE MINIERE

1 PROBLEMATIQUE DE L'EAU EN RAPPORT AVEC LES TRAVAUX MINIERS

1.1 ORIGINE DES PHENOMENES REDOUTES

La relation entre l'eau et les travaux miniers résulte des interactions entre les excavations et le cycle continental de l'eau qui concerne à la fois les eaux souterraines et de surface. Ces interactions peuvent être fortes et conduire à de profondes modifications de la morphologie et de la structure des bassins versants superficiels et souterrains avec d'éventuelles répercussions sur les écoulements d'eau qui y transitent. Ces modifications s'exercent pendant la phase d'exploitation des mines mais présentent le plus souvent un caractère irréversible après cessation de l'activité. Les trois caractéristiques principales des impacts qui en résultent sont :

- leur pérennité ;
- leur évolution possible au cours du temps ;
- leur emprise géographique pouvant largement déborder la simple extension des travaux miniers.

1.1.1. INTERACTION DES TRAVAUX MINIERS AVEC LE CYCLE DE L'EAU

Le dénoyage des zones minéralisées constitue évidemment l'impact majeur de l'exploitation minière sur le plan hydrologique. Ses effets sont divers selon la configuration de l'exploitation (souterraine ou à ciel ouvert)

Cas des travaux miniers souterrains (TMS)

Ce cas peut être illustré par la Figure 1, dans une configuration schématique.

Le pompage d'exhaure a d'abord pour résultat un rabattement du niveau de la nappe (configuration n° 2 sur la figure) qui peut entraîner à son tour l'assèchement de certains puits, le tarissement de sources proches, mais également une modification du débit des cours d'eau.

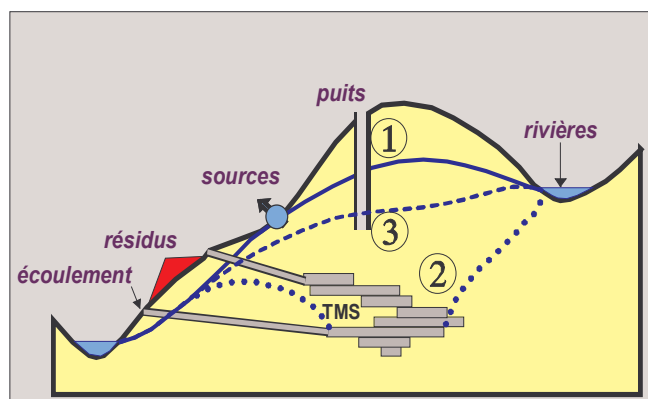


Figure 1: Impact de travaux miniers souterrains sur l'hydrodynamique pendant et après l'exploitation.
(1) niveau hydrostatique avant exploitation ;
(2) pendant l'exploitation ; (3) après

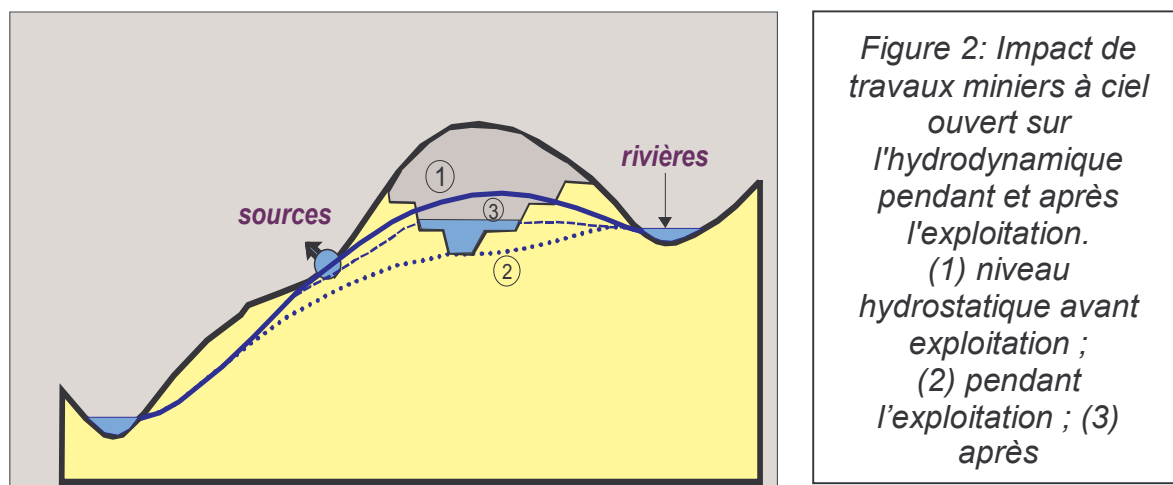
A l'issue de la période d'exploitation, l'arrêt de l'exhaure conduit à l'ennoyage des travaux et à la remontée du niveau hydrostatique. Un drainage naturel des anciens travaux s'établit alors, généralement par les points bas des ouvrages débouchant au jour.

Les travaux abandonnés, même lorsqu'ils ont été soigneusement remblayés, constituent généralement un milieu beaucoup plus perméable que l'encaissant lui-même. Ils forment ainsi un « court-circuit hydraulique » local. De fait, le niveau hydrostatique, dans les environs de l'ancienne exploitation, ne retrouve jamais parfaitement sa position initiale (Figure 1, configuration n° 3).

Cas des mines à ciel ouvert (MCO) (Fig. 2)

Dans le cas des MCO, l'impact concerne en premier lieu les écoulements de surface dans la mesure où la topographie se trouve fortement perturbée. Lorsque l'excavation est suffisamment profonde pour atteindre la nappe phréatique, le réservoir aquifère fait l'objet de pompages d'exhaure qui rabattent la surface piézométrique. Après arrêt de l'exploitation, la fosse se trouve le plus souvent partiellement remblayée. La remontée du niveau de la nappe due à l'arrêt des pompages y donne lieu à l'apparition d'un plan d'eau si ce niveau dépasse celui du fond de la fosse ou recouvre tout ou partie des remblais. Ce plan d'eau peut ou non, présenter un débordement apparent.

Il apparaît donc que le premier impact des exploitations, pendant et après leur période d'activité, concerne l'hydrodynamique. L'autre aspect essentiel de cet impact concerne l'hydrochimie. Sa cause primordiale résulte du fait que le développement des travaux miniers contribue à introduire, dans le milieu souterrain, l'air de la surface. Les conditions superficielles agressives vis-à-vis des matériaux géologiques sont ainsi créées artificiellement en profondeur. La qualité des eaux de mine résulte donc de l'interaction entre des flux d'eau d'origines diverses (infiltrations d'origine météorique, eaux souterraines), l'air atmosphérique et les matériaux géologiques constituant le gisement et son encaissant. Les modalités de cette interaction qui évoluent sensiblement au cours de la vie de l'exploitation et après sa fermeture ne sont pas abordés dans le présent document.



1.1.2 LES PERTURBATIONS HYDROLOGIQUES LIEES A L'ARRET DE TRAVAUX MINIERS

Modification des circulations souterraines en rapport avec les vides miniers

La perturbation durable du milieu souterrain par les travaux miniers porte sur plusieurs facteurs :

- l'augmentation du stock d'eau en profondeur par création d'un réservoir minier noyé. Ce réservoir peut constituer une ressource en eau si la qualité est satisfaisante ; il peut aussi constituer une nuisance ou même un danger potentiel si la situation topographique induit un débordement en surface, ou encore laisse craindre une vidange brutale. Remarquons que cette perturbation est limitée à l'emprise immédiate des travaux miniers et à une zone proche de ceux-ci ;
- la modification des flux d'eau souterraine par augmentation de la perméabilité et création de chemins d'écoulement préférentiels. Cette modification peut aller dans le sens d'une diminution ou d'une augmentation en fonction du contexte et s'exercer parfois jusqu'à grande distance des travaux miniers lorsque la configuration du système aquifère le permet. Il n'est ainsi pas rare que des forages d'alimentation en eau potable soient influencés à plusieurs kilomètres d'une exploitation minière.

Ce type de perturbation peut évoluer dans le temps, parfois de manière très intense, spécialement dans un contexte où les roches sont particulièrement solubles, (roches salifères principalement et gypse dans une moindre mesure). L'évolution des réseaux karstiques, notamment sous l'effet d'eaux acides, peut également donner lieu à des perturbations hydrogéologiques dans le long terme.

Modification des circulations superficielles

La perturbation durable du milieu superficiel est pour une part due au remodelage de la topographie induite par les excavations résiduelles, les terrassements divers, les dépôts de stériles et de résidus ainsi que les anciens bassins de décantation. Les affaissements miniers déjà exprimés ou à venir peuvent également jouer un rôle non négligeable.

Le régime des cours d'eau peut également se trouver modifié par le nouveau schéma de circulation des eaux résultant de l'arrêt des pompages d'exhaure.

1.2 LES PHENOMENES REDOUTES

1.2.1 MODIFICATION DU REGIME DES EMERGENCES

Description et effets

Les modifications des propriétés du sous-sol par l'exploitation minière entraînent, après la fin de celle-ci, l'établissement d'un schéma de circulation de l'eau souterraine qui diffère de celui qui prévalait pendant l'exploitation, mais aussi de celui qui existait avant la mise en exploitation.

Les exutoires des nappes d'eau souterraine, qu'ils soient naturels (sources, résurgences) ou artificiels (puits ou galeries débouchant au jour), connaissent, du fait de cette modification, des changements qui peuvent être de diverses natures :

- simple modification des caractéristiques de l'écoulement à l'exutoire (augmentation ou diminution du débit moyen, modification de la distribution du débit dans le temps ...)
- réapparition d'émergences qui existaient avant l'exploitation et que celle-ci avait asséchées. Les caractéristiques de l'écoulement de ces exutoires rétablis diffèrent en général des caractéristiques anciennes, en particulier si des travaux ont modifié les conditions d'émergence (remblayage, obturation...). Il n'est pas rare que l'eau ne réapparaisse pas à l'emplacement exact de l'ancienne source. On notera par ailleurs que, dans les parties les plus à l'amont des bassins versants hydrogéologiques en particulier, certaines émergences qui existaient avant l'exploitation minière peuvent ne pas réapparaître après la cessation de celle-ci ;
- apparition de nouvelles émergences. Ceci se produit en particulier dans les parties les plus à l'aval d'un bassin versant hydrogéologique. Une nouvelle émergence peut résulter d'un ancien ouvrage minier débouchant au jour et aménagé pour servir de point de débordement au réservoir minier (photo 1).



Photo 1 : Vue de la galerie de la Mance, point de débordement du sous-bassin hydrologique Centre (mines de fer de Lorraine)

Elle peut également prendre la forme d'une source ou d'une résurgence « naturelle » apparaissant en un point bas de la topographie (photo2) .



Photo 2 : Résurgence d'eau légèrement salée
liée à une exploitation de sel par dissolution en Franche-Comté.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Dans tous les cas, les phénomènes observés s'expliquent par la remontée du niveau piézométrique des nappes d'eau souterraine causée par l'arrêt des pompages d'exhaure. Cette remontée a pour résultat de remettre en eau un milieu que l'exploitation avait asséché.

Ce milieu ayant été modifié, les nouvelles circulations diffèrent souvent des anciennes. Elles empruntent les cheminements anciens, mais également certains cheminements nouveaux, créés par l'exploitation (vides miniers et terrains fracturés voire foudroyés, dont la perméabilité est très élevée). Il s'établit alors, dans le sous-sol, une distribution de la piézométrie différente de celle qui existait avant le début de l'exploitation minière.

Dans le cas le plus simple, qui est aussi le plus courant, on peut dire que la création de vides miniers, en accroissant la perméabilité « en grand » du milieu souterrain, a contribué à réduire les pertes de charge des écoulements. Cela induit, par rapport à l'état antérieur à l'exploitation, une baisse du niveau de l'eau souterraine à l'amont du bassin versant et une remontée à l'aval. Cette situation favorise, en aval, l'apparition d'émergences ou l'augmentation du débit des sources existantes, au détriment de celles initialement présentes à l'amont. Le débit global qui, pour sa part, dépend pour l'essentiel de facteurs extérieurs au milieu souterrain (les précipitations), ne varie pas en moyenne.

Dans certains cas, en particulier quand l'exploitation minière a entraîné des modifications de grande ampleur des conditions de l'écoulement de l'eau souterraine, comme la mise en communication d'ensembles hydrogéologiques auparavant séparés les uns des autres, l'établissement du nouveau schéma de circulation de l'eau souterraine s'avère particulièrement complexe. Dans ce cas, l'apparition de nouvelles sources ou la modification du régime des sources existantes peuvent intervenir en des lieux inattendus et très éloignés de l'exploitation minière.

On notera que le nouveau schéma d'écoulement qui s'établit dans une ancienne zone minière ne présente pas nécessairement la pérennité d'un schéma d'écoulement purement naturel. La géométrie du milieu peut en effet se modifier au cours du temps (effondrement de vides miniers). Sous l'effet de l'augmentation de la pression de l'eau, le déboufrage de discontinuités préexistantes, telles que des karsts ou des failles, peut également perturber les écoulements de manière soudaine et non prévisible. De nombreux phénomènes physico-chimiques (entre autres des phénomènes de dissolution-précipitation), dans un milieu *a priori* réactif comme le sont la plupart des gisements minéraux, peuvent aussi intervenir, modifiant la perméabilité du sous-sol. Les situations les plus critiques se rencontrent certainement dans les zones d'exploitation de substances solubles (sel et potasse), dans lesquelles il est très difficile de garantir que le régime d'écoulement qu'on observe à un moment donné constitue un régime stable.

1.2.2. APPARITION DE ZONES DETREMPEES OU DE MARECAGES

Description et effets

Lorsque l'eau qui remonte jusqu'à la surface du sol ne peut pas s'évacuer de manière satisfaisante, soit parce que les capacités de drainage de surface sont insuffisantes, soit parce que la zone d'émergence constitue une dépression fermée, on peut voir apparaître en surface, de manière permanente ou à certaines périodes de l'année, des zones détrempeées voire même de véritables marécages.

En zone urbaine, les conséquences sont généralement inacceptables et des dispositions sont prises pour s'opposer à de telles nuisances. En zone rurale, des mesures compensatoires sont rarement prises et l'apparition de zones humides peut aller jusqu'à interdire toute utilisation du sol, y compris à des fins agricoles.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Les mécanismes à l'origine de ce type de désordre sont sensiblement similaires à ceux qui sont à l'origine des apparitions de résurgences (remontée du niveau piézométrique lié à l'arrêt des pompages d'exhaure, modifications des schémas de circulation des eaux souterraines).

On rappellera que le nouveau schéma de circulation se caractérise fréquemment par un niveau piézométrique plus élevé dans les zones aval. Ce sont donc les zones basses (comme les fonds de vallée) qui sont les plus sensibles à l'apparition de zones détrempeées ou de marécages (photo 3).



Photo 3 : Zone humide due à la remontée de la nappe phréatique dans le vallon du Chevillon.

Du fait des fluctuations saisonnières du niveau des nappes d'eau souterraine, les zones affectées par ce phénomène peuvent, à certaines périodes de l'année, s'assécher. Cet assèchement est facilité quand les couches de terrain constituant le proche sous-sol ont une bonne capacité drainante. *A contrario*, un proche sous-sol très peu perméable constitue un facteur de prédisposition au caractère pérenne de ce type de nuisance.

Les affaissements miniers, en particulier quand ils entraînent l'apparition de dépressions fermées en surface, favorisent ce phénomène.

Enfin, dans les zones où l'on se prémunit contre l'occurrence de telles nuisances en rabattant par pompage le niveau de l'eau souterraine, il convient d'analyser le risque de défaillance des stations de relevage qui pourrait conduire à l'apparition de zones humides, voire de plans d'eau dans des environnements non compatibles avec ce type de contraintes.

1.2.3 INONDATION DES SOUS-SOLS ET POINTS BAS

Description et effets

Il arrive que la remontée de la nappe résultant de l'arrêt des pompages d'exhaure amène le niveau de l'eau à s'établir à très faible profondeur sous la surface du sol, sans toutefois atteindre celle-ci comme dans les cas décrits plus haut. Dans ce cas, les désordres ou nuisances potentielles concernent les ouvrages implantés partiellement ou totalement sous la surface du sol (caves, parkings, réseaux enterrés, tunnels, égouts, passages enterrés ou semi-enterrés...). Ceux-ci se retrouvent noyés, soit en permanence, soit une partie de l'année seulement, en fonction de leur profondeur et des fluctuations saisonnières du niveau de la nappe.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Les mécanismes à l'origine de ce type de désordre sont similaires à ceux décrits à propos de l'apparition des zones détrempées ou de marécages. La seule différence est que, cette fois, la remontée du niveau de la nappe n'atteint pas la surface du sol.

1.2.4 MODIFICATION DU REGIME DES COURS D'EAU

Les transferts d'eau entre les nappes et les cours d'eau existent à l'état naturel. Le sens de ces échanges dépend de la position relative des niveaux d'eau entre le cours d'eau et la nappe. Le cours d'eau draine la nappe lorsque le niveau de cette dernière est supérieur à celui du cours d'eau. Le cours d'eau recharge la nappe dans le cas contraire.

Les modifications du milieu induites par l'exploitation minière puis par sa fermeture (arrêt des pompages) peuvent modifier le sens et/ou le débit des échanges nappe – rivière. De manière schématique, les effets de ces modifications sur le régime des cours d'eau peuvent induire des désordres et nuisances de types opposés :

- un accroissement du débit moyen des cours d'eau et des débits de crue ;
- une diminution du débit d'étiage.

Ces deux phénomènes seront traités successivement. Notons que l'impact de la modification du régime des cours d'eau peut s'étendre bien au-delà du seul secteur concerné par l'exploitation minière et de ses abords immédiats. Il peut concerner la partie du bassin hydrographique située à l'aval du site minier.

1.2.4.1 ACCROISSEMENT DU DEBIT DES COURS D'EAU

Description et effets

Le schéma d'exhaure durant l'exploitation peut avoir contribué à diminuer le débit de certains cours d'eau initialement alimentés par des points de débordement naturels de la nappe. L'exploitation minière se développant généralement sur plusieurs dizaines d'années, l'extension naturelle du lit mineur des cours d'eau concernés ainsi que des zones inondables leur correspondant s'estompe progressivement dans la mémoire collective. Dans ces conditions, il arrive que :

- le lit mineur initial du cours d'eau soit aménagé sous la pression de l'activité humaine en canalisant par exemple le débit résiduel du cours d'eau ;

- des terrains soient aménagés en vue de leur urbanisation, au sein du lit majeur - zones naturelles d'épandages de crues -, voire dans le lit mineur naturel.

Le nouveau schéma de drainage après arrêt des pompages peut contribuer à accroître sensiblement le débit moyen de certains cours d'eau et entraîner, de fait, une augmentation du débit des crues et de leur fréquence, incompatible avec les nouveaux aménagements. La largeur des lits mineurs et majeurs peut, dans certaines configurations, être plus étendue que dans la situation antérieure à la création de la mine, en raison du nouveau schéma de circulation des eaux et/ou des aménagements de l'occupation du sol réalisés.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

L'accroissement plus ou moins prononcé du débit moyen des cours d'eau découle de l'une ou l'autre des causes suivantes, voire de la combinaison de plusieurs d'entre elles :

- les travaux d'aménagement en surface ont accru la taille du bassin versant ;
- la création de vides miniers a augmenté la surface du bassin versant souterrain drainée par le cours d'eau ;
- l'arrêt des pompages entraîne une remontée générale de la nappe favorisant son drainage par le cours d'eau considéré au niveau de son lit mineur et par l'intermédiaire des sources qui s'y déversent ;
- le nouveau schéma de circulation des eaux après arrêt de l'exhaure peut concentrer l'ensemble des écoulements souterrains vers un nombre réduit de points de débordement, augmentant ainsi la surface de bassin versant alimentant un même cours d'eau.

En période de hautes eaux, l'augmentation de taille du bassin versant superficiel et/ou du bassin versant souterrain peut conduire à l'accroissement du volume des crues. De plus, l'existence d'un réseau de galeries facilite dans des proportions considérables l'écoulement de l'eau dans le sous-sol ; ainsi, le temps de transfert de l'eau entre la nappe et le cours d'eau se trouve réduit ce qui accroît la rapidité de la montée des eaux et le débit de pointe des crues.

1.2.4.2 DIMINUTION DU DEBIT D'ETIAGE

Description et effets

A l'inverse du phénomène d'accroissement du débit de certaines rivières, le nouveau schéma de circulation des eaux peut aussi contribuer à réduire le débit d'autres cours d'eau. Ce phénomène entraîne une diminution de la ressource en eau disponible dans le cours d'eau lui-même ou dans une éventuelle nappe alluviale sous-jacente. Il en résulte des conséquences sur les volumes disponibles pour l'exploitation de la ressource, en particulier en période d'étiage :

- captages pour l'arrosage, l'irrigation et la pisciculture ;
- captages industriels ;
- captages pour l'adduction d'eau potable.

Cette situation peut aussi conduire à :

- une détérioration de la qualité de l'eau, notamment à l'étiage en raison de la réduction de l'effet de dilution ;
- l'assèchement de points d'eau creusés dans la nappe alluviale ;
- la mise en danger d'hydrosystèmes aquatiques ripariens ainsi que de la flore et de la faune qui s'y sont développées ;
- l'assèchement du cours d'eau.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

La diminution, plus ou moins prononcée, du débit moyen des cours d'eau peut découler de l'une ou l'autre des causes suivantes, voire de la combinaison de plusieurs d'entre elles :

- les travaux d'aménagement en surface ont diminué la taille du bassin versant superficiel en dérivant une partie du ruissellement en direction d'un autre bassin versant ;
- l'existence de vides miniers entraîne l'écoulement d'une partie de la nappe drainée antérieurement par le cours d'eau vers un autre bassin versant ;
- le cours d'eau concerné était artificiellement alimenté par le rejet en surface de pompages d'exhaure qui ont pris fin à l'arrêt des travaux.

La diminution des débits peut favoriser le dépôt de sédiments fins entraînant le colmatage du fond du lit. Une telle situation limite la recharge de la nappe à partir du cours d'eau. Ce phénomène est particulièrement sensible en période d'étiage et peut accentuer la baisse de la nappe avec pour conséquence l'assèchement de points d'eau et la dégradation d'écosystèmes aquatiques.

1.2.5 INONDATIONS BRUTALES

Description et effets

Le phénomène d'inondation brutale résulte de l'émission soudaine d'un très fort débit d'eau ou de boue par un orifice en liaison avec un réservoir minier ennoyé. En fonction du débit et du volume rejeté, l'effet peut être plus ou moins dévastateur et aller d'une simple crue dans le lit d'une rivière à une vague déferlante au fort pouvoir érosif.

L'intensité du phénomène est liée au volume d'eau susceptible de se vidanger, aux caractéristiques hydrodynamiques de l'orifice d'évacuation et à la morphologie des terrains permettant l'écoulement en aval. Les conséquences sont, *a priori*, d'autant plus graves que le phénomène peut se développer dans un site où on ne l'attend pas et non adapté à l'évacuation d'une crue.

Mécanismes et scénarios initiateurs

Les mécanismes initiateurs d'un tel phénomène peuvent résulter de plusieurs causes naturelles ou artificielles dont l'existence exige toutefois des configurations assez particulières.

La situation la plus fréquente est celle d'un réservoir minier perché en altitude qui s'est constitué à la suite d'obturations volontaires ou fortuites des orifices miniers

topographiquement les plus bas qui en permettaient la vidange. La rupture d'un bouchon artificiel ou l'occurrence d'un débouillage d'une galerie effondrée, ou d'un karst colmaté, peuvent alors rapidement conduire à des débits et des conséquences d'autant plus importants que la charge derrière le bouchon est élevée et que le réservoir est suffisamment volumineux pour que le phénomène persiste durant plusieurs jours.

Une autre situation peut résulter du déversement d'un réservoir karstique dans les travaux miniers entraînant une crue soudaine à leur exutoire.

On citera également le risque de vague déferlante en cas d'effondrement soudain de vides miniers ennoyés de grande dimension (photo 4).



Photo 4 : L'effondrement partiel de la caverne d'Ocnele Mari (Roumanie), le 8 octobre 2001, a provoqué une vague qui a causé des dégâts importants aux installations et habitations situées à l'aval.

Enfin dans le cas d'une exploitation à ciel ouvert donnant lieu à un lac minier, ou encore d'une verse à résidus sous eau, il faut envisager la possibilité d'une instabilité mécanique entraînant le glissement d'une grande masse de matériaux au sein de la retenue, ou la rupture d'une digue avec, pour conséquences, le déversement d'une lame d'eau et de boue en aval de l'ouvrage.

2. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

2.1 ORIGINE DES PHENOMENES REDOUTES

L'exploitation minière a consisté à extraire de grandes quantités de matériau dans le but de pouvoir en commercialiser une partie sous forme de minerai valorisable. Ces excavations, souterraines ou à ciel ouvert, ont modifié de manière irréversible les massifs rocheux où se trouvait le minerai. Le devenir à long terme de ces excavations doit ainsi être analysé avec le plus grand soin car elles peuvent être à l'origine de mouvements de terrain d'amplitude et de dangerosité très variables.

Parallèlement, l'exploitation s'est accompagnée de l'édification d'ouvrages de dépôt des stériles et résidus de traitement susceptibles d'évoluer dans le temps.

Nous nous attacherons, dans ce qui suit, à présenter les différents types d'ouvrages miniers (travaux souterrains, travaux à ciel ouvert, ouvrages de dépôt), en précisant leurs spécificités et les principaux types de désordres qu'ils sont susceptibles d'induire. Une synthèse de ces différents désordres sera présentée sous forme de tableau récapitulatif. Cette synthèse introduira la description détaillée des principaux phénomènes d'instabilité et de leurs mécanismes initiateurs.

2.1.1 LES TRAVAUX SOUTERRAINS

La majorité de l'exploitation minière française s'est effectuée par des travaux souterrains. Une grande diversité de méthodes d'exploitation a été utilisée selon la nature du gisement et l'évolution des techniques. Du point de vue des risques résiduels de mouvement de terrain après la fermeture de l'exploitation, on peut distinguer deux grands types de méthodes : les exploitations assurant un traitement intégral des vides après extraction et celles permettant la persistance de vides résiduels important à la fermeture des travaux.

Dans les exploitations assurant un traitement intégral des vides (tailles ou dépilages), l'éboulement ou le remblayage des cavités datent de la période d'exploitation. Il ne subsiste donc, après fermeture, que l'évolution possible des terrains remaniés par le foudroyage (affaissement résiduel, tassement) ainsi que quelques vides liés aux galeries d'infrastructure pouvant donner naissance à des effondrements localisés.

Dans les exploitations permettant la persistance de vides résiduels importants (chambres et piliers, chambres vides, cavités de dissolution), la stabilité des anciens travaux peut être remise en cause par la fatigue ou le vieillissement du matériau ou par les modifications de l'environnement des édifices souterrains. En particulier, certains matériaux comme le sel sont très sensibles à la circulation de l'eau. Du fait de la persistance de vides importants, ces exploitations peuvent être, en plus des phénomènes relevés pour les exploitations assurant un traitement intégral des vides, à l'origine d'affaissements importants ou même d'effondrements généralisés. Dans les deux cas, plus la profondeur de l'exploitation est élevée, plus les effets seront minimisés en surface.

L'extension des zones d'instabilités potentielles dépend de la configuration du gisement. Ainsi, les exploitations filoniennes fortement pentées sont moins susceptibles de produire des désordres s'étendant sur de grandes superficies que les exploitations en plateaux à faibles ou moyenne profondeur s'étant développées au sein de vastes bassins sédimentaires.

2.1.2 LES TRAVAUX A CIEL OUVERT

Lorsque la profondeur du gisement et le contexte géologique le permettaient, les mineurs ont parfois privilégié l'exploitation des minerais par mines à ciel ouvert afin de récupérer l'intégralité du gisement, de limiter et de simplifier les travaux d'infrastructures (pas de ventilation, d'éclairage, de boisage, gestion de l'eau facilitée) et de réduire, par-là même, les coûts d'exploitation.

Les travaux consistaient à créer de larges fosses, parfois après découverte d'une épaisseur importante de terrains superficiels (d'où le nom de « découvertes »), au sein desquelles on extrayait le minerai. Certaines de ces fosses ont atteint de très

grandes dimensions. On citera pour mémoire, en France, la découverte de charbon à Carmaux où une fosse de diamètre voisin de 1100 mètres pour une profondeur supérieure à 200 mètres fut réalisée entre 1985 et 1997, pour 90 millions de m³ de volume extrait.

Le choix de la méthode d'exploitation, à savoir principalement le dimensionnement de la géométrie des flancs, résultait d'une optimisation entre la rentabilité économique (limiter le volume de stérile de couverture à déblayer) et la stabilité de l'ouvrage minier (éviter les flancs trop pentus favorables aux ruptures).

Un découpage des talus assurant la stabilité, au moins immédiate, des flancs était donc établi en s'appuyant, notamment pour les plus anciennes exploitations, beaucoup plus sur le retour d'expérience concernant le comportement des massifs rocheux traversés que sur des analyses géotechniques très poussées prenant en compte les caractéristiques géomécaniques de la matrice rocheuse et celles des hétérogénéités majeures découpant le massif (failles, joints stratigraphiques...).

Sous l'effet du temps et de l'eau, il est fréquent que ces fronts rocheux subissent des instabilités qui peuvent aller de simples chutes de pierres à la déstabilisation massive d'un front de talus. La combinaison entre la fracturation du massif et la morphologie des flancs de fosse détermine généralement le volume des masses rocheuses potentiellement instables ainsi que le mécanisme susceptible d'initier la rupture.

La nature du massif rocheux encaissant joue également, bien évidemment, un rôle prépondérant sur la genèse des éventuelles instabilités. On différenciera ainsi les fosses creusées au sein de massifs de roches dures (sujettes aux phénomènes d'écroulements rocheux) de celles creusées au sein de massifs de roches tendres (sensibles aux phénomènes de ravinements, de glissements et, plus rarement, de coulées).

2.1.3 LES OUVRAGES DE DEPOTS

L'exploitation des mines, souterraines ou à ciel ouvert, a souvent entraîné la constitution de volumineux dépôts de résidus miniers à proximité des sites d'extraction. On différenciera deux grands types de résidus en fonction principalement de leur nature et de leur condition de mise en dépôt.

Les résidus d'exploitation et/ou de recherche

Les résidus d'exploitation, également appelés stériles, sont essentiellement constitués de matériaux granulaires mis en dépôt par voie sèche. Il peut s'agir de stériles francs (forage de puits ou traçage de galeries au rocher par exemple) ou de stériles minéralisés (teneur en éléments valorisables inférieure à la teneur économiquement exploitable au moment du dépôt).

Une fois amassés, ces résidus constituent des tas de déblais communément appelés terrils, haldes ou verses, suivant la forme du dépôt et la terminologie régionale.

Les résidus de traitement

Les résidus des usines de traitement, au sortir de la chaîne de transformation, sont constitués d'un mélange de matières solides fines et d'eau qui se présente le plus souvent sous forme d'une pulpe recueillie à l'extrémité de la chaîne de traitement, lorsque toutes les opérations ont été mises en œuvre pour séparer les minéraux valorisables du matériau extrait (concassage, lavage, triage, flottation...). Ils contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en éléments secondaires tels que les sulfures de fer et leurs produits d'oxydation. Ils peuvent également contenir des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs utilisés pour l'attaque des gangues, la séparation et la concentration des métaux valorisables. C'est le terme anglais de *tailings*³ qui est généralement usité pour décrire ces résidus. Nous privilégierons quant à nous celui de « résidus de traitement ».

Ces résidus sont déversés au sein de bassins de rétention implantés dans des secteurs présentant des contextes topographiques et géologiques adaptés à cet effet (flanc de vallée, talwegs...). Ces bassins sont, au moins partiellement, constitués de digues de rétention érigées en périphérie de la zone de stockage. Les *digues* sont des barrages poids, souvent construits avec du stérile de mine dont l'objectif principal est de constituer une retenue pour le stockage de résidus miniers fins issus du lavoir ou de l'usine de traitement. Pour des informations détaillées sur les nombreuses variantes permettant d'ériger des bassins de décantation, on se reportera à l'ouvrage cité dans les références bibliographiques.

La nature et la granulométrie des matériaux constituant ces digues peuvent être très variables, depuis de gros blocs pierreux, jusqu'à des silts et des argiles en passant par des sables et graviers. Les matériaux peuvent être des déblais d'extraction bruts ou criblés mais ils proviennent souvent de la chaîne de traitement ou de transformation des matériaux (ségrégation par cyclonage).

La rupture ou la déformation des ouvrages de dépôt résultent généralement de l'évolution défavorable d'un ou plusieurs facteurs gouvernant le comportement mécanique des déblais ou résidus. Les désordres les plus caractéristiques susceptibles d'affecter ces ouvrages sont, par ordre d'intensité croissante : les mouvements superficiels (ravinelements, glissements pelliculaires), les glissements profonds et les coulées.

2.1.4 SYNTHÈSE DES DÉSORDRES POSSIBLES PAR TYPE D'OUVRAGES MINIERES

Si, comme cela vient d'être explicité, chaque type d'ouvrages miniers (vides souterrains, flancs de fosse, ouvrages de dépôt) présente des spécificités qui lui sont propres, certaines manifestations de désordres peuvent affecter de manière sensiblement identique l'un ou l'autre de ces types d'ouvrages.

Ainsi, le phénomène de tassement peut aussi bien affecter les terrains de surface situés à l'aplomb d'anciens vides souterrains que les plates-formes de versants sujettes à une compaction des dépôts ou une combustion des matières carbonées

³ On parle de *tailings* pour les résidus de traitement des minerais métalliques et de schlamms pour les résidus de lavage du charbon.

présentes en leur sein. De même, les glissements superficiels ou profonds susceptibles de se développer le long des flancs d'un terril ne diffèrent pas fondamentalement de ceux dont peuvent être sujettes les flancs de fosses creusés au sein de massifs de roches tendres.

Pour simplifier la présentation et limiter les redondances dans la rédaction, le parti a été pris de présenter les désordres possibles par types de phénomènes (tassement, etc.) et non par type d'ouvrages miniers (ouvrages de dépôt, etc.). Le tableau synthétique suivant qui recense l'ensemble des principaux désordres de type mouvements de terrain classiquement rencontrés permet toutefois, en fonction des attentes des utilisateurs du guide, d'initier la réflexion par l'un ou l'autre des facteurs d'entrée (phénomènes ou types d'ouvrages).

Il est ainsi possible de déterminer, pour chaque type d'ouvrage minier, les principaux phénomènes d'instabilités susceptibles d'affecter les terrains de surface situés dans son emprise. Réciproquement, le tableau permet de recenser l'ensemble des ouvrages susceptibles de donner naissance à un type de désordre donné et cartographié.

Tableau 1 : Récapitulatif des principaux désordres susceptibles de se développer à l'aplomb d'ouvrages miniers.

Ouvrage Minier	Tassement	Affaissement	Effondrement localisé	Effondrement généralisé	Glissements superficiels ou profonds	Coulées (liquéfaction)	Chutes de pierres, écroulements
Ouvrages souterrains							
Exploitation totale profonde	X	X	X				
Exploitation partielle	X	X	X	X			
Exploitation filonienne	X	X	X				
Exploitations salines par cavités de dissolution		X		X			
Anciens travaux en combustion		X	X				
Ouvrages miniers débouchant au jour (puits, galeries...)	X	X	X				
Zones d'affleurements (anciens grattages)	X	X	X				X
Ouvrages à ciel ouvert							
Fosses remblayées	X		X				
Fosses non remblayées en roche dure							X
Fosses non remblayées en roche tendre					X	X	
Ouvrages de dépôt							
Terrils, verses, dépôts de stériles, digue	X		X		X	X	X
Bassin de décantation / rétention de matériaux fins avec ou sans digue	X				X	X	

2.2 LES PHENOMENES REDOUTES

2.2.1 LES TASSEMENTS

Définition et effets

Dans le cadre de l'après-mine, on parle de tassements lorsque les mouvements du sol ne résultent pas de l'extraction, de la combustion ou de la dissolution du minerai mais s'expliquent par la recompaction d'un massif meuble (amas de matériaux granulaires) ou affecté par les travaux souterrains (terrains foudroyés).

Sous l'action de perturbations extérieures (applications de surcharge en surface, mouvements de nappes au sein des terrains concernés, sollicitations vibratoires...) ou sous l'effet de leur propre poids, les terrains qui présentent une forte porosité peuvent être amenés à se tasser et donner naissance à des mouvements de faible ampleur en surface (sauf exception, l'amplitude maximale est d'ordre décimétrique).

Ce type de manifestation peut avoir des conséquences assez similaires avec le phénomène naturel de retrait-gonflement des sols argileux, sous l'effet de battements de nappe ou de variations du profil hydrique dans le proche sous-sol.

Les conséquences redoutées résultent principalement du fait que la surface peut être affectée par des tassements différentiels qui sont susceptibles d'engendrer des effets sur les bâtiments et les infrastructures.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Anciennes exploitations menées par foudroyage du toit ou anciennes zones effondrées

Même si la majorité des terrains exploités à l'aide d'une méthode induisant le foudroyage du toit (exploitation par taille ou par piliers dépilés) sont sujets, durant la phase de mouvements résiduels, au développement de tassements, les manifestations les plus perceptibles se développent à l'aplomb des secteurs peu profonds (quelques dizaines de mètres sous la surface).

Dans ces conditions, en effet, le poids des terrains surmontant les anciens chantiers miniers n'est pas suffisant pour garantir une recompaction complète des terrains foudroyés au cours des années suivant les travaux d'extraction. Ceci permet la persistance d'une porosité artificielle élevée proche de la surface.

Tassements sur ouvrages de dépôt, découvertes exploitées par auto-remblayage ou anciens ouvrages remblayés

Les stériles d'exploitation, mis en dépôt par voie sèche sous forme de verses ou utilisés à des fins de remblayage d'anciennes découvertes, peuvent présenter une composition assez hétérogène, tant en terme de nature des matériaux qu'en terme de granulométrie. Leur mise en place, souvent assurée par simple déversement, ne garantit pas une compaction complète des déblais. Il en va de même pour les puits ou galeries d'accès remblayés. Les matériaux déversés dans ces ouvrages peuvent subir une compaction parfois importante, susceptible d'engendrer la formation d'une dépression en surface.

Compaction secondaire de terrains meubles

Bien que très exceptionnel, un mécanisme assez similaire peut être observé, lorsque la modification du régime hydrogéologique résultant de l'arrêt des travaux miniers induit des battements de la nappe au sein de terrains sensibles à un phénomène de compaction secondaire (tourbes par exemple). En présence de charges suffisantes en surface (bâti ou infrastructures), le phénomène de compaction secondaire peut induire des tassements sensibles, et ce même si les terrains concernés ne sont pas directement affectés par les anciens travaux miniers.

Soulèvement des terrains

Lors de l'exploitation des mines profondes, les terrains encaissants ont été désaturés par les pompages d'exhaure mis en œuvre durant l'exploitation. La resaturation des terrains pendant l'ennoyage peut, dans certaines configurations, se traduire par une remontée lente et très étalée de toute la zone précédemment dénoyée. L'amplitude des mouvements verticaux observés peut atteindre quelques décimètres.

Même si ce phénomène se manifeste par une remontée et non un abaissement des terrains de surface, le mécanisme initiateur est sensiblement le même que celui à l'origine des tassements. Il s'agit en effet d'une remobilisation, postérieure à l'exploitation, de terrains affectés par les anciens travaux miniers.

Au regard des retours d'expérience disponibles, les mouvements de ce type sont très étalés dans l'espace (faible courbure) et ne provoquent pas d'effets visibles sur les bâtiments traditionnels.

2.2.2 LES AFFAISSEMENTS PROGRESSIFS

Définition et effets

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction ou de la disparition (dissolution, combustion) de minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette (figure 3).

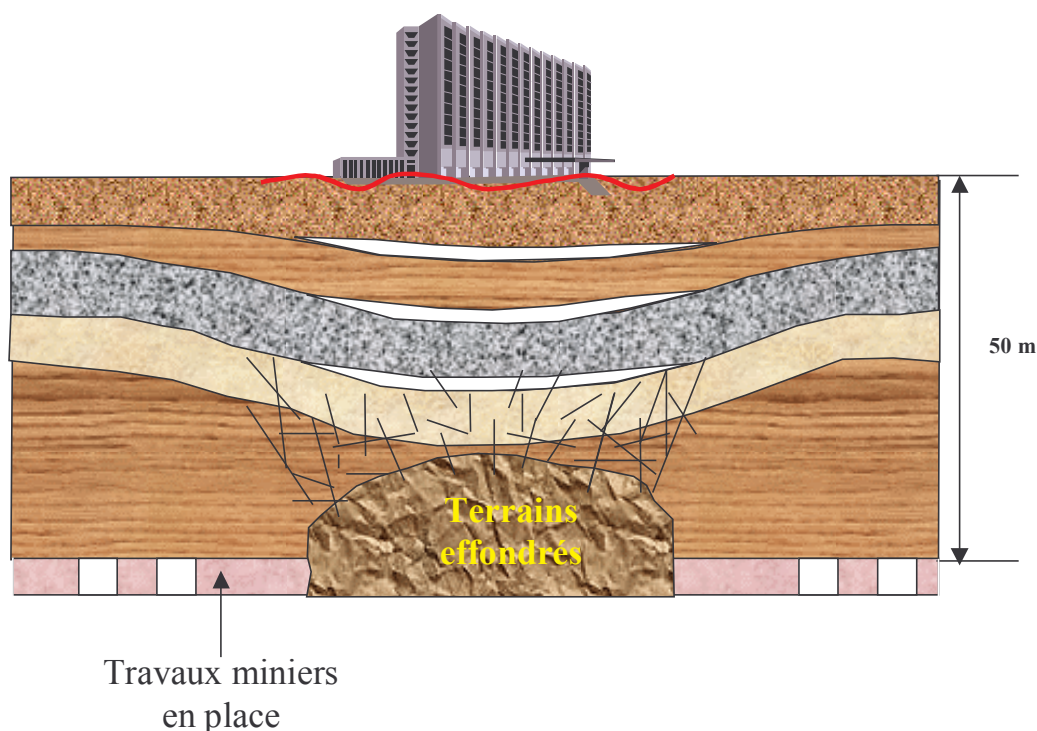


Figure 3 : Principe d'une cuvette d'affaissement et de ses conséquences sur le bâti de surface.

Ce type de manifestation concerne aussi bien les exploitations en plateaux menées à grande profondeur (plusieurs centaines de mètres) et présentant des extensions horizontales importantes que les exploitations filoniennes ayant laissé des vides résiduels importants après extraction.

L'amplitude de l'affaissement est directement proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Le coefficient de proportionnalité dépend notamment de la profondeur des travaux et de la nature des méthodes d'exploitation et de traitement des vides (foudroyage, remblayage...). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées au centre de la cuvette, durant ou après l'exploitation, sont d'ordre décimétrique à métrique.

Généralement, ce ne sont pas tant les déplacements verticaux qui affectent principalement les bâtiments et infrastructures de surface, mais plutôt les déformations du sol (déplacements différentiels horizontaux, flexions, mise en pente...). En fonction de leur position au sein de la cuvette d'affaissement, les déplacements différentiels horizontaux peuvent prendre la forme de raccourcissements (zones en compression vers l'intérieur de la cuvette) ou d'extension (zones en traction vers l'extérieur de la cuvette) (photo 5).



Photo 5 : Conséquences sur le bâti des affaissements d'Auboué (Bassin ferrifère lorrain)

Les déformations et les pentes sont proportionnelles à l'affaissement maximum au centre de la cuvette et inversement proportionnelles à la profondeur de l'exploitation. Ainsi pour une même épaisseur exploitée, les effets seront d'autant plus faibles que l'exploitation est profonde.

Comme la plupart des autres phénomènes d'instabilité, les affaissements miniers ne se limitent pas au strict aplomb des contours de travaux souterrains. On appelle « angle d'influence », l'angle défini entre la verticale et la droite joignant la bordure souterraine de l'exploitation et la limite extérieure de la cuvette d'affaissement en surface. En fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains constituant le recouvrement, l'angle d'influence varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés en plateure. L'existence d'un pendage influe également directement sur les valeurs de l'angle d'influence, tout comme la présence d'accidents géologiques majeurs (failles).

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Cas des exploitations totales menées dans des terrains stratifiés

Toute exploitation par tailles ou par dépilage, quelle qu'en soit la profondeur, induit forcément un éboulement ou foudroyage des premiers bancs du toit des travaux souterrains. Cet éboulement génère la formation de blocs de formes et de tailles variables qui, en s'enchevêtrant, permet la persistance de vides résiduels et, de fait, une augmentation, souvent sensible, entre le volume occupé par les éboulis et celui qu'occupaient les terrains en place.

Ce phénomène, appelé « foisonnement » permet aux matériaux éboulés de remplir la cavité d'exploitation ainsi que le volume des terrains initialement en place ce qui a pour conséquence de stopper le phénomène d'éboulement, les terrains sus-jacents trouvant appui sur le tas d'éboulis. Ces éboulis présentant une forte compressibilité, les bancs rocheux sus-jacents préalablement découpés par les discontinuités naturelles qui les affectent fléchissent progressivement avec, pour conséquence, la formation d'une cuvette en surface.

L'amplitude des affaissements étant directement proportionnelle à l'ouverture des travaux, il n'est pas rare que, durant la période d'exploitation, les terrains de surface soient descendus de plusieurs mètres, voire, plus exceptionnellement, de plus d'une dizaine de mètres.

Le retour d'expérience disponible sur différents bassins miniers français et européens indique que la quasi-totalité de l'affaissement se produit durant l'extraction et que la durée de l'affaissement résiduel se limite à quelques années. Au-delà, les risques de reprise d'affaissement (ou de remontée de la surface du sol) résultent de variations importantes des conditions environnementales (ennoyage ou dénoyage des travaux, application de surcharges en surface) et affectent principalement les exploitations les moins profondes. Ils correspondent, de fait, pleinement au phénomène de tassement décrit plus haut.

Cas des exploitations partielles en terrains stratifiés

Dans le cas d'exploitations partielles, l'éboulement des travaux souterrains résulte de la rupture progressive des éléments assurant la stabilité de l'ouvrage minier (piliers, intercalaires entre couches, toit, mur). Le phénomène peut donc être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux, suite à l'évolution de la résistance des roches. Lorsque l'éboulement des travaux miniers est réalisé sur une surface suffisante, les mécanismes de foisonnement et de flexion des bancs sus-jacents sont similaires au cas des exploitations totales par taille ou défilage.

L'intensité de l'affaissement reste proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Il n'est donc pas rare que les mouvements verticaux observés puissent dépasser, une amplitude d'ordre métrique. L'ampleur des mouvements est également proportionnelle au taux de défrètement. En effet, plus les piliers sont volumineux, plus ils occupent de l'espace en souterrain et limitent ainsi l'amplitude du mouvement.

On peut décomposer l'affaissement à l'aplomb d'exploitations partielles en trois phases distinctes.

La première phase, dite « de mise en place », peut s'avérer très longue (plusieurs années à plusieurs centaines d'années). Elle se traduit par un affaiblissement progressif des piliers sous l'effet cumulé du temps, de la pression des terrains de couverture et des paramètres environnementaux régnant au sein de l'édifice minier (eau, température...).

La seconde phase, dite « d'affaissement », intervient lorsque le phénomène de rupture des piliers s'initie au sein de l'ouvrage minier, sous l'effet possible d'un facteur déclenchant (modification de l'état de contrainte ou des paramètres environnementaux par exemple). Elle se développe classiquement sur une période variant de quelques jours à plusieurs mois, durant laquelle la plus grande partie de l'affaissement se donne en surface. C'est donc la phase la plus critique durant laquelle un suivi attentif de l'évolution des structures présentes en surface peut s'avérer nécessaire.

La phase ultime, dite « résiduelle », correspond à l'affaissement résiduel. Si cette phase peut se prolonger sur des périodes assez longues (plusieurs années), les mouvements résiduels sont généralement très limités et, la plupart du temps, non décelables en surface.

Cas des exploitations filoniennes

L'exploitation de gisements filoniens peut donner naissance à des phénomènes d'affaissement en surface. Quand la profondeur d'exploitation est importante, du fait du faible volume des vides résiduels (filons souvent de faible puissance), la répercussion des désordres en surface se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement et par des amplitudes d'affaissement vertical et de déplacements différentiels horizontaux faibles.

Les gisements filoniens ayant donné naissance à plusieurs types de méthodes d'exploitation, plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine du développement de cuvettes d'affaissement en surface.

Dans le cas de chambres montantes remblayées, les vides résiduels et/ou la compressibilité des remblais mis en place peuvent être à l'origine d'une convergence des épontes. Cette convergence se traduit par la formation d'une voûte de décompression au toit de l'exploitation, avec développement de fissures au sein du massif rocheux. Si les stots séparant des chantiers adjacents viennent à se rompre et que l'exploitation est suffisamment étendue, cette voûte de décompression peut atteindre la surface et générer des affaissements. On notera également le risque d'écoulement de remblais fins (débouillage) et la génération de vides à forte profondeur susceptibles de se refermer et d'induire une cuvette en surface. Le mécanisme est relativement semblable pour les méthodes d'exploitation descendantes sous dalles. En cas de rupture progressive des dalles, la convergence du toit peut générer des reports de vides en surface.

Les exploitations menées par « piliers abandonnés » ou par « sous-niveaux abattus », peuvent, comme dans le cas des exploitations partielles menées en terrains stratifiés, générer des ruptures au toit de chambres laissées vides ou des ruptures de piliers. Lorsque la profondeur d'exploitation est importante, la répercussion des désordres en surface se traduit généralement, là encore, par l'apparition d'une cuvette d'affaissement.

Cas des exploitations salines par dissolution

Les cuvettes d'affaissement se développant à l'aplomb d'exploitations de sel peuvent résulter de différents mécanismes en fonction des contextes géologiques et d'exploitation des anciens travaux.

Durant la phase d'exploitation, l'extraction d'importantes quantités de saumure prélevées au sein des nappes salées localement présentes au toit des horizons salifères a engendré des dissolutions préférentielles en attirant l'eau douce superficielle vers le sel pour remplacer la saumure extraite. Lorsque l'extension de la nappe salée était limitée et que les prélèvements étaient importants, les affaissements résultants peuvent avoir présenté de fortes amplitudes (plusieurs mètres en une cinquantaine d'années dans certaines zones du bassin de Dombasle par exemple) et avoir induit des déformations en surface dommageables pour les biens.

Pour ce qui concerne la phase post-exploitation, les modifications hydrogéologiques induites par les exploitations de sel (par mines ou par cavités de dissolution) peuvent induire, de manière pérenne ou durant des périodes prolongées, des circulations d'eaux non saturées à la surface des couches de sel. Lorsque ces modifications sont de faible ampleur et affectent de très larges secteurs, les répercussions en surface sont très limitées. Dans certaines configurations spécifiques toutefois (présence de surépaisseurs significatives de sel, variation de pendage des couches), les dissolutions peuvent enlever une épaisseur de sel suffisamment importante et donner naissance à des cuvettes peu étendues et sensiblement plus marquées.

Les cavités créées par dissolution au sein du sel par les exploitants tendent, pour leur part, à se refermer du fait des caractéristiques rhéologiques particulières du sel. Pour les cavités peu profondes (jusqu'à quelques centaines de mètres), le phénomène est négligeable. Ce n'est plus le cas pour les cavités profondes (plus de 1000 m) qui se referment assez rapidement. Il en résulte un affaissement en surface d'amplitude souvent réduite car la fermeture « attire » du sel pouvant venir de très loin. L'affaissement se développe donc sur une surface nettement plus importante que l'aire d'influence définie en périphérie des exploitations d'autres matériaux.

Enfin, l'intrusion lente et progressive d'eau au sein d'anciens secteurs de mines d'évaporites exploités par des méthodes totales peut entraîner des dissolutions, elles aussi lentes et progressives, également susceptibles d'induire en surface des affaissements.

Cas des ouvrages en combustion

L'échauffement accidentel ou l'auto-échauffement de la matière organique persistant au sein d'anciens travaux souterrains ou d'ouvrages de dépôt peut initier la combustion du minerai dans le cas des mines de combustibles solides (charbon, lignite, schistes bitumineux...).

Cette combustion induit la « disparition » de matériau et, de fait, l'apparition possible d'affaissements en surface. La lenteur du mécanisme et les volumes généralement limités de vide créés expliquent que les manifestations en surface se traduisant, à quelques exceptions près, par la création de cuvettes d'affaissements peu importantes, tant en terme d'amplitude des mouvements verticaux qu'en terme de superficie des cuvettes.

Ces affaissements limités peuvent s'observer aussi bien en surface des verses ou terrils en combustion qu'à l'aplomb d'anciens travaux souterrains soumis au phénomène de combustion spontanée. En sus des mouvements de terrain au sens strict, d'autres types de risques ou nuisances, bien plus critiques, peuvent affecter les personnes et biens environnants (incendies, accumulation de gaz toxiques), ou être

à l'origine de sur-accidents (proximité de conduites de gaz, présence d'anciennes munitions enfouies au sein du dépôt ...).

2.2.3 LES EFFONDREMENTS LOCALISES

Définition et effets

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains. Si, dans la majorité des cas, cette profondeur se limite à quelques mètres, dans certaines configurations particulières, elle peut atteindre voire dépasser une dizaine de mètres (effondrements de tête de puits par exemple).

En fonction du mécanisme initiateur du désordre et de la nature des terrains de subsurface, les parois du cratère peuvent être sub-verticales ou inclinées, donnant ainsi naissance à une forme caractéristique d'entonnoir.

Les dimensions du désordre et le caractère brutal de sa manifestation en surface font des effondrements localisés des phénomènes potentiellement dangereux, notamment lorsqu'ils se développent au droit ou à proximité de secteurs urbanisés.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

L'effondrement localisé par rupture du toit d'une galerie : le phénomène de fontis

On parle de **fontis** lorsque l'instabilité qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation...). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface et, si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « auto-comblement », la voûte peut atteindre la surface du sol. Si le développement d'une montée de voûte est un phénomène très lent qui peut prendre plusieurs années ou décennies, l'apparition du fontis en surface se fait, quant à elle, de manière soudaine, ce qui rend le phénomène potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise (photo 6).



Photo 6 : Fontis de petite taille dans le bassin ferrifère lorrain

L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds. Les retours d'expérience menés sur plusieurs bassins miniers ont ainsi montré que, sauf spécificité géologique ou d'exploitation, au-delà d'une cinquantaine de mètres de profondeur (et parfois moins), les anciens vides miniers n'étaient plus susceptibles de provoquer ce phénomène en surface.

L'effondrement par rupture de pilier(s) isolé(s)

Au sein d'une exploitation menée par la méthode des chambres et piliers abandonnés, la ruine d'un (ou de quelques) pilier(s) peut se traduire, en surface, par un effondrement lorsque la profondeur des travaux et la raideur du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes. On parle alors de **rupture de pilier(s) isolé(s)**.

La dimension de la zone affectée en surface est généralement plus importante que celle résultant d'un simple fontis mais sensiblement plus réduite que dans le cas d'un effondrement généralisé décrit plus loin. Comme les fontis, les ruptures de piliers isolés sont des phénomènes purement locaux qui ne dépendent pas de la géométrie globale des exploitations mais uniquement de conditions locales défavorables.

Ces conditions défavorables peuvent résulter de la méthode d'exploitation ayant conduit, dans certains secteurs, à des extractions locales trop intensives laissant des piliers sous-dimensionnés, fragilisés ou mal superposés. Elles peuvent aussi résulter d'hétérogénéités géologiques (zones fracturées ou faillées, venues d'eau...).

Comme les fontis, l'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds

L'effondrement d'une tête de puits

Un ancien puits d'exploitation, mal remblayé (à l'aide de matériaux qui peuvent être remobilisés, notamment en présence d'eau), peut débourrer, c'est-à-dire voir son remblai s'écouler au sein des ouvrages souterrains auquel il est raccordé, avec pour

conséquence la formation d'un cratère présentant les mêmes dimensions que la colonne du puits.

Ce débouillage peut, dans certains cas (assez fréquents lorsqu'il s'agit de très vieux puits), s'accompagner, ou être suivi, d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains peu compétents environnants, comme le sont généralement les terrains superficiels. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent des caractéristiques géologiques et mécaniques locales des terrains.

La manifestation en surface peut ainsi se restreindre à un cratère de petite taille (quelques mètres de diamètre au maximum) ou générer des désordres plus importants (diamètre pouvant dépasser une dizaine de mètres) (Photo 7).



Photo 7 : Effondrement d'une tête de puits en Allemagne.

L'effondrement de la surface peut également résulter de la rupture de l'ouvrage réalisé en tête de puits (platelage en bois, dalle de surface, bouchon mal dimensionné...). Dans ce cas, l'effondrement se circonscrit généralement au seul diamètre de puits, la rupture des terrains environnants n'étant qu'exceptionnelle.

La rupture d'une tête de filon

Lorsque l'exploitation d'un filon s'est développée à proximité immédiate de la surface ou lorsqu'une exploitation à ciel ouvert a contribué à excaver postérieurement le stot de protection laissé au-dessus d'un filon exploité en souterrain, il convient de s'interroger sur le risque de rupture de la tête de filon. Cette rupture peut se développer par cisaillement le long des interfaces filon-épointes (on parle alors de rupture du pilier couronne) ou par cisaillement sub-vertical de l'épointe la plus sensible à une rupture en porte-à-faux.

La forme du cratère en surface dépend étroitement de la nature des terrains et des caractéristiques d'exploitation mais peut différer du fontis par un contour plus allongé, aligné sur l'orientation du filon. Si la largeur d'effondrement n'excède ainsi que très rarement une dizaine de mètres, l'extension longitudinale peut atteindre plusieurs dizaines de mètres dans le prolongement du filon (exemple des anciennes mines de fer de Segré (49)).

Débouillage d'un chantier penté remblayé

Ce mécanisme, susceptible d'affecter les couches fortement pentées (filons, couches en dressant), est assez similaire à celui d'un débouillage de puits. Lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides, la rupture d'un barrage d'arrêt souterrain peut induire un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit un effondrement en surface dont la forme et les dimensions dépendent directement des conditions d'exploitation.

Combustion

Dans certaines configurations très spécifiques, la combustion de matières carbonées présentes au sein de travaux souterrains ou d'ouvrages de dépôt d'anciennes mines de combustibles solides, peut générer la formation de petites cavités proches de la surface susceptibles de s'effondrer. Dans un tel scénario, les conséquences potentielles sur les victimes sont aggravées du fait de la température des terrains incandescents ou des vapeurs émises (pouvant atteindre plusieurs centaines de degrés).

2.2.4 LES EFFONDREMENTS GENERALISES

Définition et effets

Les effondrements généralisés, également appelés effondrements en masse, se manifestent par la rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale peut atteindre plusieurs mètres et même plusieurs dizaines de mètres quand c'est une cavité de dissolution du sel qui s'effondre. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier » dont les conséquences peuvent, elles aussi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface (Photo 8).



Photo 8 : Conséquences en surface d'un effondrement massif.

Ils traduisent une instabilité d'ensemble d'une partie de l'exploitation résultant généralement d'une extraction trop intensive. Ce sont des phénomènes heureusement très rares mais dont les conséquences sont potentiellement graves car ils génèrent une quantité considérable d'énergie. Ils peuvent ainsi s'accompagner de secousses sismiques, parfois détectables jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres du secteur concerné. Notons également l'effet de souffle susceptible de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts, mettant ainsi en péril les personnes et installations se trouvant à proximité (phénomène « d'air blast »).

Les effondrements généralisés peuvent affecter des exploitations profondes comparativement aux effondrements localisés. Leur développement exige également une extension horizontale des travaux suffisante au regard de leur profondeur.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

L'effondrement brutal de piliers abandonnés résultant d'une rupture du toit

Les effondrements brutaux exigent une combinaison de critères défavorables à la stabilité. Ils ne peuvent en effet se développer que dans le cas où une rupture simultanée des piliers et des terrains de recouvrement est envisageable. Pour ce faire, deux conditions sont généralement requises.

De tels phénomènes exigent l'existence d'une configuration d'exploitation que l'on peut caractériser de « fragile ». En ce sens, l'existence de taux de défrèvement élevés, de volumes de vides importants et la présence de configurations d'exploitation peu robustes (piliers sous-dimensionnés, présentant un fort élancement, exploitation multi-niveaux avec mauvaise superposition des piliers) sont autant de paramètres favorables au développement d'une rupture en masse.

De plus, puisque la rupture des piliers doit être associée à une rupture concomitante des terrains de recouvrement, ces phénomènes se développent préférentiellement sous des recouvrements présentant un (ou des) horizon(s) raide(s), capable(s) de reprendre tout ou partie du poids des terrains de surface en le reportant sur les bords fermes, ce qui soulage (temporairement) les piliers et autorise, indirectement, une exploitation excessive et un sous-dimensionnement des piliers.

Si ces bancs raides dans le toit atteignent leur limite élastique, ils peuvent, en cas de sollicitation différée, être amenés à se rompre brutalement. La rupture du (ou des) banc(s) raide(s) par flexion ou cisaillement le long des bords fermes induit une surcharge soudaine appliquée aux piliers qui se retrouvent brutalement soumis à l'intégralité du poids du recouvrement. Ces piliers très fragiles se rompent alors de manière simultanée et la descente du recouvrement s'effectue en un temps très court (quelques secondes), ce qui explique la brutalité du phénomène en surface.

Rupture en chaîne des piliers

La déstabilisation d'un grand nombre de piliers ne se traduit pas inéluctablement par un effondrement brutal induisant une secousse sismique majeure. L'instabilité peut résulter d'une rupture progressive « en chaîne » des piliers adjacents.

Ce type de manifestation, semble-t-il assez rare, exige que les piliers aient, dans leur grande majorité, atteint un « état-limite » de stabilité. La modification ou le développement d'un facteur déclenchant peut alors suffire à initier la rupture d'une partie des piliers. En se ruinant, ces derniers induisent un report de charge sur les piliers voisins qui, à leur tour, se rompent. Le recouvrement s'effondre alors en suivant le front d'éboulement souterrain. Le phénomène n'est pas aussi violent que celui décrit ci-dessus mais la cinétique de l'effondrement (quelques minutes à quelques heures) suffit à le rendre potentiellement dangereux pour les personnes et les biens situés dans son emprise lorsque l'amplitude des mouvements prévus en surface est importante.

L'effondrement de cavités salines de dissolution

Le problème résulte de la rupture différée du toit de cavités salines isolées, parfois oubliées, dont la taille a fini, avec le temps, par dépasser une valeur limite assurant la stabilité de l'ouvrage. L'évolution de la taille des cavités, même longtemps après la fin des travaux d'extraction de saumure, s'explique fréquemment par la mise en communication, volontaire ou involontaire, de cavités voisines durant la phase d'exploitation, autorisant ainsi la circulation d'eaux non saturées demeurant agressives vis-à-vis du sel constituant l'encaissant des cavités.

Dans la majorité des cas, ces effondrements se développent sur quelques heures, voire quelques dizaines d'heures, la cinétique du mouvement étant conditionnée par l'évacuation de la saumure. Dans le cas, rare, où cette saumure est remplacée par de l'air, le mouvement peut alors prendre un caractère brutal (Photo 9).



Photo 9 : Effondrement à l'aplomb d'une mine de sel exploitée par dissolution.

On notera également, pour mémoire, que des désordres graves peuvent être causés par des forages non étanches traversant à la fois des horizons salifères et des nappes d'eau en charge sous ces formations. Les remontées d'eau peuvent en effet induire des dissolutions et créer des cavités de grande taille au sein des évaporites.

2.2.5 LES GLISSEMENTS OU MOUVEMENTS DE PENTE

Définition et effets

Les mouvements de pente, qu'ils soient superficiels ou profonds (glissements, ravinements), constituent le type de désordres le plus couramment observé le long des flancs des ouvrages de dépôts ou des versants de découvertes creusées en roche meuble.

Mouvements superficiels

Il s'agit de phénomènes généralement lents et mettant en jeu des volumes de matériau restreints (quelques dizaines de m³). Ils prennent principalement la forme de glissements pelliculaires ou de rigoles de ravinement, parfois profondes, avec pour conséquence l'épandage de matériau en pied. Si les éboulis ne sont pas remaniés, la configuration redevient stable et l'instabilité cesse.

Si ce type de phénomènes induit fréquemment des nuisances paysagères, il est relativement rare que des risques pour les personnes et les biens en résultent directement, tant en pied qu'en crête de talus. Les éléments éboulés peuvent toutefois contribuer à affecter l'écoulement de cours d'eau situés en aval immédiat du pied. D'autre part, lorsque les crevasses de ravinement atteignent des profondeurs importantes (jusqu'à plusieurs mètres) et présentent des parois sub-verticales, des risques de chutes de personnes dans ces « canyons » ainsi que des risques de chutes de pierres ou d'ensevelissement sous des éboulements de parois doivent être pris en compte.

Le développement d'instabilités superficielles peut favoriser le déclenchement d'une rupture de plus grande ampleur et devra donc, systématiquement, être pris en considération. Une attention toute particulière doit ainsi être accordée au développement de ce type de désordres le long des flancs de digues de rétention. En effet, un affaiblissement, même limité, des ouvrages de rétention des résidus liquides ne doit, en aucun cas, être négligé.

Mouvements profonds

Les glissements profonds résultent du mouvement d'une masse de terrain le long d'une zone de rupture définie par une surface continue (dont la forme peut être circulaire, plane ou quelconque) et dont la vitesse de déplacement, en phase critique, varie fréquemment de quelques millimètres à quelques mètres par heure. Ce type de phénomène est susceptible d'affecter aussi bien les ouvrages de dépôts que les flancs de découvertes creusées en massif de roche tendre.

Les volumes concernés, qui peuvent s'avérer importants, se répandent vers l'aval sous forme de cônes d'épandage et peuvent être à l'origine de la dégradation des éventuels bâtis et ouvrages situés en pied. Il peut également s'avérer nécessaire de s'attacher à caractériser les effets que ces mouvements de masse peuvent produire sur les terrains situés à l'amont du talus (effet de recul de crête).

Lorsque les discontinuités affectant le massif rocheux ou l'ouvrage de dépôt ne jouent pas un rôle prépondérant sur son comportement, l'instabilité prend généralement la forme d'un glissement circulaire ou « en loupe ». A l'inverse, lorsque l'instabilité prend naissance à la faveur d'une couche ou d'une hétérogénéité présentant des caractéristiques géomécaniques médiocres, il s'agit plutôt d'un glissement plan (Photo 10).



Photo 10 : Glissement d'un compartiment rocheux découpé par deux failles majeures et sous-miné par d'anciens travaux miniers souterrains.
Grande découverte de charbon de Carmaux.

Toute rupture, même initialement lente et progressive, affectant une digue de bassin de rétention est susceptible de se transformer en coulée si les matériaux stockés en amont finissent par submerger l'ouvrage rompu et se déverser dans l'environnement.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

La rupture d'un flanc de talus intervient lorsque les forces motrices (de pesanteur et hydrauliques) qui tendent à le mettre en mouvement deviennent supérieures aux forces résistantes (résistance au cisaillement des matériaux) qui s'opposent pour leur part aux déformations et aux glissements des pentes. C'est généralement le développement de perturbations affectant les conditions environnementales caractérisant le talus qui constitue l'élément déclencheur de la rupture.

Mauvaise gestion des eaux

Le développement de mouvements de pente résulte fréquemment d'une mauvaise **gestion des eaux souterraines ou de surface**. Lorsque aucun système de drainage et d'écoulement maîtrisé des eaux n'a été mis en œuvre (ou lorsqu'il n'est pas ou plus efficace), le ruissellement des eaux le long des flancs peut favoriser l'entraînement des particules, notamment dans des régions sujettes à des précipitations violentes (orages méditerranéens par exemple).

La rupture peut également survenir en cas de modification des conditions hydrauliques régnant dans un ouvrage de dépôt et, notamment, à sa base. Si, dans la plupart des configurations, le dépôt est constitué de matériaux perméables et convenablement drainés, certaines modifications du régime d'écoulement des eaux (obturation ou rupture d'un drain, création d'un bassin de décantation) peuvent initier la présence d'eaux stagnantes à l'interface dépôt-terrain d'assise ou la formation de zones marécageuses en pied de dépôt. Lorsque les caractéristiques des matériaux constituant la base du talus s'avèrent sensibles à l'eau, ces modifications hydrauliques peuvent être à l'origine de ruptures de grande ampleur.

Topographie des flancs mal adaptée

Le développement de mouvements superficiels s'observe préférentiellement le long de flancs **peu végétalisés**, contenant une proportion importante de particules fines (d'où une grande sensibilité des digues). L'existence de grandes surfaces planes faiblement inclinées vers le talus aval ou, à l'inverse, de **talus aval trop raides** favorisent également le développement de glissements pelliculaires ou d'érosion régressive des flancs.

Affaiblissement du pied de talus

Les ruptures profondes peuvent se développer en cas d'**affaiblissement du pied du talus** (ou butée de pied). Ceci peut résulter de l'entraînement de quantités importantes de produits en cas de crues sévères affectant un cours d'eau longeant la base du talus. Le prélèvement de matériau à la base du talus, dans un but d'exploitation de substances valorisables ou d'aménagement des terrains en pied, peut également contribuer à sa déstabilisation. Enfin, on notera le cas spécifique où le pied de talus est affecté par la présence d'anciens travaux miniers souterrains. Si ces travaux viennent à se rompre ou s'affaisser, la remobilisation du pied peut être à l'origine d'une déstabilisation du talus.

Rupture des terrains d'assise

Dans le même ordre d'idée, d'éventuelles modifications hydrauliques peuvent être à l'origine d'instabilités de talus induites par **rupture ou fluage des terrains d'assise** lorsque ceux-ci s'avèrent sensibles à l'eau (limons argileux par exemple). L'affaiblissement des caractéristiques mécaniques des terrains d'assise peut aboutir à une lente déformation du dépôt ou du flanc de fosse, sous son propre poids, généralement dans le sens de la pente du terrain naturel. Il se forme alors, de manière caractéristique, un bourrelet au pied des terrains d'assise et une inclinaison des arbres en avant du talus.

Autres mécanismes

On citera enfin comme autres mécanismes aggravants, voire déclencheurs, les **sollicitations dynamiques** (séismes, vibrations...), la mise en œuvre de certains aménagements (enlèvement de la végétation, réaménagements non maîtrisés), le développement de certaines **activités humaines** (VTT, moto-cross, surcharge en bord de crête...) ou **animales** (animaux fouisseurs) susceptibles de contribuer à la déstabilisation des flancs de talus.

A l'inverse, certains matériaux de terribles entrés en combustion acquièrent, sous l'effet de transformations physico-chimiques, une cohésion supérieure à leur cohésion initiale ce qui constitue un facteur favorable à la stabilité en grand de l'ouvrage.

2.2.6 LES COULEES

Définition et effets

Les coulées dynamiques se situent à mi-chemin entre les phénomènes de transport de matériaux par l'eau et les phénomènes de rupture de terrain. Elles aussi donc tout aussi bien pu être traitées dans le paragraphe traitant du risque d'inondations. Les coulées constituent les désordres les plus dangereux susceptibles d'affecter les personnes et les biens situés dans l'environnement de talus liés à l'existence d'anciens ouvrages de dépôts.

Elles affectent principalement les bassins de rétention de matériaux fins mais peuvent, exceptionnellement, se développer le long de certains terrils, voire de flancs de découvertes creusées en massif de roche tendre.

Outre les conséquences environnementales potentiellement catastrophiques (notons que les deux exemples récents de Aznalcóllar en Espagne et Baia Mare en Roumanie se sont passés durant la phase d'exploitation), la propagation à grande vitesse et sur de grandes distances de quantités très importantes de matériaux semi-fluides (manifestation assez semblable à une avalanche) peut également entraîner des risques élevés pour les personnes et biens situés dans l'emprise de l'épandage.

Les distances d'épandage dépendent notamment des caractéristiques du dépôt (hauteur, volume) et de la géométrie des flancs (une coulée est d'autant plus destructrice que la pente dévalée est forte). Il n'est pas rare qu'elles atteignent plusieurs centaines de mètres, voire plus.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Coulées affectant d'anciens résidus de traitement

Ce type de coulée s'initie souvent par un affaiblissement puis une déstabilisation de la digue de rétention érigée pour assurer la stabilité des résidus, du fait notamment d'une érosion de ses flancs, d'un affaiblissement du pied de talus ou d'une modification sensible des conditions hydrogéologiques régnant dans le dépôt. Lorsque la digue se rompt, elle est submergée par les matériaux fins, sans cohésion, qui se déversent vers les points bas topographiques du secteur.

Il convient de prêter une attention toute particulière à la technique de constitution des digues. Ainsi, la méthode dite « amont » (la plus ancienne et la moins coûteuse en espace et en matériau constituant les flancs) est nettement plus propice aux risques de rupture en grand que les méthodes « verticale » ou « aval » car la stabilité du flanc de digue repose, pour bonne partie, sur les matériaux pulvérulents plus ou moins bien consolidés que constituent les résidus eux-mêmes.

Coulées par liquéfaction d'ouvrages de dépôt

Les coulées peuvent également être initiées par le mécanisme de liquéfaction des matériaux stockés (c'est notamment le cas de l'ensemble des coulées qui concernent les terrils). Lorsque des matériaux pulvérulents et saturés sont soumis à d'importantes vibrations (solicitations sismiques, tirs de mine, effondrement d'une partie du flanc...) et que le drainage s'avère insuffisant, il peut en résulter une augmentation de la pression interstitielle régnant au sein du dépôt. Lorsque cette pression interstitielle surpasse les forces de contact entre grains, les matériaux, même partiellement consolidés jusqu'alors, se liquéfient brutalement et s'effondrent sur eux-mêmes ou entraînent soudainement un fort report de contraintes sur les flancs des digues érigées pour les contenir.

Nuées ardentes

On retiendra dans la liste des mécanismes pouvant initier le développement d'écoulements dynamiques de matériaux semi-fluides, l'éboulement possible de talus chauds entraînant la formation de nuées ardentes qui recouvrent de grandes surfaces en pied de talus de poussières incandescentes, potentiellement meurtrières.

Coulées affectant des flancs de fosses à ciel ouvert

Ce type de phénomène résulte de la liquéfaction de matériaux meubles (principalement les éboulis présents le long des flancs), hétérogènes et à matrice principalement argileuse. Sous l'effet d'un important apport d'eau (fortes précipitations, rupture d'un drain ou d'une conduite...), ces matériaux peuvent voir leur teneur en eau dépasser subitement la teneur en eau critique de la matrice. Le comportement de ces éléments, initialement solides, peut alors être assimilé à celui d'un matériau semi-fluide qui s'écoule le long des flancs de la fosse.

Dans les faits, en fonction de la quantité d'eau apportée et de la pente du talus, les coulées peuvent progressivement s'accroître lorsqu'elles rencontrent dans leur progression d'importantes quantités de terrains meubles qu'elles peuvent ainsi mettre en solution. L'absence d'un système efficace de drainage des écoulements superficiels est donc un facteur favorable à l'initiation de ce type de phénomène.

2.2.7 LES ECROULEMENTS ROCHEUX

Définition et effets

Un écoulement rocheux est un mouvement de pente soudain au cours duquel des masses rocheuses, plus ou moins volumineuses, se détachent d'une paroi généralement très raide pour aller s'écraser au pied du front. Ce type de phénomène concerne donc essentiellement les fronts de fosses à ciel ouvert creusés dans des massifs de roches dures, avec de forts angles de talus.

En fonction du volume de roche écroulé, on parle de chutes de pierres ($< 0,1 \text{ m}^3$), de blocs ($0,1 \text{ m}^3$ à 10 m^3) ou plutôt d'écroulements (10 m^3 à 10^4 m^3), voire d'écroulements majeurs ($> 10^4 \text{ m}^3$).

Quel que soit le volume écroulé, la chute de masses rocheuses présente un danger pour les personnes se situant au sein de la zone d'épandage. A partir de volumes supérieurs au m^3 , ce type de phénomène peut également générer des dégâts irréversibles aux biens.

Il est donc essentiel d'identifier, même de manière approximative, l'extension du cône d'éboulis. Cette dernière dépend tout d'abord de la nature et de la pente des terrains situés en pied de falaise. Ainsi, un pied de pente constitué de matériau rocheux et orienté fortement vers l'aval sera favorable à la propagation de blocs sur de grandes distances. L'extension de la zone d'épandage dépend également du volume de matériau écroulé. Toutes choses égales par ailleurs, du fait de l'effet de masse, les distances de propagation sont en effet généralement plus importantes dans le cas d'écroulements en masse que dans le cas de blocs isolés. A ce propos, plus la masse rocheuse écroulée sera fracturée et plus elle pourra se disloquer en petits blocs au cours de sa chute, ce qui peut favoriser une propagation des éboulis vers l'aval. Enfin, la dimension de la zone d'épandage dépend également du type et de la cinétique du mouvement à l'origine de la rupture de la masse rocheuse (basculement, glissement...).

En cas d'écroulements majeurs, l'analyse de l'effet de recul du front rocheux peut mériter une attention particulière si les bordures de crêtes sont situées à proximité de zones urbanisées.

Mécanismes ou scénarios initiateurs

Il existe un grand nombre de mécanismes susceptibles d'initier des chutes de blocs ou d'être à l'origine d'une rupture d'un pan de front rocheux. C'est généralement la combinaison entre le **réseau de discontinuités** affectant le massif (joints de stratification, failles, fractures ou diaclases, contact entre le massif et les terrains superficiels...) et la **géométrie des flancs de fosse** (hauteur, pente, présence de surplombs...) qui détermine la nature du mécanisme initiateur de rupture.

Nous nous contenterons d'en citer quelques-uns, sans les décrire dans le détail. On se reportera pour de plus amples renseignements à la littérature spécialisée, assez fournie sur le domaine.

- **Rupture de masses rocheuses** : on parle de rupture lorsque la masse rocheuse instable se détache brusquement de la paroi et, sous l'effet de la gravité, s'écrase en pied de front rocheux avec une trajectoire principalement verticale. Plusieurs géométries peuvent être à l'origine d'un mécanisme de rupture de masses rocheuses (chute de surplombs, rupture de monolithes, basculement suite à la rupture du pied de talus, etc.)
- **Glissements rocheux** : on parle de glissements lorsque l'instabilité se développe le long d'une (ou plusieurs) hétérogénéité(s) inclinée(s) avec un pendage aval. Ce type de phénomène se produit lorsque les frottements entre bancs ne suffisent plus à contenir les efforts induits par le poids des bancs sus-jacents. Le phénomène peut être facilité par la présence de joints de stratification argileux et / ou par l'affaiblissement naturel ou artificiel d'une butée efficace en pied (fouilles à la base du talus). On parle de glissements plans lorsque la rupture s'effectue le long d'une surface de faiblesse plane bien individualisée ou de glissements en dièdre lorsque deux plans de discontinuité se coupent selon une ligne à pendage aval interceptant le flanc de fosse (Photo 11).



Photo 11 : Exemple de glissement dièdre. On discerne sur la photo la zone d'arrachement d'où s'est détaché le dièdre (Mine d'or d'Ity-Côte d'Ivoire).

- **Ruptures complexes** : les éboulements rocheux résultent souvent de mécanismes complexes ou de la combinaison de mécanismes élémentaires. Pour éviter d'entrer dans un degré de détail non compatible avec les objectifs de ce guide, nous nous contenterons de citer pour mémoire les mécanismes de fauchage, de flambage, de fluage de couches tendre en pied de talus et de glissements bi ou multi-linéaires.

3. L'EMISSION EN SURFACE DE GAZ DE MINE

3.1 ORIGINE DU PHENOMENE REDOUTE

Le phénomène d'émission de gaz de mine en surface, susceptible d'engendrer des dangers pour les personnes et les biens, ne concerne pratiquement que les exploitations minières souterraines. Ces exploitations peuvent, en effet, réunir trois éléments nécessaires pour l'apparition du phénomène redouté :

- la présence de vides constituant un réservoir souterrain ;
- la présence de gaz dangereux ;
- la possibilité d'accumulation et de migration de ces gaz, à des teneurs significatives, vers la surface.

Les excavations souterraines engendrent, en effet, deux modifications fondamentales du milieu favorisant directement le dégagement, l'accumulation et la circulation de gaz au sein des massifs rocheux. Elles génèrent :

- d'une part, la création de vides résiduels, souvent importants, provenant des travaux d'extraction (chambres abandonnées, zone partiellement remblayée et même foudroyées) ou des ouvrages d'infrastructures (galeries, puits) laissés en l'état. Dans le même ordre d'idée, l'exploitation provoque la détente et la

fracturation des terrains de recouvrement, ce qui induit l'augmentation de leur porosité et de leur perméabilité. A titre d'exemple, les évaluations menés dans des mines de houille exploitées avec le foudroyage des terrains ont permis d'estimer que le volume de ces vides résiduels pouvait atteindre jusqu'à 25 %, voire 35 % du volume total de minerai extrait. ;

- d'autre part, un rabattement de la nappe aquifère, ce qui peut faciliter la migration de gaz dans les terrains de recouvrement.

Les vides résultant de l'activité minière présentent un espace permettant un dégagement ou une accumulation de gaz de mine. Lors de l'exploitation, ces gaz sont dilués et évacués par la ventilation. Après l'arrêt de l'exploitation, les vides miniers, s'ils ne sont pas envoyés en totalité, constituent un véritable réservoir souterrain plus ou moins confiné, dans lequel les gaz peuvent s'accumuler à des concentrations élevées. Selon la nature du matériau exploité et des gaz présents dans le gisement, l'atmosphère minière résiduelle peut avoir une composition extrêmement différente d'un site à l'autre.

Ces réservoirs miniers ne présentent généralement pas une délimitation et une forme bien précises, comme cela peut être le cas, par exemple, d'une cavité souterraine créée par dissolution dans une masse saline. Ils n'en constituent pas moins des ensembles de vides « élémentaires », plus ou moins interconnectés, qui peuvent, dans certaines configurations, correspondre à des volumes disponibles considérables. Pour une mine de charbon, ce volume peut atteindre plusieurs millions m³, voire plusieurs dizaines de millions m³.

Le gaz de mine présent dans le réservoir minier souterrain peut, sous certaines conditions, migrer en quantité significative vers la surface. Cette migration peut se faire de manière privilégiée au travers d'anciens ouvrages reliant les travaux souterrains à la surface (puits, descenderies, galeries d'accès, sondages..) si ceux-ci sont non ou mal obturés, mais aussi au travers des terrains de recouvrement (Photo 12).



Photo 12 : Visualisation, à l'aide de fumigène, de la sortie de gaz de mine par une galerie minière

Les mécanismes pouvant conduire à ces migrations sont nombreux. Ils résultent le plus souvent du gradient de pression régnant entre les travaux souterrains et l'atmosphère extérieure.

3.2 LE PHENOMENE REDOUTE

3.2.1 DESCRIPTION ET EFFETS

Suivant la nature et la composition de ce gaz de mine, les émissions gazeuses en surface peuvent présenter plusieurs risques ou nuisances vis-à-vis des personnes et des biens. On retiendra notamment les risques d'asphyxie, d'intoxication ou d'irradiation et, enfin, le risque d'inflammation ou d'explosion. Ces risques sont accrus lorsque le gaz de mine se trouve être confiné, c'est-à-dire peu ou pas dilué. Ils sont, bien évidemment, moindres dans le cas d'une émission diffuse dans une atmosphère ouverte.

Le gaz de mine est généralement un mélange de gaz d'origines diverses, à des teneurs variables. Certains gaz ont une origine endogène⁴ (grisou, dioxyde de carbone, radon), d'autres une origine exogène⁵ (monoxyde de carbone, dioxyde de carbone, sulfure d'hydrogène, par exemple).

Les principaux constituants du gaz de mine, décrits ci-dessous, ne présentent pas les mêmes niveaux de risque pour les personnes ou les biens situés en surface. Toutefois, les dangers de chacun des composants se combinent. Ainsi, une même teneur en gaz toxique sera plus dangereuse dans un mélange gazeux contenant d'autres gaz toxiques (ou encore un déficit en oxygène) que si elle y est seule.

Le méthane (CH₄) et ses homologues supérieurs (éthane, butane, propane)

Le méthane est le principal constituant du grisou, gaz qui se rencontre essentiellement dans les exploitations de combustibles solides et, de manière moins importante, dans les mines de sel ou de potasse. On peut également le trouver dans les exploitations minières de pétrole, de calcaire asphaltique, de schistes bitumineux ou encore de bauxite.

Dans les *mines de charbon ou de lignite*, le méthane représente généralement une partie très majoritaire du grisou (jusqu'à 95 %, voire plus). D'autres gaz (éthane, butane, propane, azote, dioxyde de carbone...) peuvent également être présents, dans des proportions variables d'un gisement à l'autre, mais habituellement faibles.

Le grisou se trouve « piégé » dans le matériau exploité (charbon, lignite, schistes bitumineux...), sous forme adsorbée, et, de manière minoritaire, dans les pores des roches encaissantes, sous forme libre. Pendant l'exploitation et peu après celle-ci, du fait de la détente des terrains, il se dégage du charbon abattu et des terrains influencés. Néanmoins, des quantités notables de ce gaz restent contenues dans le gisement non exploité et les roches. Le dégagement gazeux, même s'il est lent, peut donc perdurer durant une longue période de temps, jusqu'à établissement d'un nouvel équilibre, différent pour chaque site, entre le grisou encore contenu dans les roches et le gaz libre existant dans les vides souterrains.

⁴ Endogène : contenu dans le gisement avant l'exploitation

⁵ Exogène : produit à partir d'une transformation chimique du gisement ou de certains éléments de la mine, pendant ou après l'exploitation

Le méthane est un gaz inodore, incolore et sans saveur. Il est environ deux fois moins lourd que l'air et a donc tendance à s'accumuler dans les points hauts et à migrer vers la surface. C'est un gaz non toxique et inoffensif sur le plan physiologique dans la mesure où sa présence n'engendre pas une diminution de la teneur en oxygène de l'atmosphère susceptible de présenter un danger d'asphyxie (voir plus loin). C'est essentiellement son inflammabilité (ou explosibilité) qui fait du méthane un gaz particulièrement dangereux.

Un mélange binaire d'air et de méthane est directement explosible lorsque la teneur en méthane est comprise entre 5 % (limite inférieure d'explosibilité) et 15 % (limite supérieure d'explosibilité). L'inflammation d'un tel mélange provoque des effets thermiques et mécaniques dangereux pour les personnes et dommageables pour les biens.

Les effets mécaniques d'une inflammation de méthane dépendent du volume de méthane disponible, de l'homogénéité du mélange et du degré de son confinement. On parlera ainsi, selon le cas, d'inflammation⁶ ou d'explosion⁷.

Notons qu'un mélange très (trop) riche en méthane (teneur supérieure à la limite supérieure d'explosibilité) s'avère également très dangereux, car il peut avoir un caractère asphyxiant (déficit d'oxygène) et sa dilution dans l'air peut le rendre directement inflammable.

Le dioxyde de carbone (CO₂)

Le dioxyde de carbone, qui est probablement le gaz le plus fréquemment rencontré dans les anciennes exploitations minières souterraines, peut avoir plusieurs origines.

Dans certaines *mines de charbon*, on peut rencontrer des grisous constitués, en tout ou partie, de CO₂. Ce gaz est alors présent, sous forme adsorbée, dans le charbon, comme le méthane. On l'expliquerait par une substitution plus ou moins importante du méthane originel, suite à une activité volcanique postérieure au dépôt houiller.

Le dioxyde de carbone peut également provenir de la combustion (feux souterrains) ou de l'oxydation lente de matières organiques. C'est le cas des exploitations de charbon et de lignite, mais cela peut aussi concerner, dans une moindre mesure, *tout autre type d'exploitation souterraine*, où la matière organique est présente. Celle-ci peut être aussi d'origine anthropique (bois de soutènement, par exemple).

Enfin, une autre origine du CO₂ peut être l'action d'eau acide sur les roches carbonatées. Cette situation peut se rencontrer dans *de nombreuses mines*, indépendamment de la substance exploitée.

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore et inodore. Il est environ une fois et demie plus lourd que l'air. Il a donc tendance à s'accumuler dans les points bas non ventilés. Non inflammable, le CO₂ n'est que très peu toxique aux faibles concentrations mais il devient rapidement dangereux, même en présence d'oxygène, si sa teneur augmente. A titre d'exemple, dans la réglementation minière, la concentration dans l'air de 1% constitue un premier seuil limitant la durée

⁶ Flambée de grisou, en langage minier.

⁷ Coup de grisou, en langage minier.

d'exposition pendant le travail⁸. Son action toxique porte sur le système sanguin et surtout le système respiratoire. Substitué à l'oxygène de l'air ou diluant celui-ci, il peut également présenter un risque d'asphyxie pour les personnes exposées (voir plus loin).

Le monoxyde de carbone (CO)

Dans les exploitations minières abandonnées, ce gaz résulte essentiellement de l'oxydation, en général lente et à basse température, de charbon, d'hydrocarbures ou de toute autre matière organique présente. Ce phénomène peut se poursuivre jusqu'à l'insuffisance d'oxygène, ce qui interrompt la réaction chimique.

Le CO est également généré lors d'une combustion. On le rencontrera le plus souvent dans les *anciennes exploitations de charbon ou lignite*, matériaux plus susceptibles d'auto-échauffement (autrement appelé combustion spontanée), lorsqu'une faible circulation d'air frais perdure au travers des ouvrages souterrains.

Le CO est un gaz incolore, inodore, sans saveur, très diffusif et dont la masse volumique est très proche de celle de l'air. Il est inflammable lorsqu'il est mélangé dans l'air à des teneurs très élevées (au-delà de 12 %), très peu susceptibles d'être rencontrées. Son caractère fortement toxique le rend très dangereux. En effet, il entrave le transport de l'oxygène par le sang du fait de sa fixation peu réversible sur l'hémoglobine. Une concentration dans l'air de 50 ppm (0,005 %) constitue la valeur maximale pour une présence humaine prolongée⁹. A forte concentration, de l'ordre de 1000 ppm, il est très rapidement mortel.

Le sulfure d'hydrogène (H₂S)

Le sulfure d'hydrogène peut être rencontré dans les vieux travaux de *tous les types de mines* puisqu'il provient de la décomposition des vieux bois de soutènement, de la réaction d'eaux acides sur la pyrite contenue dans les minerais ou roches encaissantes ou de l'action de certaines bactéries sur les sulfates.

Le sulfure d'hydrogène est un gaz incolore qui présente une odeur caractéristique et désagréable d'œuf pourri sans que la sensation olfactive n'augmente avec la concentration. L'odeur, décelable à de très faibles concentrations (0,1 à 0,2 ppm), s'atténue ou même disparaît à forte concentration par « anesthésie de l'odorat ». Il est légèrement plus lourd que l'air. Comme le monoxyde de carbone, il est inflammable lorsqu'il se trouve mélangé à de l'air à des teneurs élevées (plus de 4 %), impossibles à rencontrer dans un contexte d'après-mine. C'est un gaz hautement toxique, s'attaquant, à des teneurs assez basses, au système nerveux humain. La concentration dans l'air de 5 ppm (0,0005 %) constitue une valeur limite à ne pas dépasser pour une présence humaine prolongée¹⁰. A plus forte concentration, il est mortel.

⁸ Arrêté du 8 juin 1990.

⁹ Arrêté du 8 juin 1990.

¹⁰ Arrêté du 8 juin 1990.

Le radon

Le radon provient de la désintégration naturelle du radium, produit de filiation de l'uranium et du thorium. C'est l'isotope ^{222}Rn , dont le précurseur est le ^{226}Ra , issu de ^{238}U , qui est le plus fréquent dans l'atmosphère.

On peut être amené à le rencontrer, bien évidemment, *dans les anciennes mines souterraines d'uranium*, mais aussi, plus généralement, dans tous les vides souterrains, quelle que soit leur origine, pour peu que les terrains encaissants contiennent de l'uranium, même en quantité infime (par exemple quelques mg/kg). C'est le cas des roches magmatiques acides mais aussi de certaines roches sédimentaires comme les schistes et surtout les charbons et lignites. Si les vides miniers souterrains sont peu ventilés, leur atmosphère peut être le siège de concentrations en radon, parfois élevées.

Le radon est le plus lourd des gaz. Il est inodore et incolore. C'est un élément radioactif qui peut s'avérer dangereux pour l'homme lorsqu'il est inhalé. Ses effets entraînent un excès du risque de cancer pulmonaire et bronchique

A l'air libre, sa concentration, fonction des conditions météorologiques et des caractéristiques du sol, est faible car il est dilué par le vent. En revanche, dans un bâtiment insuffisamment ventilé, il peut s'accumuler et atteindre des concentrations élevées qui peuvent, en cas d'exposition prolongée, générer un risque par inhalation de ses descendants à vie courte. La complexité de la gestion de ce risque a entraîné la définition, pour les bâtiments recevant du public, des valeurs d'activités volumiques de 400 et 1000 Bq/m³ pour mettre en œuvre des actions correctrices pour réduire cette exposition¹¹.

Contrairement aux gaz évoqués précédemment, le radon n'est pas un « produit » de l'activité minière. Il est déjà présent au sol avant l'ouverture de la mine. Toutefois, les effets de cette activité minière évoqués précédemment (augmentation de la perméabilité des terrains, ouvrages de communication) sont susceptibles de modifier la façon dont le radon émane en surface. Il peut ainsi se dégager vers l'atmosphère extérieure de manière plus concentrée, plus localisée et avec un flux plus fort qu'avant l'exploitation.

L'air désoxygéné

Les gaz de mine peuvent être présents dans les travaux miniers souterrains à des concentrations extrêmement variables. Le méthane et le dioxyde de carbone peuvent ainsi être rencontrés à des teneurs atteignant plusieurs pour cents voire plusieurs dizaines de pour cents. Les autres gaz ne présentent, sauf exception, que des teneurs beaucoup plus faibles.

Leur accumulation s'accompagne d'une baisse de la teneur en oxygène de l'atmosphère minière. Notons également les cas, relativement fréquents, de disparition partielle ou totale de l'oxygène, sans accumulation d'un autre gaz d'origine minière (dans ce cas, le gaz de mine est essentiellement composé d'azote).

¹¹ Circulaire conjointe DGS et DGUHC n°99/46 du 27 janvier 1999 relative à l'organisation de la gestion du risque lié au radon.

Les situations de déficit en oxygène sont susceptibles d'être rencontrés dans *tous les types d'exploitation minière* et particulièrement dans les exploitations houillères. Le gaz de mine présente alors un danger d'asphyxie pour les personnes. Une atmosphère où l'oxygène fait défaut entraîne, en effet, une perturbation des systèmes respiratoire et sanguin de la personne exposée. Un fort déficit peut entraîner la mort rapidement. A titre d'exemple, la réglementation minière¹² a fixé la teneur minimale en oxygène dans l'atmosphère dans les travaux souterrains à 19 % (la teneur normale dans l'air est d'environ 21 %).

3.2.2 MECANISMES OU SCENARIOS INITIATEURS

Plusieurs mécanismes, agissant seuls ou simultanément, peuvent être à l'origine de la remontée potentielle de gaz de mine vers la surface. Hormis les mécanismes spécifiques de diffusion et de transport de gaz dissous dans l'eau, des migrations de gaz vers la surface sont principalement animées par les mécanismes qui contribuent à générer une différence de pression positive entre un réservoir minier souterrain et l'atmosphère extérieure.

En effet, si le gaz de mine présent dans les vides souterrains est en surpression relative, même minime, par rapport à l'atmosphère externe, il aura tendance à s'écouler vers la surface. Toutes choses égales par ailleurs, cet écoulement sera d'autant plus important que la différence de pression sera élevée.

Production de gaz au sein des vieux travaux

Divers mécanismes physico-chimiques peuvent induire des dégagements gazeux et une mise en pression au sein du réservoir souterrain. Dans le cas de gaz tels que le monoxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène ou le radon, les quantités de gaz engendrées sont faibles et ne conduisent pas à une augmentation sensible de la pression de gaz dans le réservoir. Par contre, la production de dioxyde de carbone à partir des roches carbonatées et surtout la désorption du grisou (méthane ou dioxyde de carbone) à partir de charbon doivent être considérées comme susceptibles de conduire à une augmentation notable de la pression interne d'un réservoir minier souterrain.

Dans les gisements houillers dits « grisouteux », le charbon non exploité peut contenir des quantités assez considérables de grisou (5 à 15 m³ de méthane ou 10 à 20 m³ de dioxyde de carbone par tonne de charbon, voire plus encore) à des pressions pouvant atteindre 1 à 2 MPa. Il est donc théoriquement possible que des pressions de cet ordre puissent être atteintes dans les anciennes exploitations de houille par désorption du grisou résiduel. Ce phénomène, certes lent, peut perdurer longtemps après l'arrêt de l'extraction et doit donc être pris en compte.

La désorption de grisou depuis le charbon ne cesse qu'en présence d'une contre-pression suffisante. Cette contre-pression peut résulter de la charge hydraulique consécutive à l'envoyage des vides résiduels. En première approche, une charge hydraulique égale à la pression de grisou au sein du charbon limitera la désorption à un niveau très faible. Dans ce cas, les phénomènes de transport par l'eau de gaz dissous et de diffusion évoqués plus loin prennent le relais de la désorption, avec une cinétique plus lente.

¹² Arrêté du 8 juin 1990.

Le pistonnage par remontée de la nappe

L'ennoyage du réservoir minier réduit progressivement le volume des vides résiduels disponibles, avec pour effet de chasser le gaz de mine qu'ils contiennent. Selon la durée de cet ennoyage (pouvant varier de quelques mois à plusieurs décennies) et le volume total des vides, le phénomène de pistonnage du gaz par l'eau sera plus ou moins fort. La phase de remontée des eaux constitue donc une période transitoire fondamentale vis-à-vis du risque de remontée en surface de gaz de mine.

Néanmoins, dans certaines exploitations où cette phase d'ennoyage est achevée, il peut subsister des phénomènes hydrodynamiques transitoires tels que des remplissages et vidanges successifs de tout ou partie du réservoir ou des battements de la nappe souterraine.

Variations de la pression atmosphérique

Les *variations de la pression atmosphérique* contribuent également à une différence de pression entre le réservoir souterrain et l'atmosphère externe. Lors du passage d'une dépression météorologique, les anciens travaux peuvent se trouver momentanément en surpression, celle-ci engendrant (ou accentuant) alors la migration de gaz vers la surface. Ce phénomène transitoire peut conduire à un écart de pression de quelques kPa. Il n'est pas à négliger, en particulier lorsque les vides souterrains sont proches de la surface.

Tirage naturel

Dans certaines configurations, il peut s'établir, de manière naturelle, un écoulement gazeux entre le réservoir souterrain et l'atmosphère externe. Ce phénomène bien connu des anciens mineurs et largement utilisé par eux, s'appelle *tirage naturel*. Il a pour cause une différence de température entre les terrains et l'air atmosphérique et une différence d'altitude entre plusieurs orifices miniers.

Dans des conditions climatiques classiques, un certain gradient thermique entre l'atmosphère extérieure et le sous-sol, pouvant animer des circulations d'air dans le réservoir minier, s'établit selon les saisons. En hiver, l'air froid pénètre de l'extérieur vers les parties basses de la mine, se réchauffe en la traversant et ressort vers l'atmosphère par les points hauts, alors qu'en été, il s'établit une circulation inverse. Entre ces deux régimes, c'est-à-dire lorsque la température extérieure est peu différente de la température des terrains, la circulation d'air est nulle ou faible ou encore fluctuante selon les moments de la journée.

Un tel régime d'écoulement s'établit d'autant plus facilement que les communications entre le réservoir et l'extérieur seront faciles (par exemple, lorsque les orifices miniers sont mal obturés ou que les terrains de recouvrement sont peu épais et fracturés).

La diffusion

La diffusion constitue un autre mécanisme susceptible d'animer des migrations gazeuses. Lorsqu'un gaz autre que l'air occupe un réservoir minier souterrain, il présente une concentration (ou pression partielle) différente de celle qu'il a dans l'air. Dans ce cas, la différence de concentration entre le réservoir minier et l'atmosphère

est susceptible d'engendrer un transfert de ce gaz depuis l'endroit où il est le plus concentré (l'ancienne mine) vers l'endroit où il l'est le moins (l'air extérieur). Ce phénomène est toutefois très lent et n'engendre qu'un faible flux.

Mécanismes exceptionnels

On citera le cas de travaux de terrassement qui peuvent, dans le cas d'exploitations à faible profondeur, mettre à jour des anciens travaux et occasionner des sorties intempestives de gaz. Dans le même ordre des choses, le débouillage des remblais d'un puits incorrectement traité peut mettre en relation directe le réservoir minier et la surface et occasionner des sorties de gaz, en particulier sous l'effet d'un pistonnage dû à la descente brutale du remblai.

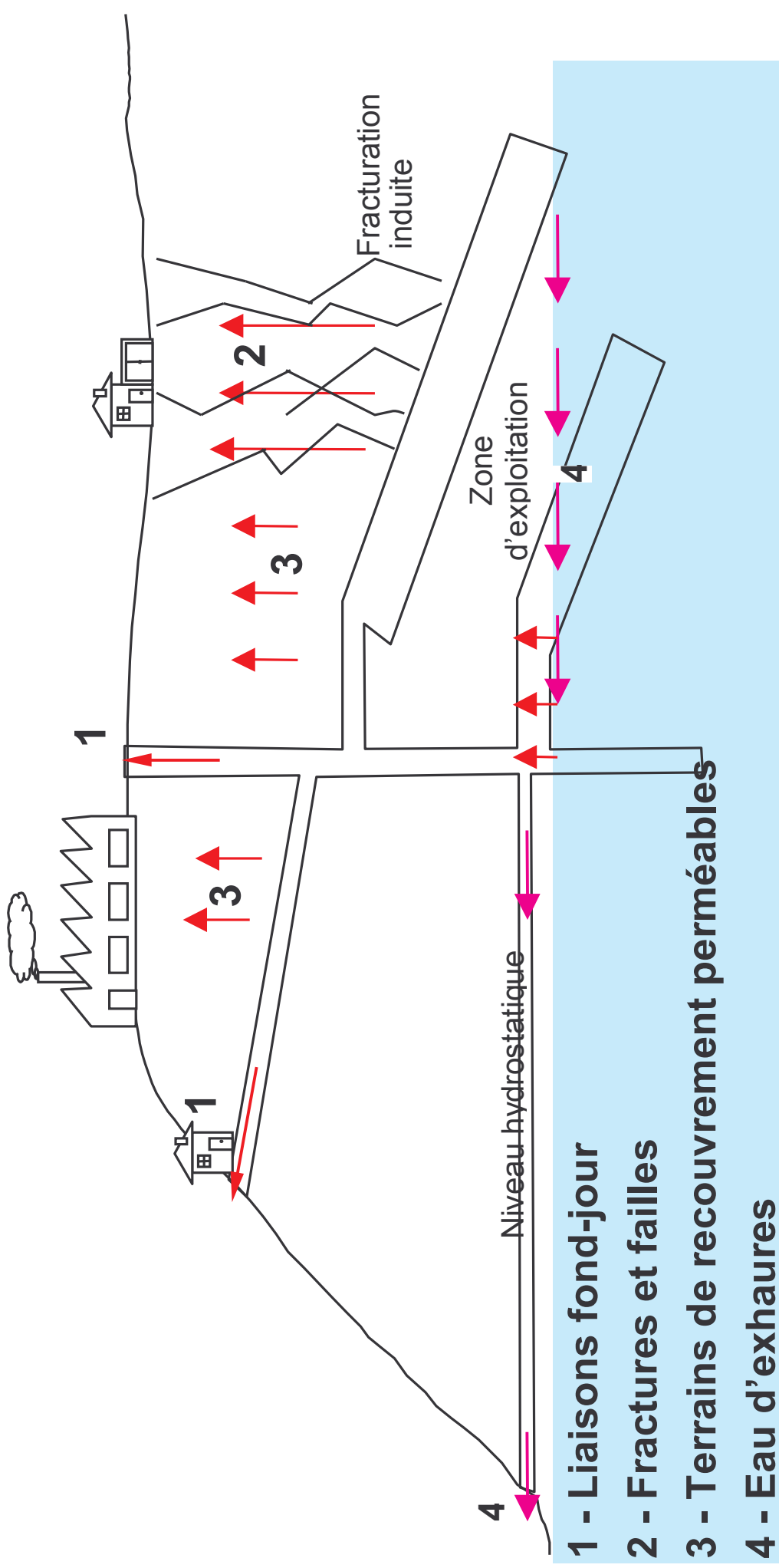
Transport de gaz sous forme dissoute dans l'eau

Les gaz susceptibles d'être rencontrés au sein d'un réservoir minier souterrain ont des caractéristiques de solubilité dans l'eau très différentes. L'eau circulant ou stagnant dans les travaux miniers peut ainsi être mise en contact direct avec le gaz de mine et dissoudre ses constituants. Cette dissolution s'opère à des degrés variables selon les gaz. Ainsi, l'eau de mine sera susceptible de contenir et de véhiculer une grande quantité de dioxyde de carbone et de sulfure d'hydrogène et des quantités sensiblement plus faibles d'autres gaz. Le radon sera, lui aussi, facilement transporté par l'eau et sera rapidement libéré dans l'atmosphère. La solubilité d'un gaz donné dans l'eau diminue avec la température de l'eau et augmente proportionnellement avec sa pression. Lors de la résurgence naturelle, la température de l'eau peut s'élever et surtout sa pression diminuer fortement si l'eau a une origine profonde. Ces deux facteurs conduisent à un relargage d'une partie des gaz dissous. A titre d'exemple, une eau à 10°C initialement saturée en gaz sous une surpression 10 bar (soit 100 m de charge hydraulique) peut perdre, lors de sa détente, environ 0,5 m³ de méthane et 12 m³ de dioxyde de carbone par mètre cube.

Les dangers de cette situation sont évidents et des accidents liés un relargage de gaz se sont déjà produits dans le passé.

Le schéma suivant représente les divers mécanismes de remontée en surface de gaz de mine.

Voies de migrations de gaz de mine vers la surface



- 1 - Liaisons fond-jour
- 2 - Fractures et failles
- 3 - Terrains de recouvrement perméables
- 4 - Eau d'exhaures

CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION, HIERARCHISATION ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA ET DES ENJEUX

1. GENERALITES SUR L'ALEA

1.1 DEFINITION DE L'ALEA

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**. Il est ainsi nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des caractéristiques des matériaux rocheux 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 et l'usage du sol 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.

1.2 PRINCIPES DE QUALIFICATION DE L'ALEA

1.2.1 QUALIFICATION DES CLASSES D'INTENSITE

L'intensité du phénomène caractérise l'ampleur des répercussions attendues en cas de déclenchement d'un événement redouté. De manière à hiérarchiser les dégâts ou nuisances potentielles en cas de survenue du désordre, il est d'usage de définir quelques classes d'intensité (très limitée à très 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 taille des cratères d'effondrement, sur l'amplitude des déformations horizontales des terrains de surface ou sur la nature, la teneur et le débit d'éventuelles émanations gazeuses, 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 permettant de différencier ces classes entre elles.

Cette étape exige de se rapporter à la notion de « gravité » des phénomènes redoutés. On entend par gravité, l'importance des conséquences prévisibles sur les enjeux qui pourraient, un jour, être présents en surface. Il est essentiel de préciser ici que cette réflexion ne doit pas se limiter aux enjeux existants ni même aux projets futurs envisagés à court ou moyen terme. Il s'agit d'une démarche d'abstraction qui s'attache à identifier la gravité intrinsèque du phénomène. Cette gravité peut s'appliquer aux personnes (victimes), aux biens (dégâts) ou à l'usage du site (limites d'usage).

Pour ce qui concerne la dangerosité des événements redoutés sur la sécurité des personnes, on s'attache à regrouper les phénomènes en fonction du nombre de victimes potentielles qui pourraient résulter de leur déclenchement (pas de victimes redoutées, victimes isolées possibles, accidents collectifs, catastrophe majeure...). 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 et composition (mélange explosible de gaz).

Pour ce qui concerne les conséquences des événements redoutés sur les biens (bâti et infrastructures), on s'attache à regrouper les phénomènes en fonction de la difficulté et du coût de mise en œuvre des mesures qu'il s'avèrerait nécessaire d'entreprendre pour prévenir tout désordre ou nuisances ou réparer les dommages engendrés.

Enfin, pour ce qui concerne les conséquences des évènements redoutés sur l'utilisation et la valorisation possible du site (pour ce qui concerne le sol, le sous-sol et l'eau), on regroupera les phénomènes en fonction de l'importance des nuisances engendrées et des limitations d'usage ainsi que de la difficulté et du coût de mise en œuvre des mesures qu'il serait nécessaire d'entreprendre pour envisager l'usage souhaité du site.

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 suivants pour définir l'intensité d'un phénomène : limitée, modérée, élevée.***

1.2.2 QUALIFICATION DES CLASSES DE PREDISPOSITION

Du fait du manque quasi systématique ou de la grande complexité des informations précises disponibles (composition minéralogique et comportement mécanique et 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 la technique d'exploitation utilisée, autant de 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 passée, sur le site ou sur un site voisin similaire, de désordres ou nuisances du même ordre. Si certains de ces désordres ou nuisances pourront 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.

En complément de l'analyse en retour d'expérience, la détermination de la prédisposition repose également sur l'analyse des scénarios et mécanismes de survenue des phénomènes susceptibles d'affecter les terrains de surface. La conjugaison de paramètres favorables à cette survenue contribuera naturellement à surclasser la classe de prédisposition. Ainsi, à titre d'exemple, une épaisseur de recouvrement importante, des dimensions limitées de galeries et la présence de bancs résistants dans le recouvrement feront qu'un site présentera une prédisposition moins sensible à l'apparition de fontis en surface qu'un secteur d'exploitation peu profond situé sous un recouvrement exclusivement marneux.

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 (géotechnique, hydrogéologie, gaz). 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'élaboration du PPRM. A ce titre, le choix de paramètres aisément justifiables et quantifiables doit être privilégié, autant que faire se peut.

Prise en compte de l'incomplétude 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 de l'ensemble des anciens vides miniers 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'informations disponibles 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.

Ainsi, en un lieu donné du territoire, la prédisposition, d'un aléa résulte de la combinaison entre l'existence d'un ou de plusieurs, dangers avérés et susceptibles d'évoluer vers un risque ou une nuisance et la présomption qu'un ou plusieurs autres dangers non encore avérés puissent à terme se développer en ce lieu.

Il est souhaitable que la cartographie de l'aléa puisse mettre en évidence cette nuance.

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 désordres ou nuisances en surface.

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 ou une inondation par remontée de nappe 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 rupture : peu sensible, sensible, très sensible.***

1.2.3 QUALIFICATION DES CLASSES D'ALEA

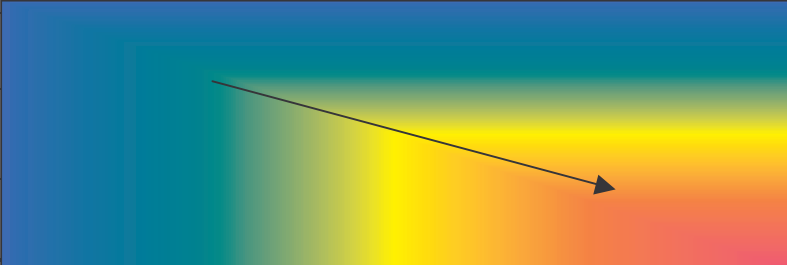
La qualification de l'aléa a pour objectif de hiérarchiser les niveaux d'aléa. Les termes « aléa fort » ou « aléa très fort » signifient que les zones concernées sont plus prédisposées à l'apparition de manifestations importantes en surface que les zones « d'aléa moyen » ou « aléa faible ».

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 multi-critères, 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, en précisant bien, une fois encore, que chaque site peut donner lieu à des ajustements pour s'adapter au contexte spécifique qui le caractérise¹³.

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.**

Prédisposition	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Intensité			
Limitée			
Modérée			
Elevée			

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.

¹³ Afin de conserver l'ensemble des informations disponibles et des analyses mises en œuvre, l'expert en charge de la réalisation du PPRM 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 pour leur part pas à un nombre de classe limité, comme c'est recommandé pour l'aléa.

Il n'en demeure pas moins que les classifications proposées dans les PPRM restent souvent **relatives**. La tendance naturelle des experts est en effet de hiérarchiser, sur un site donné, les phénomènes prévisibles les uns par rapport aux autres en favorisant l'utilisation de l'ensemble des classes existantes (faible à fort). On gardera, de fait, à l'esprit que les classes d'aléa définies sur un site minier donné pourraient éventuellement induire un niveau d'aléa moindre sur d'autres sites où les exploitations minières présenteraient des configurations nettement plus défavorables.

1.3 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

1.3.1 PRINCIPES CARTOGRAPHIQUES

L'aléa est un concept spatial, évalué en un point du territoire donné. Il a donc vocation à être cartographié sur l'ensemble du secteur concerné par le PPRM 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^{ème}), 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^{ème} est souvent suffisant pour la qualification de l'aléa. Le recours à du 1/5 000^{ème} 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 des paramètres techniques (géologie, exploitation...). Ils n'ont donc aucune raison de suivre les contours de parcelles.

Lorsque, comme c'est souvent le cas, plusieurs phénomènes potentiels coexistent sur la même parcelle, on privilégiera l'établissement de plusieurs cartographies de l'aléa, une par phénomène. 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.

1.3.2 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 désordres ou nuisances initiés au sein des vides souterrains et se développant jusqu'en surface. L'expérience montre en effet que les instabilités ou les migrations de flux ne se limitent pas à l'aplomb strict des secteurs anciennement exploités mais peuvent déborder, parfois très largement, sur des terrains, non directement sous-minés par l'exploitation.

1.3.3 MARGES D'INCERTITUDES ACCOMPAGNANT LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

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, pour 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 contradictoires.

Pour ce qui concerne les aléas « inondations », 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.

1.4 COLLECTE DES INFORMATIONS : LA PHASE INFORMATIVE

1.4.1 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.

La phase informative d'un PPRM et sa restitution cartographique sous forme de carte informative, doivent avoir pour principales vocations :

- de justifier la démarche de prévention entreprise en recensant notamment tous les désordres ou nuisances actuels ou anciens ayant été identifiés 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, ordonnancer 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 (figure 4).

La carte informative, qu'il est souhaitable de présenter aux principaux partenaires au cours de la démarche d'élaboration du PPRM, 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...) ou inconnus/douteux (plans d'exploitation manquants, indices douteux en surface...) qui serviront de données d'entrée à la méthode d'identification des aléas.

1.4.2 COLLECTE DES INFORMATIONS

1.4.2.1 SOURCES D'INFORMATIONS PRESENTES DANS LES ARCHIVES ECRITES

La première et principale source d'informations à valoriser pour l'élaboration d'un PPRM est, sans nul doute, le dossier d'arrêt des travaux miniers que l'exploitant a déposé auprès de l'Administration pour obtenir l'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.

Pour les exploitations orphelines ou les dossiers d'arrêt ou d'abandon anciens (parfois squelettiques), 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.

Les PPRM concernent 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, certains canaux 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.

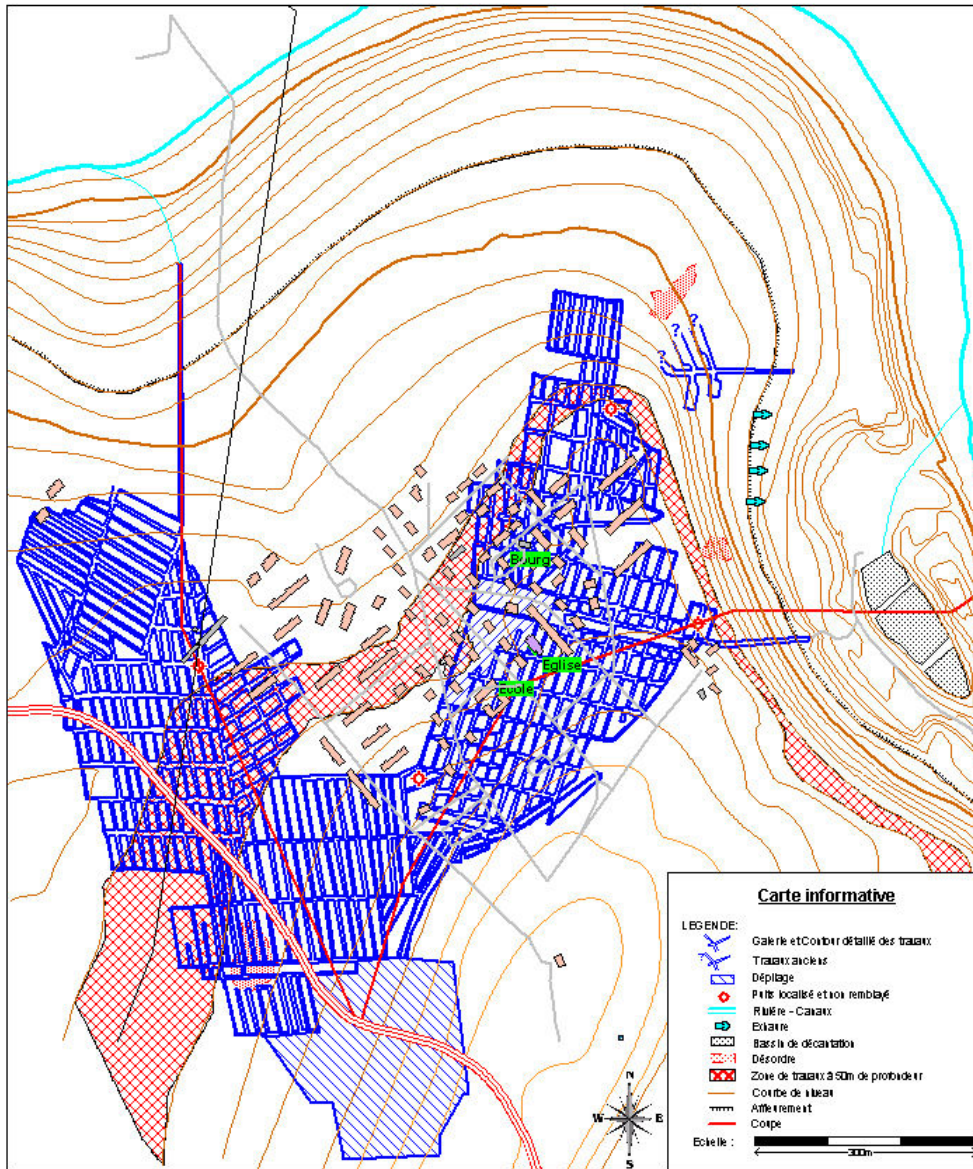
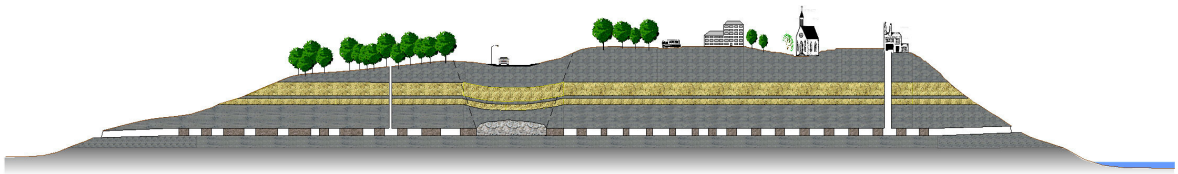


Figure 4 : Exemple de carte informative

1.4.2.2 COLLECTE DES INFORMATIONS LORS DE RECONNAISSANCES SUR SITE

Il est inconcevable qu'un PPRM puisse être convenablement réalisé 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 d'instabilité qui prennent naissance au sein des vieux travaux (piliers dégradés, cloches d'éboulement au toit...).

La reconnaissance en surface permet également de recenser les indices de désordres passés ayant affecté récemment ou de façon plus ancienne les secteurs sous-minés. On s'attachera à identifier les figures d'affaissement, les cratères d'effondrement, la présence de zones humides ou ennoyées 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.

Outre le recensement d'anciens désordres, la découverte de galeries d'accès ou d'anciens puits d'exploitation permet de fournir des indices de présence de vides dans des secteurs dépourvus de plans d'exploitation. Ces éléments sont également de première importance pour le calage en surface des plans des travaux souterrains. 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 de gaz lorsque l'on suspecte des risques d'émanations potentiellement nuisibles ou dangereuses 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 Instructeur du PPRM, 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'information.

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.

1.4.3 INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Comme dans le cadre des PPR naturels, l'élaboration des PPRM doit privilégier les avis d'experts reposant principalement sur la connaissance disponible en l'état, à la date de réalisation des études.

Le recours à des investigations complémentaires ou des travaux pointus de modélisation devra être envisagé au cas par cas, avec mesure et lorsque aucune autre solution palliative n'est envisageable. L'évaluation de la pertinence de leur mise en œuvre s'appuiera notamment sur les attendus de ces investigations, leur coût, leur durée de réalisation ainsi que la nature et l'importance des enjeux présents ou futurs caractérisant le secteur considéré.

La nature des investigations complémentaires envisageables sera détaillée plus avant, au sein des paragraphes traitant des thématiques spécifiques (inondations, mouvements de terrain...).

2. L'ALEA INONDATIONS

2.1 QUALIFICATION DE L'ALEA INONDATIONS

Comme établi dans le chapitre 2, l'aléa inondations se décline en cinq phénomènes correspondant à des effets distincts :

- la modification du régime des émergences ;
- l'apparition de zones détrempées ou de marécages ;
- l'inondation des sous-sols et des points bas ;
- la modification du régime des cours d'eau ;
- les inondations brutales.

Dans ce qui suit, les grandeurs et facteurs permettant de qualifier chacun de ces types d'aléas seront discutés, tant pour ce qui concerne leur intensité que leur prédisposition.

2.1.1 ALEA « MODIFICATION DU REGIME DES EMERGENCES »

Qualification de l'intensité

Pour ce qui concerne le phénomène d'apparition de résurgences en surface, c'est le **débit des émergences** qui constitue le paramètre permettant de discriminer les

classes d'intensité¹⁴.

Parmi les principaux facteurs susceptibles de jouer sur la valeur de ce paramètre, on citera : la surface de bassin versant drainée par l'émergence concernée ; la dénivellation sur le bassin versant qui influence le gradient hydraulique, moteur de l'écoulement souterrain ; le volume du réservoir minier et sa capacité à jouer un rôle tampon dans l'écoulement des eaux (écrêtement des pics de crues) ; les caractéristiques hydrauliques de l'exutoire (dimensions, existence d'obstacles à l'écoulement).

La définition des classes d'intensité s'appuie principalement sur la notion d'effets prévisibles sur l'usage du sol même si, pour des débits élevés, des effets dommageables sur les biens sont également possibles.

Classe d'intensité	Description	Valeur
		Débit de l'émergence en dm ³ /s
Limitée	Suintement	< 1
Modérée	Petit ruisseau	< 10
Elevée	Gros ruisseau	< 100
Très élevée	Résurgence exceptionnelle	

Qualification de la prédisposition

Le facteur déterminant qui influe sur la prédisposition d'un site à voir apparaître de nouvelles émergences est l'établissement d'une cote d'équilibre de la surface piézométrique de la nappe au-dessus de la cote des points bas de la surface topographique. Si la nappe se stabilise sous le niveau des points bas topographiques, il y a alors drainage vers un autre bassin versant souterrain, et la probabilité d'apparition de résurgences peut être considérée comme nulle sur le secteur d'étude.

En présence de ce facteur déterminant, plusieurs autres facteurs peuvent alors favoriser la prédisposition d'un site à l'apparition de résurgences :

- **l'existence d'indices d'anciennes sources** situées, avant l'exploitation minière, à proximité immédiate ;
- l'existence d'**ouvrages miniers** débouchant au jour connectés au réservoir souterrain ;
- la présence d'**hétérogénéités naturelles** (zones à forte perméabilité, failles, fractures, conduits karstiques...) susceptibles de jouer un rôle de drains préférentiels.

¹⁴ La composition chimique du rejet joue également un rôle sur la nature des nuisances induites en surface. Toutefois, cet aspect étant traité dans la partie consacrée aux impacts environnementaux, ce paramètre n'a pas été retenu pour la qualification du présent aléa.

2.1.2 ALEA « APPARITION DE ZONES DETREMPEES OU DE MARECAGES

Qualification de l'intensité

Le paramètre discriminant les classes d'intensité est **la hauteur de la tranche d'eau au-dessus du sol** associée à la permanence dans le temps du phénomène.

Comme pour l'apparition de nouvelles émergences, la cause essentielle déterminante du phénomène est l'affleurement de la nappe en surface. Les facteurs jouant sur l'intensité de ce paramètre sont donc essentiellement topographiques et liés à l'existence de zones basses, mal drainées et collectant une surface importante.

La définition des classes d'intensité s'appuie principalement sur la notion de limitation de l'usage du sol.

Classe d'intensité	Description
Modérée	Sols spongieux impraticables et incultivables
Elevée	Plan d'eau libre intermittent
Très élevée	Plan d'eau permanent

Qualification de la prédisposition

Les facteurs de prédisposition favorisant l'apparition de zones marécageuses sont :

- la présence de points bas naturels de la topographie,
- l'existence de terrains peu perméables dans ces points bas,
- la présence de zones subsidentes liées en particulier à des affaissements miniers lents, actuels ou à venir, mais qui peuvent perdurer pendant de nombreuses années.

2.1.3 ALEA « INONDATION DES SOUS-SOLS ET POINTS BAS »

Qualification de l'intensité

Le paramètre discriminant les classes d'intensité est la **profondeur minimale de la nappe** par rapport à la surface du sol, en tenant compte de la variabilité saisonnière de cette profondeur. Comme pour les aléas précédents, la cause principale est liée à la remontée de la nappe. Ce phénomène peut toutefois s'avérer plus pernicieux car l'aléa peut passer inaperçu tant que des aménagements n'ont pas concerné le sous-sol. Ici encore, le facteur influençant l'intensité est la topographie du terrain qui introduit des hétérogénéités dans la

profondeur de la nappe ainsi que la variabilité du régime climatique qui induit les battements de nappe.

Les classes d'intensité seront discriminées en fonction des restrictions d'usage du sous-sol. Nous avons considéré que l'intensité était nulle au-delà d'une profondeur de nappe de 20 m, partant du principe que, même si dans certains cas très exceptionnels des ouvrages pouvaient dépasser cette profondeur, des études hydrogéologiques très détaillées seraient réalisées à cette occasion.

Classe d'intensité	Description	Valeur Profondeur de nappe (en m)
Très limitée	Ouvrages exceptionnellement profonds affectés	10 à 20
Limitée	Ouvrages profonds affectés	3 à 10
Modérée	Caves et réseaux affectés	1 à 3
Elevée	Tout ouvrage en sous-sol affecté	< 1

Qualification de la prédisposition

Les facteurs de prédisposition à cet aléa sont :

- la situation dans les points bas de la topographie, éventuellement influencés par les affaissements miniers ;
- la présence de terrains perméables en surface qui ne freinent pas les remontées saisonnières de nappe et augmentent le débit à drainer éventuellement.

2.1.4 ALEA « MODIFICATION DU REGIME DES COURS D'EAU »

Ce type d'aléa comporte deux volets selon qu'il s'agit du régime de hautes eaux ou de basses eaux.

2.1.4.1 CRUES ET INONDATIONS

Qualification de l'intensité

Le paramètre qui discrimine les classes d'intensité est le **débit maximal de crue du cours d'eau** qui se répercute sur l'extension de la zone inondée. Ce paramètre est associé à la fréquence de l'inondation par rapport à la situation de référence correspondant à la période d'exploitation. Les facteurs influençant ce paramètre sont la climatologie, l'extension du bassin versant et les aménagements portant sur la gestion de l'eau à la fermeture de la mine.

Nous distinguerons deux classes en fonction du préjudice apporté à l'occupation des sols et des dangers pour les biens

Classe d'intensité	Description	Valeur
Moyen	Le cours d'eau ne sort qu'occasionnellement de son lit mineur	-
Fort à très fort	Le lit majeur est régulièrement inondé	-

On notera qu'au niveau du PPRM, il importe surtout de déterminer si l'augmentation escomptée du débit de crue est susceptible de contribuer de manière sensible au développement d'inondations. Si c'est le cas, la détermination précise des zones inondables relève plutôt d'un PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondations) dont l'élaboration s'appuiera, en partie, sur les données établies lors du PPRM.

Qualification de la prédisposition

Les facteurs de prédisposition à cet aléa sont :

- l'extension de la plaine alluviale avec la présence d'une nappe peu profonde pouvant facilement déborder (phénomène susceptible d'être amplifié par la remontée de la nappe à l'arrêt des travaux miniers) ;
- la modification de la topographie du lit majeur sous l'effet d'affaissements miniers passés ou à venir ;
- les aménagements susceptibles de gêner la circulation des eaux qui ont pu se développer pendant la phase d'exploitation où le débit se trouvait réduit (voies de circulation, constructions, déversement de matériaux, non-entretien des berges) ,
- le mode de gestion de l'eau après fermeture de la mine amenant éventuellement à concentrer le drainage naturel des travaux miniers en un nombre réduit de points de rejet.

2.1.4.2 ETIAGES

Qualification de l'intensité

Le paramètre est le **débit du cours d'eau à l'étiage** associé à la durée de cet étiage. Comme pour le cas des crues, le facteur d'intensité est lié aux données climatiques, à la taille du bassin versant et au mode de gestion des eaux après arrêt de l'exploitation.

Les classes d'intensité sont déterminées en fonction de la variation prévisible du débit d'étiage par rapport à la période d'exploitation.

Classe d'intensité	Description	Valeur sous forme de variation du débit d'étiage en référence à la situation en exploitation
Très limitée	Le débit d'étiage n'est influencé que de façon peu perceptible	Variation < 50%
Limitée	Le débit d'étiage est visiblement influencé pendant les périodes sèches	Variation > 50%
Modérée	Le débit peut s'annuler en périodes sèches	Variation ~100%

Qualification de la prédisposition

Le facteur de prédisposition essentiel est l'existence, pendant la phase d'exploitation, de rejets d'exhaure alimentant artificiellement le débit du cours d'eau et ayant permis une modification de l'usage de l'eau (utilisation de la ressource, ou dilution d'effluents). Le phénomène est aggravé si le cours d'eau n'est que peu soutenu par le système aquifère ou, *a fortiori*, si le cours d'eau alimente la nappe.

2.1.5 ALEA « INONDATIONS BRUTALES »

Cet aléa est difficilement prévisible avec les moyens d'études mis en œuvre lors d'un PPRM, car il résulte d'un événement exceptionnel. Sa paramétrisation est donc délicate.

Qualification de l'intensité

Le phénomène se manifeste par une **lame d'eau s'écoulant avec une certaine vitesse pendant une durée variable**. A défaut d'un paramètre unique d'intensité du phénomène physique, nous définirons des classes à partir des effets sur les biens et les personnes, en évoquant une simple valeur indicative de la hauteur d'eau atteinte par l'inondation, partant du principe que la vitesse d'écoulement atteint toujours une valeur dangereuse.

Les facteurs influençant l'intensité sont la capacité du réservoir minier susceptible d'être vidangé, la conductivité hydraulique des accès entre le jour et le réservoir, la capacité du milieu récepteur à évacuer un débit soudain et intense.

Classe d'intensité	Description	Valeur Hauteur d'eau
Limitée	Flux d'eau capable de fortes érosions locales mais sans dégradation des bâtiments ou danger pour les personnes ou les véhicules	< 20 cm
Modérée	Flux d'eau capable de dégrader certains bâtiments et de mettre en danger localement la circulation	entre 20 cm et 50 cm
Elevée à très élevée	Flux d'eau dévastateur	>50 cm

Qualification de la prédisposition

Le facteur de prédisposition essentiel est l'existence d'un réservoir minier susceptible d'une vidange brutale au jour. Ce réservoir occupe naturellement les travaux miniers profonds en dessous de leur cote de drainage, mais il peut également être perché par rapport aux exutoires potentiels et avoir ainsi été constitué volontairement à la fermeture de la mine par obturation d'accès au jour, ou encore être apparu de façon spontanée par obturation de conduits de drainage suite à un effondrement. Les facteurs aggravant l'aléa sont, selon les cas :

- l'impossibilité de surveiller et d'entretenir les bouchons d'obturation ;
- l'impossibilité ou l'absence de surveillance du niveau d'eau dans les travaux miniers ;
- les risques d'instabilité des travaux miniers pouvant entraîner un effondrement en masse ;
- la possibilité d'alimentation intempestive du réservoir minier par un karst en crue,
- la présence de terrains calcaires pouvant contenir des conduits karstiques colmatés, susceptibles de communiquer avec les travaux miniers.

2.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATIONS

L'une des spécificités de l'aléa « inondations » est de se développer sur une emprise qui dépasse, souvent largement, l'extension des travaux miniers et de leur zone d'influence sur la stabilité des terrains de surface. L'impact s'exerçant sur le cycle de l'eau superficielle et souterraine concerne donc *a priori* le bassin versant dans son extension et sa structure perturbées par les séquelles des travaux miniers. L'impact peut même déborder la notion de bassin versant, particulièrement pour ce qui concerne le système hydrogéologique dont les limites de bassin versant souterrain dépendent du régime hydrodynamique du moment. L'impact peut enfin être transfrontalier (exemple du bassin charbonnier franco-belge du Nord-Pas de Calais ou du bassin houiller de Lorraine).

L'échelle des cartographies sera donc, en général, le 1/25 000, mais des échelles encore plus petites (1/100 000 ou 1/250 000) seront parfois nécessaires en cas de travaux miniers très importants (mines de fer lorraines et certains bassins houillers par exemple)

L'extension de l'emprise cartographique de l'aléa entraîne, de fait, l'augmentation des incertitudes sur la détermination des zones d'aléa. Cette augmentation se répercute sur le classement en prédisposition. On sera ainsi fréquemment amené à augmenter les surfaces concernées par un aléa, en leur attribuant éventuellement une plus faible prédisposition.

Nature des grandeurs cartographiées

Concernant l'aléa « **apparition de nouvelles résurgences** », on reportera sur la carte à l'échelle appropriée :

- la position des sources anciennes susceptibles d'être réactivées ;
- l'emprise des zones à risque d'apparition de nouvelles émergences, en soulignant les discontinuités naturelles pouvant exister et favoriser le phénomène (failles , zones fracturées ou altérées, ...) et en indiquant, lorsque cela est possible, une fourchette pour les débits escomptés.

On procédera de même pour l'aléa « **création de zones détrempées ou de marécages** », en précisant, si possible, le contour de la zone d'extension maximale de la nuisance et la hauteur maximale de la tranche d'eau.

L'aléa « **inondation des sous-sols** » sera représenté au moyen de courbes isovaleurs de la profondeur de la nappe en hautes eaux, en distinguant les zones de profondeur en fonction des classes d'intensité définies pour cet aléa. L'aléa nul sera réputé correspondre aux secteurs où la profondeur de nappe dépasse 20 m.

La **modification prévisible du régime des cours d'eau** sera cartographiée en soulignant sur le chevelu hydrographique les tronçons de rivière dont les crues et les étiages seront affectés par les conséquences des travaux miniers. Pour les crues, on s'efforcera de donner une représentation des zones inondables en nuanciant les contours par la notion de prédisposition. Rappelons qu'au niveau du PPRM, il importe surtout de déterminer si l'augmentation escomptée du débit de crue est susceptible de donner lieu à des inondations ; la détermination précise des zones inondables relève plutôt du PPRI.

Enfin pour l'**aléa inondation brutale**, on identifiera tous les émissaires (orifices de galeries, de puits, points bas d'une digue naturelle ou artificielle) susceptibles de fournir un écoulement soudain et intense et on s'attachera à préciser, autant que faire se peut, les contours présumés de la zone concernée par la lame d'eau en aval.

2.3 RECUEIL DES DONNEES NECESSAIRES A L'ANALYSE DE L'ALEA INONDATIONS

Comme pour tout autre type d'aléa, le document de référence pour analyser l'aléa « inondations » est le dossier d'arrêt des travaux dont la rubrique hydrogéologie doit normalement comporter la synthèse de toutes les informations d'archives disponibles et de toutes les investigations entreprises pour l'établissement du dossier.

A défaut de ce document (cas des mines anciennes) un travail palliatif proche de ce qu'il aurait fallu faire pour constituer le dossier d'arrêt des travaux, doit être réalisé pour établir le PPRM.

2.3.1 RECHERCHE DE DONNEES D'ARCHIVES

La documentation de base à rassembler consiste en :

- la carte topographique (le plus souvent au 1/25 000). Plusieurs éditions successives de la carte peuvent être utiles pour comprendre l'évolution du paysage engendrée par l'activité minière. Cette carte renseigne sur le réseau hydrographique, l'étendue des bassins versants, l'altitude des points de drainage. La carte topographique peut être utilement complétée par des photos aériennes correspondant à différentes missions ;
- la carte géologique (en premier lieu la carte au 1/50 000) qui renseigne sur la nature lithologique des terrains profonds et de couverture. Sa notice accompagnatrice est souvent riche d'enseignement synthétique sur la région ;
- les données climatiques et hydrométriques sur une période suffisamment longue pour apprécier la variabilité du bilan hydrique sur les bassins versants concernés (une dizaine d'années est en général un minimum requis) ;
- les études spécifiques géologiques et hydrogéologiques régionales ou locales telles que les thèses, monographies et rapport d'études. Ces documents peuvent être recherchés dans les Services géologiques régionaux du BRGM, les Agences de l'Eau, les DIREN, les DRAF et auprès des laboratoires universitaires, sans oublier les méthodes de recherche bibliographique modernes par voie informatique ;
- les archives de l'exploitation minière, à rechercher chez l'exploitant ou ses héritiers s'ils existent encore. La DRIRE est également dépositaire de documents d'exploitation même après sa fermeture. Les archives municipales des communes concernées peuvent aussi être utiles ;
- des données spécifiques portant sur les sondages (coupe géologique, mesure de paramètres hydrodynamiques, mesures piézométriques, analyses chimiques, ...) peuvent être également utiles ; elles figurent le plus souvent de manière non interprétée dans les bases de données, mais sont indispensables pour réaliser une étude détaillée. Elles sont disponibles dans les bases de données diffusées par le BRGM (banque du sous-sol - BSS, base ADES), les Agences de l'Eau et les DIREN (piézométrie, prélèvements en forages, débits des rivières) et souvent accessibles sur internet.

2.3.2 DONNEES A RECHERCHER SUR SITE

La visite du site est incontournable pour replacer dans leur contexte et éventuellement critiquer les informations issues des archives et le cas échéant concevoir une campagne d'investigations plus lourdes si la pauvreté des études antérieures ne permet pas d'établir le PPRM avec suffisamment de rigueur.

Les investigations légères à mener sur site porteront, selon les cas, sur les points suivants :

- contrôle du réseau hydrographique, évaluation des débits et altitudes ;
- inventaire des sources, évaluation des débits et altitudes ;
- inventaire des orifices miniers débouchant au jour, relevé de leur altitude (GPS) ;
- recherche des puits et piézomètres existants, relevé de leur altitude et du niveau d'eau.
- observations de différentes caractéristiques morphologiques ou d'occupation du sol susceptibles de jouer un rôle sur l'intensité ou la prédisposition de l'aléa (existence de bas-fonds, cuvettes d'affaissement, marécages, retenues d'eau, digues...).

2.3.3 INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Dans le contexte normal des mines françaises où les données préexistantes au PPRM devraient être en quantité non négligeable, les informations essentielles relevant d'investigations lourdes qui pourraient s'avérer nécessaires sont les données concernant le système hydrogéologique.

Des données piézométriques sont en effet incontournables pour prévoir les mouvements de la surface de la nappe aquifère qui constituent l'essence même de l'aléa « inondations ». En cas d'absence d'étude hydrogéologique faisant état de mesures piézométriques et d'un modèle de fonctionnement du système aquifère, une campagne de forages piézométriques devra être entreprise, suivie d'une période de mesure qui devra s'étendre sur au moins un cycle hydrologique annuel pour apprécier la variabilité saisonnière.

Le nombre, la localisation et le type d'équipement des piézomètres à réaliser dépendent du site étudié. Cette tâche devra être confiée à un organisme spécialisé en hydrogéologie qui se chargera de la définition des ouvrages, de la maîtrise d'œuvre de réalisation et des mesures.

3. L'ALEA MOUVEMENTS DE TERRAINS

3.1 QUALIFICATION DE L'ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN

Comme établi dans le chapitre 2, l'aléa mouvements de terrain se décline en sept phénomènes correspondant à des origines et des effets distincts :

- les tassements ;
- les affaissements progressifs ;

- les effondrements localisés ;
- les effondrements généralisés ;
- les glissements ou mouvements de pente ;
- les coulées ;
- les écroulements rocheux.

Nous discuterons, dans ce qui suit, les grandeurs et facteurs permettant de qualifier chacun de ces types d'aléas, tant pour ce qui concerne leur intensité que leur prédisposition.

3.1.1 L'ALEA « TASSEMENT »

Qualification de l'intensité

Les éventuelles nuisances initiées par le phénomène de tassement résultent principalement du développement de **tassements différentiels**. En présence de tassements différentiels, c'est principalement l'amplitude verticale de ces mouvements qui conditionne l'intensité du phénomène prévisible. Puisqu'il s'avère généralement difficile de prévoir l'amplitude de ces tassements différentiels, on se réfère généralement à l'amplitude des tassements globaux prévisibles.

Ce type de désordre est de nature à engendrer des dégradations aux biens (bâti et infrastructures) présents en surface mais pas à mettre en danger les populations. Sauf exception, l'intensité des conséquences d'un phénomène de tassement demeure limitée (ordre centimétrique à décimétrique).

Classe d'intensité	Description
Très limitée	Tassements limités
Limitée	Tassements sensibles

Qualification de la prédisposition

Critères de prédisposition communs

Quel que soit le contexte d'exploitation, trois critères fondamentaux gouvernent la prédisposition d'un site au développement de tassements :

- **l'existence d'indices d'anciens** mouvements de type « **tassements** » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives), dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines, peut contribuer à augmenter la prédisposition au développement futur de ce type de phénomènes ;
- la **modification** lente (remontée de nappe) ou plus rapide (rupture de canalisation, obturation de drains...) **des conditions hydrauliques** (eaux de surface et souterrains) est souvent à l'origine du déclenchement de phénomènes de tassements ;

- l'application de fortes **surcharges en surface** dans le cadre d'un aménagement du site (constructions, entreposage...).

Anciennes exploitations menées par foudroyage du toit

La **profondeur des anciens travaux** constitue le facteur principal de prédisposition au développement de tassements perceptibles en surface à l'aplomb d'anciennes exploitations totales. La limite de profondeur en deçà de laquelle l'intensité des effets n'est plus négligeable est souvent prise voisine de 50 mètres. Cette valeur peut toutefois varier en fonction des configurations spécifiques rencontrées (importante épaisseur exploitée par exemple).

Ouvrages de dépôt et découvertes exploitées par auto-remblayage

Parmi les principaux facteurs de prédisposition, on citera :

- l'épaisseur du dépôt ;
- la nature et la granulométrie des matériaux déposés ;
- la méthode de mise en place du dépôt (avec ou sans compactage).

Compaction secondaire de terrains meubles

La prédisposition d'un site à ce type de mécanisme, assez rare, exige la conjugaison de deux facteurs :

- la présence de terrains sensibles au phénomène de compaction secondaire (tourbe notamment) ;
- des conditions hydrogéologiques défavorables (remontée ou battement de nappe affectant ces mêmes terrains).

On notera que la présence d'anciens travaux miniers ne constituent pas, dans ce cas très particulier, un facteur de prédisposition indispensable au développement de ce type d'instabilités.

Remontée des terrains

La remontée de la surface qui accompagne la remontée de nappe après l'arrêt des pompes d'exhaure est un phénomène assez fréquent qui peut engendrer des mouvements verticaux d'amplitude décimétrique. Toutefois, la manifestation en surface s'effectue sur des secteurs très étendus, générant ainsi des mouvements très étalés.

La prédisposition au développement de tassements différentiels dommageables sera donc, dans l'immense majorité des cas, très faible. Seules des **configurations géologiques et/ou d'exploitation exceptionnelles et défavorables** contribueront donc à générer des nuisances sur les biens pouvant être imputées à ce type de mouvements.

3.1.2 L'ALEA « AFFAISSEMENT PROGRESSIF »

Qualification de l'intensité

Pour ce qui concerne le phénomène d'affaissement progressif, ce sont les **déformations différentielles horizontales** et les **effets de mise en pente** du sol qui sont généralement les plus dommageables pour les biens situés en surface. Ces deux paramètres étant directement reliés, nous retiendrons l'effet de mise en pente comme paramètre principal permettant de discriminer les classes d'intensité.

La définition des classes d'intensité s'appuie alors principalement sur la notion d'effets prévisibles sur les biens même si, au-delà de certaines valeurs de déformations, les désordres infligés aux bâtiments peuvent s'avérer de nature à mettre en péril la sécurité des personnes qui y résident.

Parmi les principaux facteurs susceptibles de jouer sur la valeur de ces deux paramètres, on citera : l'ouverture des travaux miniers souterrains, la méthode d'exploitation, le taux de défrêtement, la profondeur et la largeur exploitée des panneaux, la nature des terrains de recouvrement, le pendage des couches, la topographie de surface, la présence de failles, etc.

Les valeurs seuils présentées dans le tableau suivant sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas.

Classe d'intensité	Mise en pente (en %)
Très limitée	$0 < P < 1$
Limitée	$1 < P < 3$
Modérée	$3 < P < 6$
Elevée	$P > 6$

Qualification de la prédisposition

Critères de prédisposition communs

Quel que soit le contexte d'exploitation, l'**existence d'indices d'anciens** mouvements de type « **affaissement progressif** » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives), dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines, peut contribuer à augmenter la prédisposition au développement futur de ce type de phénomènes.

Anciennes exploitations menées par foudroyage du toit

A l'aplomb d'anciennes exploitations totales, il est admis que la phase d'affaissement résiduel perceptible en surface se limite aux quelques années suivant l'arrêt des travaux d'extraction. La **date d'arrêt de l'exploitation** au droit d'un secteur constituera donc le principal facteur gouvernant la prédisposition de ce secteur à subir les effets d'un affaissement dit « résiduel ». Si cet arrêt est récent au moment de l'élaboration du PPRM (moins de 5 ans pour certains bassins miniers), la probabilité de voir se développer un affaissement résiduel pourra être considérée comme réelle, dans le cas contraire, elle pourra être négligée (on se référera alors plutôt à l'aléa tassement pour caractériser le devenir de la zone).

La prédisposition de l'aléa « affaissement progressif » à l'aplomb d'exploitations totales constitue donc une exception, en ce sens que l'existence d'anciens affaissements ne prédispose en rien un site à subir d'autres désordres sensiblement similaires à l'avenir.

Exploitations partielles menées en terrains stratifiés

La prédisposition d'un site à voir se développer une cuvette d'affaissement à l'aplomb d'anciennes exploitations menées par chambres et piliers abandonnés dépend de la combinaison de deux prédispositions : la rupture de l'ouvrage souterrain et le comportement souple et progressif des terrains de recouvrement (figure 5).

Prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain

La prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain dépendra principalement :

- des contraintes s'exerçant au sein des piliers (fonction notamment du taux de défrètement, de la profondeur des travaux et des conditions d'exploitation des secteurs adjacents à la zone considérée) ;
- des caractéristiques des piliers (résistance des matériaux qui les constituent, taille, forme, régularité, qualité de la superposition en cas d'exploitation superposées proches...) ;
- d'autres facteurs tels que la sensibilité des matériaux à l'eau, la présence de failles, etc.

Dans le cas particulier des mines de sel, la présence d'aquifères d'eau non saturée en sel susceptibles de se déverser au sein des anciens travaux constitue un facteur d'aggravation immédiat et fondamental (dissolution possible des piliers). Dans le cas où le mur de l'exploitation est constitué d'un matériau sensible à l'eau, l'invasion de la mine par de l'eau (saturée ou non) peut également initier des désordres importants par poinçonnement du mur.

Prédisposition à un mouvement souple et progressif du recouvrement et de la surface

Les principaux facteurs de prédisposition à un mouvement souple et progressif sont :

- un ratio largeur exploitée sur épaisseur de recouvrement faible ;

- l'absence de terrains compétents au sein du recouvrement (l'existence de zones défilées sus-jacentes contribue à « assouplir » le recouvrement) ;
- une configuration d'exploitation caractérisée par des piliers de faible élancement constitués de minerai présentant un comportement plus « plastique » que « fragile » ;
- une profondeur d'exploitation importante dont la valeur dépend du contexte.

Exploitations filoniennes

C'est principalement la stabilité des stots, dalles ou piliers laissés en place pour assurer la tenue des épontes qui gouverne la prédisposition d'une exploitation filonienne à subir des affaissements en surface. Pour évaluer la stabilité à long terme des terrains sous-minés, il convient de tenir compte :

- des dimensions et propriétés de résistance des ouvrages miniers laissés en place ;
- des contraintes qui s'exercent en leur sein (dépendant notamment de la profondeur des travaux et du pendage du filon) ;
- de la nature des terrains encaissants et de la présence de failles ou tout autre accident tectonique majeur ;
- nature du remblai mis en place.

Exploitations salines par dissolution

Existence d'anciennes exploitations menées au toit du sel

Les facteurs susceptibles d'augmenter la prédisposition d'un site à subir des affaissements résultant de dissolutions parasites et non maîtrisés du sel sont, par ordre décroissant d'importance :

- la présence, dans les environs (à une distance qu'il est difficile de chiffrer *a priori* mais dont on sait qu'elle peut dépasser le kilomètre), d'une ancienne exploitation ayant contribué à affecter l'étanchéité des terrains surmontant le sel ;
- l'existence d'un pendage au toit du sel et la situation de la zone concernée en amont-pendage par rapport aux points d'entrée de l'eau douce dans le secteur. L'eau douce, moins dense que la saumure, a en effet tendance à migrer vers l'amont-pendage, facilitant ainsi les dissolutions parasites dans cette zone ;
- la présence, au toit du sel, de structures géologiques (failles, flexures...) constituant des points hauts, relatifs ou absolus sujets à la concentration des circulations d'eau douce ;
- la présence de grands accidents structuraux susceptibles de constituer des drains pour les circulations d'eau douce souterraine.

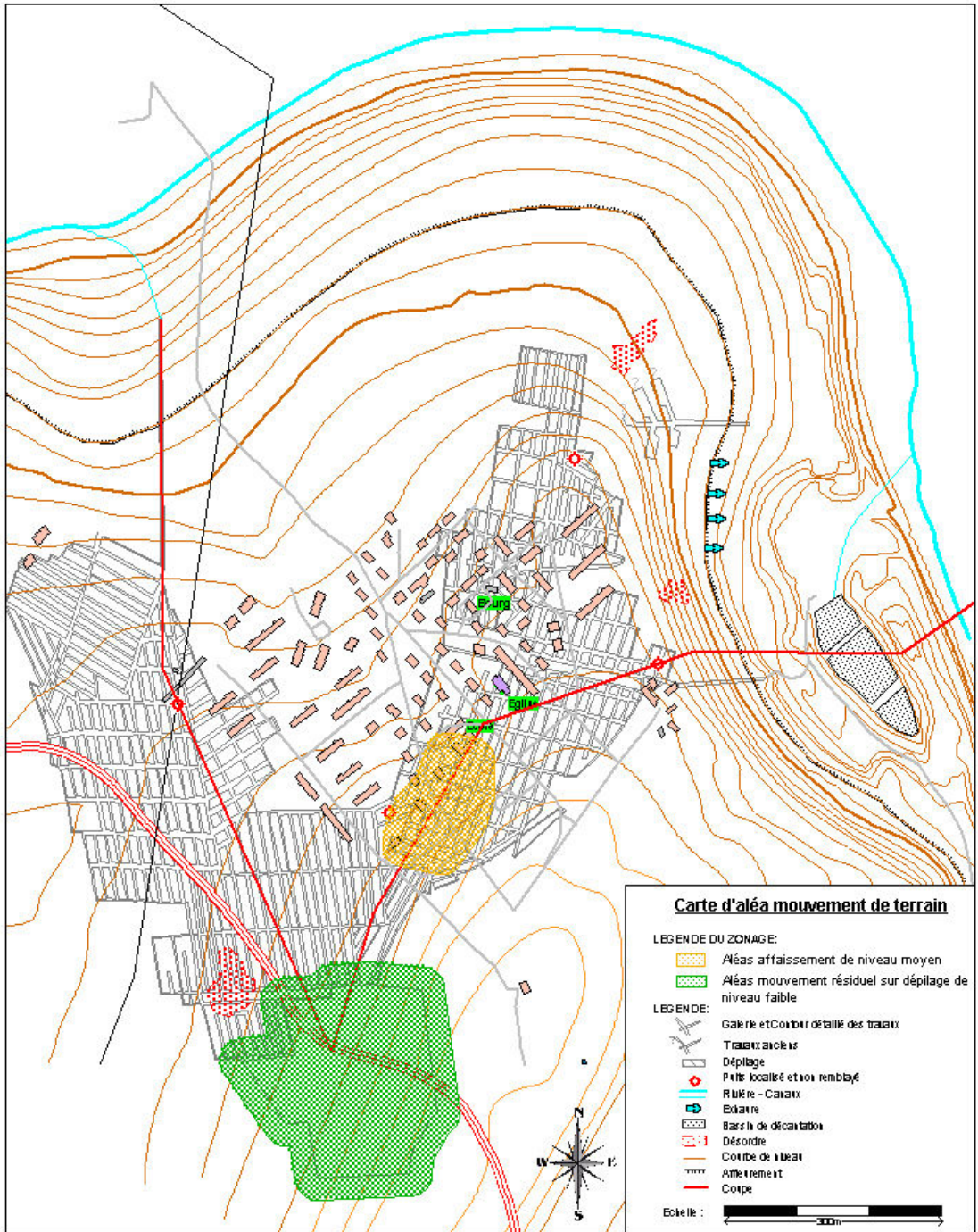


Figure 5 : Exemple de carte d'aléa « affaissement progressif »

3.1.3 L'ALEA « EFFONDREMENT LOCALISE »

Qualification de l'intensité

C'est principalement le **diamètre de l'effondrement** qui influera sur les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes et des biens présents dans la zone d'influence du désordre. C'est donc ce paramètre que nous retiendrons comme grandeur représentative. Assez logiquement, c'est le diamètre maximal qui sera retenu dans l'évaluation (configuration stabilisée sous forme d'entonnoir). On gardera toutefois à l'esprit qu'en terme de dangerosité, c'est plutôt le diamètre instantané (zone affectée lors de l'effondrement), parfois sensiblement moins important que le précédent, qui compte.

La profondeur du cratère peut également influencer sur la dangerosité du phénomène mais, comme elle s'avère souvent très délicate à prévoir, notamment pour ce qui concerne les fontis et les débousses de puits, nous ne la retiendrons pas comme paramètre décisif.

Le phénomène d'effondrement localisé est de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents en surface.

Parmi les principaux facteurs susceptibles d'influer sur la valeur du diamètre de l'effondrement, on citera : la dimension des vides résiduels au sein des travaux souterrains (volume des galeries) ainsi que l'épaisseur et la nature des terrains constituant le recouvrement. Notons, à ce propos, que l'épaisseur et la nature des terrains de sub-surface jouent un rôle prépondérant car leur rupture (lorsqu'il s'agit de terrains déconsolidés) peut contribuer pour beaucoup aux dimensions de l'entonnoir d'effondrement en surface (figure 6).

Les valeurs seuils présentées dans le tableau suivant sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas.

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
Limitée	$\varnothing < 3 \text{ m}$
Modérée	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Elevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Qualification de la prédisposition

Quel que soit le contexte d'exploitation, deux critères fondamentaux gouvernent la prédisposition d'un site au développement d'effondrements localisés :

- **l'existence d'indices d'anciens** mouvements de type « **effondrement localisé** » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives), dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines, peut contribuer à augmenter la prédisposition au développement futur de phénomènes sensiblement similaires en terme de mécanismes initiateurs (fontis, effondrements de puits...) ;
- la **présence de terrains déconsolidés en surface**, notamment sur une grande épaisseur, contribue à augmenter la prédisposition à voir se développer des cratères d'effondrement de fortes dimensions (classes d'intensité élevées).

Rupture de toit ou éboulement d'une galerie d'accès

La prédisposition d'un site à voir se développer un fontis à l'aplomb d'anciennes exploitations dépend de la combinaison de deux prédispositions : la rupture de l'ouvrage souterrain et la remontée de l'instabilité jusqu'en surface.

Prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain

La prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain dépend essentiellement de :

- la largeur (ou portée) du toit des chambres ou des galeries concernées,
- la nature et l'épaisseur des premiers bancs rocheux.

Prédisposition à la remontée de l'instabilité jusqu'en surface

Une fois la chute de toit initiée au sein des vieux travaux, deux mécanismes sont susceptibles de s'opposer à sa propagation vers la surface dans le long terme :

- *la stabilisation du phénomène par formation d'une voûte stable.* Vis-à-vis de ce mécanisme, c'est, à largeur de galerie égale, la présence de bancs massifs, épais et résistants au sein du recouvrement qui contribuera à diminuer la prédisposition d'un site à voir se développer des fontis en surface ;
- *la stabilisation du phénomène par auto-comblement*, du fait du foisonnement des éboulis. Le volume des vides résiduels disponibles au sein des vieux travaux (tenant compte de la dimension des galeries et de l'existence d'éventuels travaux de remblayage) ainsi que la nature (coefficient de foisonnement) et l'épaisseur des terrains de recouvrement influenceront directement sur la prédisposition des remontées de voûte à se stabiliser ou non par auto-comblement.

Dans les faits, même si cette valeur dépend étroitement de la nature des terrains de recouvrement, le retour d'expérience disponible montre qu'au-delà d'une profondeur d'une cinquantaine de mètres, la prédisposition d'anciens travaux miniers aux remontées de fontis jusqu'en surface devient généralement négligeable pour des galeries de hauteur habituelle (< 4 m).

Rupture de piliers isolés

La prédisposition de piliers à la rupture dépendra principalement :

- des contraintes s'exerçant au sein des piliers (tributaires notamment du taux de défruitement local et de la profondeur des travaux) ;

- des caractéristiques des piliers concernés (résistance du pilier, sensibilité à l'eau, section, élancement, forme, régularité, présence de failles ou d'accidents structuraux, mauvaise superposition...).

Effondrement d'une tête de puits

Deux phénomènes peuvent résulter d'une instabilité affectant une ancienne tête de puits.

Le premier résulte de l'effondrement de la surface du sol situé à l'aplomb direct de l'ancien ouvrage. Deux raisons peuvent générer cette rupture :

- l'effondrement de la structure mise en place en tête d'un puits vide (plancher en bois, voûte en briques, dalle, bouchon...). Dans ce cas, ce sont les caractéristiques de cette structure (résistance, dimensions), son altérabilité dans le long terme, la nature du revêtement ou cuvelage du puits ainsi que la nature et la résistance des terrains encaissants qui influenceront directement sur la prédisposition du site à la rupture ;
- le débouillage d'un puits remblayé. Dans ce cas de figure, les variations prévisibles du niveau hydrogéologique (remontée des eaux, battements de nappe), la présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serrements, l'ancienneté du remblayage et l'existence de facteurs aggravants (vibrations, surcharges...) contribueront à augmenter la prédisposition du puits à subir un débouillage.

Le second phénomène résulte directement du premier, notamment lorsqu'il s'agit du débouillage d'un très vieux puits. Il concerne la rupture possible des terrains environnants la tête de puits qui s'écoulent dans le puits après l'effondrement de tout ou partie du revêtement de l'ouvrage. Concernant ce phénomène, l'ancienneté et l'état de dégradation du revêtement du puits ainsi que la présence et l'épaisseur de terrains sans cohésion en sub-surface constituent autant de facteurs favorables au développement d'un effondrement qui peut, parfois, déborder très largement de l'emprise stricte du puits.

Rupture de tête de filon

Les facteurs qui gouvernent la prédisposition d'une tête de filon à subir des effondrements localisés sont principalement de deux ordres :

- les dimensions et les propriétés de résistance des piliers couronnés (épaisseur, présence d'extraction à ciel ouvert en sub-surface, terrains altérés, présence de failles ou d'accidents tectoniques...) ;
- caractéristiques du gisement (pendage, nature des terrains encaissants, existence d'interfaces entre le filon et les épontes susceptibles de favoriser les ruptures, notamment par glissement...)
- nature du remblai mis en place.

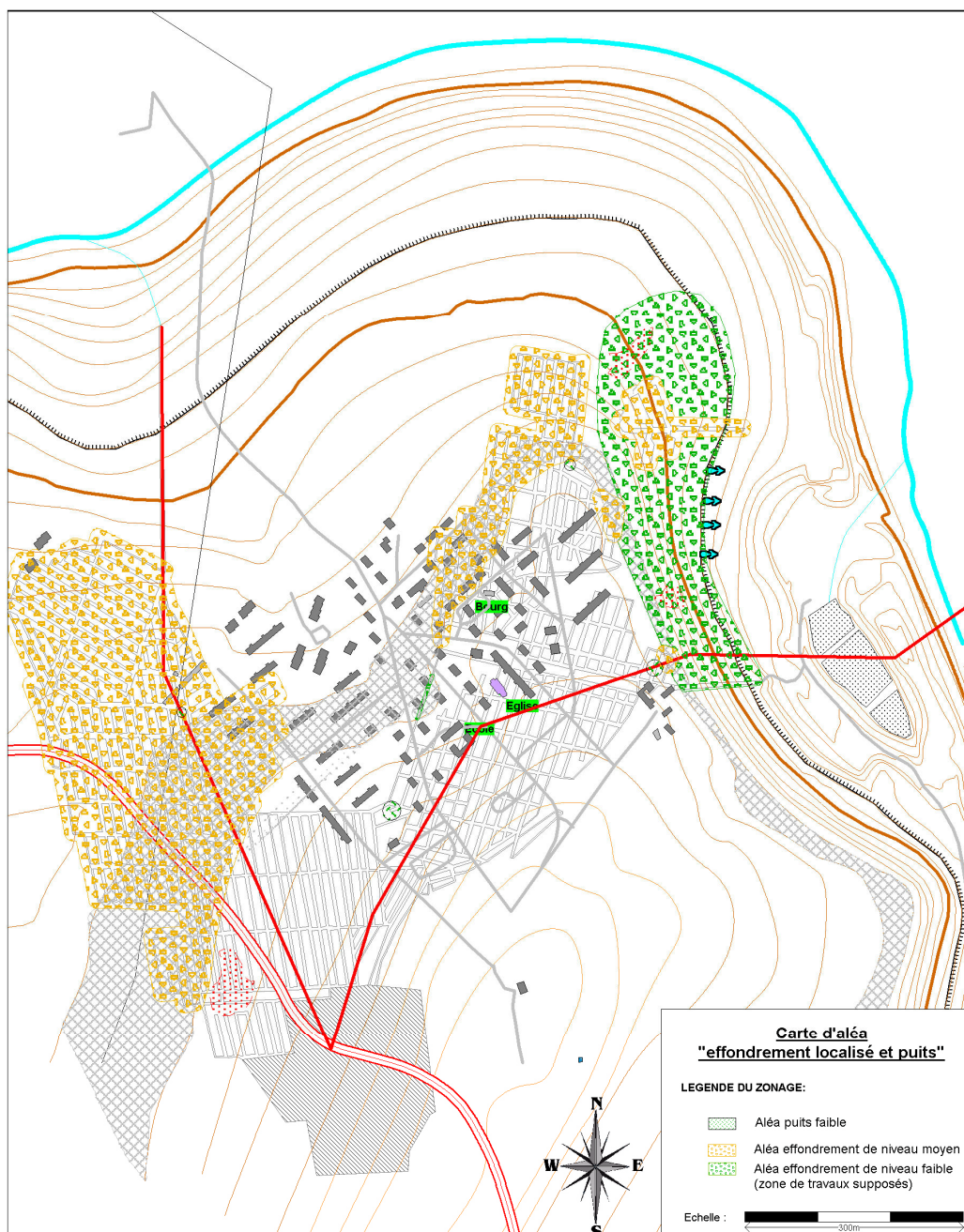


Figure 6 : Exemple de carte d'aléa « effondrements localisés

3.1.4 L'ALEA « EFFONDREMENT GENERALISE »

Qualification de l'intensité

L'effondrement généralisé caractérise un mouvement d'extension spatiale importante et dont l'occurrence, quelle que soit l'amplitude de la descente des terrains de surface (directement reliée à l'ouverture des travaux et au taux de défrètement des chantiers), peut mettre en péril la sécurité des personnes et des biens situés dans l'emprise de l'instabilité.

Il n'y a donc pas lieu de définir une grandeur de référence pour caractériser l'intensité de ce type de désordre, la classe d'intensité étant, systématiquement, forte à très forte, du fait également de l'absence de parades « légères » permettant de s'affranchir des conséquences prévisibles d'un tel phénomène en surface.

Classe d'intensité	Description
Elevée à très élevée	Effondrement en masse de la surface

Qualification de la prédisposition

Critères de prédisposition communs

Quel que soit le contexte d'exploitation, l'**existence d'indices d'anciens** mouvements de type « **effondrement généralisé** » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives), dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines, peut contribuer à augmenter la prédisposition au développement futur de ce type de phénomènes.

Effondrements d'exploitations menées par chambres et piliers abandonnés

La prédisposition d'anciennes exploitations menées par chambres et piliers abandonnés au développement d'un effondrement généralisé dépend de la combinaison de deux prédispositions : la rupture de l'ouvrage souterrain et la rupture des terrains de recouvrement.

Prédisposition de l'ouvrage souterrain à la rupture

La prédisposition de l'ouvrage souterrain à la rupture dépendra principalement :

- des contraintes s'exerçant au sein des piliers (fonction notamment du taux de défrètement, de la profondeur des travaux et des conditions d'exploitation des secteurs adjacents à la zone considérée) ;
- une configuration d'exploitation fragile favorable à une rupture en masse des piliers (piliers de fort élancement, matériaux fragiles, mauvaises superposition des piliers...) ;
- la présence de piliers sous-dimensionnés en grand nombre ayant atteint un « état-limite » de stabilité ;

- l'absence de « piliers barrières » susceptibles de bloquer la propagation d'un front d'effondrement ;
- d'autres facteurs tels que la sensibilité des matériaux à l'eau, le comportement du mur (risque de poinçonnement, la présence de failles...) ;
- dans le cas particulier des mines de sel (et plus généralement de tout type de matériau soluble), la présence d'aquifères susceptibles de se déverser dans les anciens travaux constitue un facteur aggravant essentiel (dissolution possible des piliers). Dans le cas où le mur de l'exploitation est également constitué d'un matériau sensible à l'eau, l'invasion de la mine, y compris par de la saumure saturée, peut initier des ruptures généralisées par poinçonnement du mur par les piliers.

Prédisposition des terrains de recouvrement à une rupture dynamique

Parmi les principaux facteurs qui vont, en cas de rupture de l'ouvrage souterrain, prédisposer un site à site à subir un effondrement dynamique et non un affaissement progressif des terrains de surface, on citera :

- une extension latérale d'exploitation suffisante au regard de l'épaisseur de recouvrement ;
- la présence d'un (ou de) banc(s) raide(s) au sein du recouvrement susceptible de se rompre de manière dynamique, entraînant dans sa ruine la rupture en masse des piliers sous-jacents (on parlera alors d'effondrement brutal) ;
- une profondeur pas trop élevée (il est en effet difficile d'imaginer que des travaux situés à des profondeurs supérieures à 500 mètres par exemple puissent générer une rupture dynamique de l'ensemble des terrains de recouvrement).

Effondrement de cavités salines isolées

La prédisposition à l'effondrement en masse d'une ancienne cavité saline de dissolution sera d'autant plus importante que les facteurs suivants seront vérifiés :

- de grandes dimensions horizontales de la cavité et une faible profondeur (la hauteur d'exploitation ne jouera que sur la profondeur du cratère, ce qui ne constitue pas un paramètre discriminant fondamental) ;
- une planche de sel au toit de la cavité non suffisamment épaisse, voire totalement inexistante. Le fait qu'une cavité ait déjà commencé à se développer au sein des terrains recouvrant la formation salifère constitue, de ce point de vue, un facteur très défavorable à la stabilité du site ;
- la présence d'un banc raide au sein du recouvrement (tel que la Dolomie de Beaumont dans le Keuper inférieur de Lorraine par exemple) qui permet le développement de cavités de grande extension et fournit à l'effondrement en surface un caractère potentiellement brutal et soudain ;
- l'existence d'une possible circulation d'eau non saturée contribuant à dissoudre du sel et augmenter, par-là même, la dimension des cavités ;
- l'incertitude sur les dimensions exactes de la cavité (travaux très anciens mal connus, mise en communication de cavités entre-elles).

3.1.5 L'ALEA « GLISSEMENT OU MOUVEMENT DE PENTE »

Qualification de l'intensité

C'est principalement le **volume de matériau mis en mouvement** qui influera sur l'intensité du phénomène. La définition des classes d'intensité s'appuiera principalement sur la notion d'effets prévisibles sur les biens même si, dans certaines circonstances défavorables, les désordres infligés aux bâtiments sont de nature à mettre en péril la sécurité des personnes qui y résident.

Parmi les principaux facteurs susceptibles de jouer sur le volume de matériau mis en mouvement, on citera : la nature et la granulométrie des matériaux constituant le talus, la hauteur et la morphologie de la pente, l'intensité des ruissellements prévisibles, l'existence ou non de mesures d'aménagement (géotextiles, engazonnement...).

Les valeurs seuils présentées dans le tableau suivant sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas.

Classe d'intensité	Description	Volume mis en jeu
Très limitée	Reptations, ravinements	quelques m ³
Limitée	Glissements superficiels, ravinements importants	De 10 à 100 m ³
Modérée	Glissements profonds	100 à 5 000 m ³
Elevée	Glissements majeurs	> 5 000 m ³

Qualification de la prédisposition

Les facteurs qui contribuent à augmenter la prédisposition d'un talus à subir des glissements ou mouvements de pente superficiels sont, pour la plupart, communs à l'ensemble des talus concernés par l'après-mine (digues, terrils, fosses non remblayées creusées en terrain tendre...). Parmi les principaux, on citera, sans souci de hiérarchisation :

- **l'existence d'indices d'anciens** mouvements de type « **mouvement de pente** » (encore visibles en surface ou décrits dans les archives), dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines, peut contribuer à augmenter la prédisposition au développement futur de ce type de phénomènes ;
- une mauvaise **gestion des eaux de surface**. Ceci peut résulter de l'absence de mesures adéquates ou de la dégradation du dispositif de drainage préexistant (rupture de canalisation, drains bouchés, canaux de ruissellement remplis par des éboulis...). Les talus situés dans des régions sujettes à des précipitations violentes (orages méditerranéens par exemple), seront plus prédisposés à subir des mouvements défavorables ;
- la **topographie et morphologie des flancs** : présence de banquettes, pente moyenne du flanc ;

- la **nature des matériaux** constituant le talus : nature et granulométrie des matériaux, existence de discontinuités stratigraphiques ou tectoniques. La présence de matériaux contenant une proportion importante de particules fines augmentera par exemple la prédisposition du site à être affecté par des phénomènes d'érosion et de ravinement ;
- la présence de **signes traduisant l'activité des mouvements** déjà initiés (fissures de décompression, bourrelets en pied, arbres penchés...) ;
- la présence **d'anciens travaux miniers** souterrains au droit du talus susceptible de se rompre et d'engendrer la déstabilisation du flanc de fosse ou des terrains d'assise supportant l'ouvrage de dépôt ;
- l'éventuelle **modification des conditions hydrauliques** locales (affaiblissement de la butée de pied en cas de crues sévères, altération du dispositif de drainage ou d'aménagement des écoulements, création de bassins de décantation...) ;
- l'existence de **réaménagements** ou de **parades**, dans la mesure où ces dernières présentent des garanties satisfaisantes de pérennité et d'entretien ;
- l'existence de **facteurs aggravants** tels que l'absence de végétalisation adaptée en surface, l'existence possible de sollicitations dynamiques (séismes, vibrations...), le développement de certaines activités humaines (VTT, moto-cross, surcharge en bord de crête...) ou la présence d'animaux fouisseurs sont également susceptibles de contribuer à la déstabilisation des flancs de talus.

3.1.6 L'ALEA « COULEE »

Qualification de l'intensité

Il n'est pas aisé d'identifier une grandeur caractéristique permettant de discriminer les conséquences d'une coulée dynamique. Nous proposons de retenir la hauteur de flux, en considérant la cinétique du phénomène toujours suffisamment importante pour le rendre potentiellement dangereux. Dans les faits, c'est la combinaison de ces deux grandeurs qui permet d'identifier la classe d'intensité correspondante.

Ce type de désordre est de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents en surface.

Parmi les principaux facteurs influant sur les caractéristiques de la coulée, on citera : la nature des matériaux constituant la « charge » de la coulée, le volume de matériau mobilisable, la pente et la morphologie du talus le long duquel s'initie la coulée, la pente et la morphologie de la zone d'épandage (gouvernant notamment la hauteur de flux), l'existence d'obstacles à la propagation de la coulée, etc.

Les valeurs seuils présentées dans le tableau suivant sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas.

Classe d'intensité	Description	Hauteur de flux (fournie à titre purement indicatif)
Modérée	Coulée capable de dégrader certains bâtiments et de mettre en danger la circulation	< 50 cm
Elevée à Très élevée	Coulée dévastatrice pour les personnes et les biens	> 50 cm

Qualification de la prédisposition

L'existence d'indices d'anciens mouvements de type « coulées » doit être recherchée avec la plus grande attention. Toutes choses égales par ailleurs, elle peut contribuer à augmenter la prédisposition qu'un site voisin, présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation sensiblement similaire puisse subir, à l'avenir, d'autres phénomènes de ce type.

Coulées d'anciens résidus d'exploitation

Les principaux facteurs de prédisposition sont :

- la prédisposition de la digue, lorsqu'elle existe, à subir des désordres de type glissements superficiels ou profonds de nature à affaiblir sensiblement sa résistance ;
- la constitution de la digue, lorsqu'elle existe, par « méthode amont » ou, à moindre degré, par « méthode verticale » ;
- la décantation et la consolidation insuffisantes des matériaux retenus derrière la digue ne permettant pas de s'affranchir du risque de flux dynamique en cas de rupture de la digue.

Coulées par liquéfaction d'ouvrages de dépôt

Les principaux facteurs de prédisposition sont :

- l'existence de matériaux présentant un caractère thixotropique, c'est-à-dire pouvant brutalement être affectés par un phénomène de liquéfaction, du fait notamment d'un drainage insuffisant ;
- la prédisposition du site à subir d'importantes sollicitations dynamiques, notamment vibrations (séismes, tirs de mine, effondrement d'une partie du talus) ;
- l'existence d'une digue sous-dimensionnée pour résister à la liquéfaction brutale des matériaux qu'elle a pour vocation de confiner.

Nuées ardentes

Le développement de nuées ardentes exige l'existence d'un ouvrage de dépôt en combustion, conjuguée à l'effondrement d'un pan entier de talus de nature à initier la formation d'un nuage dangereux.

Coulées affectant des flancs de fosses à ciel ouvert

Les principaux facteurs de prédisposition au développement de coulées prenant naissance au sein de bassin de décantation d'anciens résidus d'exploitation sont :

- la nature et la granulométrie des éboulis ou matériaux constituant le flanc des fosses (notamment la présence de fines particules argileuses) ;
- la prédisposition à des arrivées brutales et massives d'eau (pas de système efficace de drainage, fortes précipitations possibles...) ;
- forte pente de talus.

3.1.7 L'ALEA « ECROULEMENT ROCHEUX »

Qualification de l'intensité

C'est le **volume de matériau mis en mouvement** qui sera retenu pour discriminer les classes d'intensité. Suivant le volume de matériau écroulé, le type de désordre est de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents en surface.

Les deux principaux facteurs susceptibles d'influer sur le volume de matériau mis en mouvement sont la morphologie du front rocheux et la densité de discontinuités qui l'affectent.

Les valeurs seuils présentées dans le tableau suivant sont fournies à titre purement indicatif. Elles pourront être adaptées au contexte par l'expert en charge de la réalisation de l'évaluation des aléas.

Classe d'intensité	Description	Volume mis en jeu
Limitée	Chute de pierres isolées	$< 0,1 \text{ m}^3$
Modérée	Chute de blocs	$0,1 \text{ m}^3 < v < 10 \text{ m}^3$
Elevée	Ecroulement	$10 \text{ m}^3 < v < 10^4 \text{ m}^3$
Très élevée	Ecroulement majeur	$> 10^4 \text{ m}^3$

Qualification de la prédisposition

L'existence d'anciens mouvements de type « écroulements rocheux » doit être recherchée avec la plus grande attention lors des visites sur site entreprises au cours de la phase informative. Toutes choses égales par ailleurs, elle peut contribuer à augmenter la prédisposition qu'un site voisin, présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation sensiblement similaire puisse subir, à l'avenir, d'autres phénomènes de ce type.

Parallèlement aux retours d'expérience, les facteurs de prédisposition au développement d'instabilités rocheuses sont principalement de trois ordres :

- la **géométrie des fronts de fosse** : plus la hauteur du front de taille sera importante et la pente prononcée et plus le front sera découpé, mettant ainsi des volumes rocheux en surplomb, plus la configuration sera défavorable à la chute d'éléments rocheux ;
- le **réseau de discontinuités** affectant le massif (présence de joints de stratification, failles, fractures ou diaclases, contacts entre le massif et les terrains superficiels). Ces discontinuités sont en effet susceptibles de découper des masses rocheuses et de faciliter leur détachement du front de falaise ;
- les **facteurs extérieurs** pouvant jouer un rôle aggravant : l'absence de système de gestion des eaux de ruissellement, les phénomènes climatiques de type gel/dégel, l'existence de sollicitations dynamiques (séismes, tirs de mine...) ou statiques (surcharge en crête de falaise), etc.

3.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN

Gestion de l'incertitude de localisation

Le fait de disposer d'anciens plans d'exploitation retrouvés dans les fonds d'archives consultés ne suffit pas. Il est en effet nécessaire de les recaler sur un fond topographique de surface actualisé ce qui n'est pas toujours chose aisée. Il convient tout d'abord de retrouver des éléments de calage (anciennes entrées, éléments de surface reportés sur le plan d'exploitation) pour superposer au mieux les deux fonds cartographiques. On peut alors, dans un second temps, être amené à « retoucher » le plan d'exploitation par distorsion de manière à optimiser le calage sur les différents points « sûrs » disponibles. Il n'est en effet pas rare que les éléments cartographiques disponibles soient des reproductions de documents originaux, voire des photocopies de photocopies, ces manipulations successives ayant inéluctablement contribué à dégrader la précision du report cartographique.

Malgré l'attention portée à ces corrections, une incertitude demeure généralement sur la précision du report cartographique, ce qui nécessite la prise en compte d'une marge d'incertitude. Suivant la qualité des cartographies disponibles, le nombre de points de calage et la précision des opérations de retouche entreprises, cette incertitude peut varier du mètre à plusieurs dizaines de mètres.

Il convient alors d'ajouter cette marge d'incertitude à l'extension des effets prévisibles en surface. Logiquement, puisqu'il s'agit d'une marge d'incertitude et que les phénomènes pressentis au sein de cette marge sont identiques à ceux caractérisant la zone centrale, les niveaux d'aléas caractérisant ces deux zones seront identiques.

3.3 RECUEIL DES DONNEES NECESSAIRES A L'ANALYSE DE L'ALEA MOUVEMENTS DE TERRAIN

3.3.1 RECHERCHE DE DONNEES D'ARCHIVES

L'objectif est de collecter le maximum d'informations sur la (ou les) méthodes d'exploitation, la localisation des travaux, les techniques de mise en sécurité adoptées à la fermeture du site. La plupart de ces informations doivent normalement figurer dans le dossier d'arrêt des travaux mais elles peuvent être complétées, en tant que de besoin, par des recherches en archives. Aucun type de document ne doit être négliger, tous étant susceptibles de fournir des informations importantes (plans, comptes rendus de visite, dossiers d'indemnisation...).

Outre une recherche par commune, on ne saurait trop recommander une analyse attentive des séries S du fonds d'archives au sein desquelles il existe presque systématiquement un sous répertoire « mines et carrières ». Au milieu de nombreux documents administratifs qui n'ont, pour la plupart, aucun intérêt pour l'évaluation des risques, il est possible de retrouver des anciens plans d'exploitation ou des rapports de visite d'un ingénieur des mines décrivant, avec force détails, l'exploitation inspectée.

Les dossiers « accidents » constituent parfois également des sources d'informations stratégiques, même si le dépouillement de ces données s'avère souvent fastidieux car ces dernières se présentent généralement sous la forme d'une compilation de cas venant de sites d'exploitation différents. En effet, même s'ils ne font pas forcément référence à des désordres majeurs, la survenue d'un accident exigeait souvent la tenue d'une enquête et la rédaction d'un rapport très détaillé décrivant notamment la méthode d'exploitation utilisée.

Lorsque ces sources d'informations possibles ont été étudiées, d'autres canaux peuvent être envisagés si des informations importantes demeurent manquantes. Certaines sources potentiellement stratégiques sont parfois difficiles à identifier. C'est notamment le cas des associations de spéléologues, souvent amenés à réaliser des levés de cavités lorsqu'ils ont l'occasion de pénétrer des vides non reconnus, et des associations historiques diverses connaissant, sur le bout des doigts, l'histoire locale, aussi bien culturelle qu'industrielle.

On citera également pour mémoire, dans certains cas spécifiques, les Archives Nationales, les Directions Régionales des Affaires Culturelles (Services Régionaux d'Archéologie) lorsque les ouvrages concernés représentent des vestiges culturels importants, les Archives du monde du travail à Roubaix, etc.

3.3.2 DONNEES A RECHERCHER SUR SITE

La phase d'inspection sur site doit viser à rechercher tous les indices de mouvements observables en prenant notamment soin de noter leur intensité (diamètres d'effondrement, volume de matériaux écroulés) ainsi que leur caractère actif (signes de mouvements récents) ou, au contraire, stabilisé de longue date (végétation ayant repris le dessus sur les anciens mouvements par exemple).

La recherche d'anciens ouvrages miniers de type puits ou descenderies doit également être menée avec la plus grande attention. Outre les éventuels risques qui peuvent en résulter, notamment lorsqu'ils n'étaient pas répertoriés sur plan, ces indications peuvent s'avérer essentielles pour le calage en surface des anciens plans d'exploitation du fond.

3.3.3 INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Comme pour les autres aléas, le recours à des investigations complémentaires devra être réduit au strict minimum. Pour ce qui concerne l'aléa mouvements de terrain, les informations les plus fondamentales concernent principalement la localisation des exploitations et la persistance de vides au sein des vieux travaux. Lorsque aucune de ces informations n'est disponible et qu'il est impossible de les évaluer au regard des données existantes, le recours à des travaux de forages, voire la mise en œuvre de mesures géophysiques peut être envisagée.

4. L'ALEA EMISSION DE GAZ DE MINE EN SURFACE

4.1 QUALIFICATION DE L'ALEA EMISSION EN SURFACE DE GAZ DE MINE

4.1.1 INTENSITE DU PHENOMENE

Le phénomène redouté correspond à une remontée en surface d'un gaz de mine susceptible de présenter des dangers, principalement pour les personnes et, plus exceptionnellement, pour les biens. Il s'agit des dangers d'inflammation ou d'explosion, d'asphyxie, d'intoxication et d'irradiation.

Des dangers vis-à-vis des biens ou infrastructures n'existent que lorsque le gaz de mine est inflammable. En effet, seules l'explosion ou l'inflammation peuvent entraîner des dégâts matériels, les personnes étant également exposées dans un tel scénario. Pour simplifier la réflexion, nous considérerons, dans ce qui suit, que l'intensité du phénomène ne se traduit qu'en terme de dangerosité sur les personnes.

Les grandeurs les plus caractéristiques permettant de décrire l'intensité du phénomène redouté sont les suivantes :

- **la composition du gaz de mine**

Parmi les composants gazeux redoutés, seuls quelques gaz sont inflammables ou toxiques et, parmi les gaz toxiques, tous n'ont pas le même niveau de toxicité. C'est donc par la connaissance de la composition constatée ou prévisible du gaz de mine que l'on peut en déterminer les dangers et leur intensité ;

- **l'importance du flux gazeux et sa répartition à la surface du sol**

Les conséquences du phénomène seront d'autant plus intenses que le flux de gaz pouvant émaner en surface sera important. La valeur du flux dépend directement de la différence de pression entre l'atmosphère des travaux et l'air libre. De même, un dégagement gazeux concentré localement aura, à débit égal, des conséquences plus importantes que s'il était réparti sur une vaste surface, situation qui contribue à faciliter sa dilution dans l'air atmosphérique.

L'échelle d'intensité proposée ci-dessous devra être prise en considération à titre indicatif : il s'agit de valeurs guides pour l'évaluation de l'aléa plus que des références absolues.

Classe d'intensité	Emission de gaz de mine
Très limitée à limitée	Emission contenant : <ul style="list-style-type: none"> • soit des gaz inflammables, à des teneurs inférieures à la LIE¹⁵ • soit des gaz asphyxiants, toxiques ou ionisants, à des teneurs supérieures à la TMR¹⁶ mais ne pouvant pas entraîner qu'un impact faible et réversible¹⁷ • soit du radon, à des teneurs supérieures à 1000 Bq/m³ mais inférieures à 10 000 Bq/m³¹⁸
Moyen	Emission limitée contenant des gaz : <ul style="list-style-type: none"> • soit directement inflammables ou pouvant le devenir par dilution dans l'air • soit asphyxiants ou toxiques à des teneurs pouvant entraîner un impact significatif Emission de radon à des teneurs supérieures à 10 000 Bq/m ³
Elevée	Emission importante contenant des gaz : <ul style="list-style-type: none"> • soit directement inflammables ou pouvant le devenir par dilution dans l'air • soit asphyxiants ou toxiques à des teneurs pouvant entraîner un impact significatif
Très élevée	Emission importante contenant des gaz asphyxiants ou toxiques à des teneurs élevées pouvant entraîner directement un impact létal

¹⁵ LIE : Limite Inférieure d'Explosibilité (voir annexe F).

¹⁶ TMR : Teneur Maximale autorisée par la Réglementation en vigueur (voir annexe F).

¹⁷ Voir annexe F.

¹⁸ Voir annexe F.

4.1.2 PREDISPOSITION

Plusieurs facteurs essentiels gouvernent la prédisposition d'un site minier à être le siège d'émanations de gaz de mine. Les premiers, qui concernent la production du gaz de mine, auront trait au réservoir constitué par les vides miniers et à son alimentation. Les seconds concernent la propension qu'aura le gaz présent dans les vides miniers à remonter jusqu'en surface.

Prédisposition du réservoir à émettre du gaz de mine

Les deux éléments déterminant la prédisposition du réservoir et des terrains encaissant à émettre du gaz de mine sont la nature du mécanisme à l'origine de la présence de gaz au sein des vides miniers et le volume de ces vides.

Mécanisme à l'origine de la présence de gaz

Un réservoir réalimenté en continu en gaz dangereux sera plus susceptible d'émettre du gaz en surface qu'un réservoir dans lequel la production de gaz a désormais cessé.

De ce fait, à titre d'exemple, une ancienne mine exploitée dans un gisement franchement grisouteux sera *a priori* plus prédisposée à émettre du gaz qu'une exploitation située dans un gisement faiblement grisouteux.

La prédisposition à une remontée de gaz en surface intégrera donc la nature du matériau extrait et celle des terrains encaissants, la présence constatée ou non de gaz au sein du gisement durant les travaux d'extraction ainsi que l'occurrence d'accidents liés au gaz pendant ou même après l'exploitation.

La prédisposition du matériau exploité et des terrains encaissants à subir des transformations chimiques conduisant à une production de gaz devra également être prise en considération. On citera, par exemple, le risque de feu ou d'échauffement de matériaux combustibles ou encore l'attaque de carbonates par de l'eau acide.

Volume des vides miniers

Quelle que soit l'origine du gaz de mine, la quantité de gaz susceptible de s'accumuler et de migrer vers la surface est directement liée au volume disponible au sein du réservoir minier. L'évaluation du volume non ennoyé du réservoir souterrain, de sa répartition dans l'espace et de son évolution dans le temps (effet de l'ennoyage) influera également directement sur la prédisposition du phénomène redouté.

Prédisposition à la remontée de gaz de mine jusqu'en surface

Les principaux facteurs susceptibles de faciliter ou, au contraire, de s'opposer à la remontée de gaz jusqu'en surface sont principalement de trois ordres : la différence de pression entre le réservoir souterrain et l'air libre, l'épaisseur et la perméabilité des terrains de recouvrement ainsi que l'existence d'éventuels « drains préférentiels ».

Différentiel de pression

Plus la différence de pression (positive) entre les anciens travaux et l'atmosphère en surface sera importante, plus la prédisposition du site à être le siège d'émanations de gaz en surface sera jugée sensible. On notera qu'il n'est pas nécessaire que cette surpression relative s'établisse de manière permanente, l'émission, même transitoire, de gaz de mine peut, en effet, suffire à engendrer des situations dangereuses pour les personnes et les biens exposés.

A titre d'exemple, toutes choses égales par ailleurs, la prédisposition d'une exploitation au cours de l'ennoyage à développer des remontées de gaz en surface sera plus importante que celle d'une exploitation où le niveau d'eau est déjà stabilisé (effet de pistonage par remontée de la nappe).

Épaisseur et perméabilité des terrains de recouvrement

La prédisposition d'un gaz à migrer vers la surface au travers des terrains de recouvrement dépend de deux principaux facteurs : leur épaisseur et leur perméabilité au gaz. Ces deux facteurs, très variables d'une exploitation à une autre, peuvent être considérés ensemble ou séparément :

- l'importance de la profondeur aura, tout naturellement, un effet réducteur sur la prédisposition à la remontée de gaz. Ainsi, sauf configurations exceptionnelles (par exemple, la présence des failles traversantes et ouvertes), on considère généralement qu'au-delà d'une épaisseur de recouvrement de 200 mètres, la probabilité que du gaz puisse remonter en quantité significative jusqu'en surface devient nulle à négligeable ;
- la perméabilité des terrains dépendra de nombreux paramètres : perméabilité naturelle des bancs de roches et couches de sol, présence ou non de nappes aquifères dans le recouvrement, épaisseur et continuité de ces nappes, degré de déstructuration du recouvrement résultant de l'exploitation, paramètre directement relié à la méthode d'exploitation. Une forte perméabilité des terrains de recouvrement contribuera à augmenter la prédisposition à la remontée de gaz jusqu'en surface.

Existence de « drains préférentiels »

Les ouvrages de communication entre les vieux travaux et la surface (puits, descenderies, fendues, galeries d'accès...) sont susceptibles, lorsqu'ils n'ont pas été obturés de manière suffisamment étanche, de constituer des vecteurs privilégiés pour la remontée du gaz vers la surface.

Ainsi, en fonction de la nature du traitement mis en œuvre, la présence d'un ouvrage de type puits ou galerie pourra contribuer à augmenter, de manière plus ou moins sensible, la prédisposition à l'émanation de gaz de mine en surface. Ceci est vrai au droit de l'ouvrage mais également dans les terrains environnants, en raison des incertitudes de localisation des anciens travaux, de la migration possible dans d'anciennes galeries de subsurface, de l'étendue des terrains déconsolidés...

Dans le même ordre d'idée, on attachera une attention particulière aux failles

naturelles ou aux fractures majeures provoquées par l'exploitation. Ces discontinuités, lorsqu'elles sont franches et ouvertes, peuvent en effet également constituer des points privilégiés vis-à-vis des écoulements gazeux vers la surface.

4.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALEA EMISSION DE GAZ DE MINE

La cartographie de l'aléa « émission de gaz de mine en surface » ne présente pas de spécificité particulière. L'extension des zones d'aléas doit inclure l'incertitude pouvant provenir d'une mauvaise localisation spatiale des anciens travaux souterrains et des anciens ouvrages miniers débouchant en surface mais également la migration latérale possible des gaz par les ouvrages connectés, les terrains déconsolidés... (figure 7).

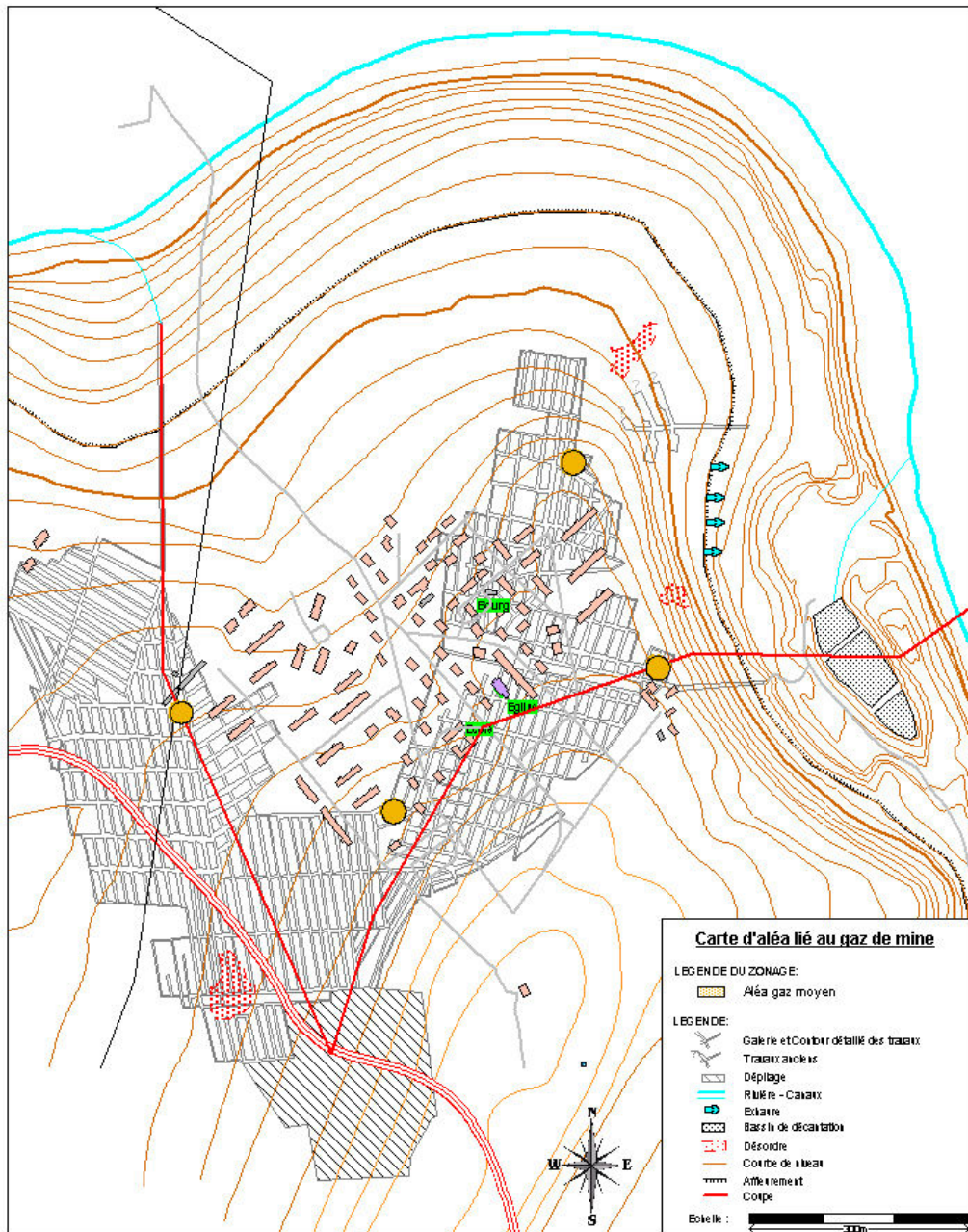


Figure 7 : Exemple de carte d'aléa « émission de gaz de mine en surface »

4.3 RECUEIL DES DONNEES NECESSAIRES A L'ANALYSE DE L'ALEA EMISSION DE GAZ DE MINE

4.3.1 RECHERCHE DE DONNEES D'ARCHIVES

Les données relatives aux *travaux miniers*, c'est-à-dire le contour des zones exploitées et la position des ouvrages ainsi que celles relatives aux méthodes employées sont fondamentales pour permettre une analyse de l'aléa « émission de gaz de mine en surface ». On s'attachera notamment à analyser le réservoir minier en identifiant notamment les points hauts et les zones susceptibles de piéger le gaz de mine (y compris les structures géologiques particulières), sans négliger pour autant la possibilité d'une migration latérale du gaz.

La connaissance de la *géologie* des terrains de recouvrement (nature et caractéristiques de perméabilité, existence de nappes aquifères...) sont également des données essentielles conditionnant très fortement l'aléa, tout comme les données relatives à l'*hydrogéologie* du site traité et à sa *dynamique*.

Enfin, les *données spécifiques aux gaz* présents pendant ou après l'exploitation seront soigneusement collectées et synthétisées. A titre d'exemple, on peut citer, pour une ancienne exploitation houillère, les données aussi bien qualitatives que quantitatives que sont :

- la relation des manifestations du grisou dans les chantiers souterrains, faite dans des ouvrages divers ou encore les rapports établis par les exploitants ou les ingénieurs chargés de la surveillance et du contrôle des mines ;
- le classement administratif des chantiers vis-à-vis du grisou, apparu en France vers la fin du 19^{ème} siècle, lors de la mise en place de la réglementation relative à la sécurité ;
- la mise en place de moyens de prévention contre le grisou : explosifs de sûreté, lampes de sûreté, en remplacement des lampes à feu nu, ventilation mécanique, en lieu et place de la ventilation naturelle ou de la ventilation par foyers d'aéragé, grisoumètres de plus en plus sophistiqués et fiables...
- les rapports d'accidents liés au grisou, allant de la simple flambée sans conséquence pour les personnes jusqu'à la véritable catastrophe ;
- les résultats des mesures diverses du dégagement grisouteux : mesure de la teneur en méthane dans les voies de retour d'air et détermination du dégagement spécifique, mesure de la concentration du charbon en méthane ou en dioxyde de carbone ;
- les mentions, dans les archives, de remontées de gaz en surface et de leur manifestation, informations malheureusement très rares

4.3.2 DONNEES A RECHERCHER SUR SITE

Toutes les *mesures* spécifiques de gaz réalisées dans le passé ou éventuellement entreprises lors de l'élaboration du PPRM seront utiles à l'analyse de l'aléa :

- nature, composition et débit de gaz de mine à l'orifice des ouvrages miniers ;

- mesures réalisées dans des zones confinées de la surface (caves, égouts, réseaux enterrés, etc.) ;
- mesure directe du flux gazeux à la surface du sol ;
- détection de la présence de radon dans les habitations situées dans l'emprise des secteurs concernés.

4.3.3 INVESTIGATIONS COMPLEMENTAIRES

Parmi les paramètres caractérisant les émissions gazeuses, la nature et la composition de l'atmosphère au sein des vides miniers les plus proches de la surface ou encore derrière les ouvrages de fermeture des orifices miniers constituent un élément essentiel pour pouvoir apprécier l'importance des aléas liés au gaz de mine.

En absence de données tangibles ou d'accès direct à l'atmosphère d'anciens travaux miniers, des investigations spécifiques pourront être entreprises au travers d'un (de) sondage(s) judicieusement positionné(s) et débouchant vers les vides miniers concernés, lorsque le contexte et la nature du gisement le justifient.

D'autres mesures mentionnées ci-avant pourront être entreprises ultérieurement, après une première analyse des données disponibles aboutissant à une pré-définition des zones d'aléas. Elles pourront permettre une vérification de la présence et de l'importance d'un dégagement gazeux éventuel à la surface.

BIBLIOGRAPHIE

ATLAN Y., LANDRY J., VAGNERON J.-M.

Fiches signalétiques de digues à stériles concernant quelques exploitations minières françaises. Rapport BRGM n° 80 SGN 433 GEG

DE LA GOUPILLIERE H, 1920

Cours d'exploitation des Mines. 5 volumes. Paris Dunod Editeur, 1920.

DIDIER C., TRITSCH J.J., 1996

Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risques de mouvements de terrain. Rapport INERIS pour le compte du Ministère de l'Environnement – Direction des Risques Majeurs. 118 pp. Référence SSE-JTr-CDi/CS-95-21EP37/R01 daté du 30 avril 1996.

DIDIER C., 1997

Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Traitement des puits, galeries et descenderies abandonnés. Rapport INERIS pour le compte du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Référence INERIS-SSE-CDi/CS-97-22EP46/R04 daté du 30 janvier 1997.

DIDIER C., 2001

Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Rapport INERIS pour le compte du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. 130 pp + figures et annexes. Référence INERIS-DRS-01-25750/R01 daté d'avril 2001.

FINE J., 1993

Le soutènement des galeries minières. Editions ARMINES, 1993.

FLAGEOLLET J.C., 1989

Les mouvements de terrain et leur prévention. Editions MASSON. Collection Géographie, 1989.

MICHALSKI E.R., OUVRY J.F., WOJTKOWIAK F., 1997

Aspects hydrauliques des ouvrages de retenue des résidus industriels fins. Mines & Carrières – Les Techniques, numéro spécial Digues & Terrils, novembre 1997. Editions de la Société de l'Industrie Minérale.

PAQUETTE Y., HANTZ D., 1997

Terrils et verses minières. Conception, surveillance, réhabilitation. Mines & Carrières – Les Techniques, numéro spécial Digues & Terrils, novembre 1997. Editions de la Société de l'Industrie Minérale.

PAQUETTE Y., 1997b

La combustion des remblais houillers et crassiers sidérurgiques. Mines & Carrières – Les Techniques, numéro spécial Digues & Terrils, novembre 1997. Editions de la Société de l'Industrie Minérale.

PAQUETTE Y., LAVERSANNE J., 2003

Guide du détenteur de terrils et autres dépôts miniers issus de l'activité charbonnière (verses, bassins de décantation, dépôts de cendres). Les fascicules de l'Industrie Minérale. Code ISBN 2-9517765-2-7.

FIGUET J.P., WOJTKOWIAK F., 2000

Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. Mines & Carrières. Volume 82, juin 2000, p. 36-47. Editions de la Société de l'Industrie Minérale.

AUTRES DOCUMENTS

Guide technique d'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Collection Environnement – les risques naturels. Laboratoire des Ponts et Chaussées. Juin 2002.

Code ISBN : 2-7208-3107-7.

Guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de Prévention des Risques naturels (PPRN). Risques de mouvements de terrain. La documentation française, 1999. Code ISBN : 2-11-004354-7

LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Présentation sommaire de quelques-unes des principales méthodes d'exploitation	5 A4
Annexe B	Précisions sur les teneurs en gaz	3 A4