

GUIDE



2018 / Ineris 17-164640-01944A

Évaluation des aléas miniers

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable

Ce guide méthodologique a été élaboré à la demande de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) au sein du ministère de la Transition écologique et solidaire.

Dans le cadre de ses missions d'appui pour le Ministère, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) en a assuré le pilotage.

Ce document s'appuie également sur un précédent guide d'élaboration des Plans de prévention des risques miniers établi sous la coordination et la direction scientifique de l'Ineris¹.

Le bureau du sol et du sous-sol (B3S) de la DGPR a assuré la vérification du présent document, avec l'appui de GEODERIS et des Pôles après-mine.

Pilotage :

Christian Franck et Romuald Salmon (Ineris)

Rédacteurs :

Christian Franck, Romuald Salmon, Christophe Didier, Yves Paquette, Zbigniew Pokryszka (Ineris)

Comité de lecture :

- Olivier Astier, Valérie Michaut (B3S)
- Aline Lombard, Sébastien Thiery (Cerema)
- Rafik Hadadou (GEODERIS)
- Pascale Hanocq (Pôle Après-Mine Est)
- Dominique Leroy (Pôle Après-Mine Ouest)
- Jehan Giroud (Pôle Après-Mine Sud)

¹ - L'élaboration des Plans de prévention des risques miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine. Rapport Ineris DRS-06-51198/R01, 04/05/2006.

Sommaire

1.	INTRODUCTION	7
2.	NOTIONS ET PRINCIPES IMPORTANTS RELATIFS À L'ÉVALUATION DE L'ALÉA	9
2.1	Qu'est-ce que l'aléa	9
2.2	Comment évaluer et hiérarchiser l'aléa	9
2.2.1	Qualification des classes d'intensité	9
2.2.2	Qualification des classes de prédisposition	9
2.2.3	Qualification des classes d'aléa	10
2.3	Comment cartographier l'aléa	10
2.3.1	Évaluer l'extension des effets en surface	10
2.3.2	Tenir compte des incertitudes	10
3.	LE DÉROULEMENT D'UNE ÉTUDE D'ALÉA	11
3.1	Le périmètre géographique de l'étude	11
3.2	La phase informative	11
3.2.1	Recueil des données	11
3.2.2	Les cartes informatives	12
3.3	La phase d'évaluation des aléas	13
3.3.1	Le contenu du rapport d'évaluation des aléas	13
3.3.2	Les cartes d'aléas	14
4.	LES ALÉAS LIÉS AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN	15
4.1	Origine des phénomènes redoutés	15
4.1.1	Les travaux souterrains	15
4.1.2	Les travaux à ciel ouvert	15
4.1.3	Les ouvrages de dépôts	16
4.1.4	Synthèse des désordres possibles par type d'anciens ouvrages miniers	16
4.2	Les effondrements localisés	18
4.2.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	18
4.2.2	Effondrement localisé : qualification de l'aléa	18
4.2.3	Effondrement localisé : cartographie de l'aléa	21
4.3	Les affaissements progressifs	21
4.3.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	21
4.3.2	Affaissement progressif : qualification de l'aléa	23
4.3.3	Affaissement progressif : cartographie de l'aléa	25
4.4	Les affaissements cassants	25
4.4.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	25
4.4.2	Affaissement cassant : qualification de l'aléa	25
4.4.3	Affaissement cassant : cartographie de l'aléa	25
4.5	Les crevasses	25
4.5.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	25
4.5.2	Crevasses : qualification de l'aléa	26
4.5.3	Crevasses : cartographie de l'aléa	28
4.6	Les effondrements généralisés	28
4.6.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	28
4.6.2	Effondrement généralisé : qualification de l'aléa	29
4.6.3	Effondrement généralisé : cartographie de l'aléa	30

4.7	Les tassements	31
4.7.1	Les phénomènes, les mécanismes, les effets	31
4.7.2	Tassement : qualification de l'aléa	32
4.7.3	Tassement : cartographie de l'aléa	32
4.8	Les mouvements de pentes de matériaux meubles : glissements, mouvements superficiels, coulées	32
4.8.1	Les phénomènes, les mécanismes, les effets	32
4.8.2	Mouvements de pente de matériaux meubles : qualification de l'aléa	33
4.8.3	Mouvements de pente de matériaux meubles : cartographie de l'aléa	34
4.9	Les mouvements de pentes rocheuses : éboulements, chutes de blocs	34
4.9.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	34
4.9.2	Mouvements de pentes rocheuses : qualification de l'aléa	35
4.9.3	Mouvements de pentes rocheuses : cartographie de l'aléa	36
5.	LES ALÉAS LIÉS À L'ÉCHAUFFEMENT DES TERRAINS SUR DÉPÔT MINIER	37
5.1	Le phénomène, les mécanismes, les effets	37
5.2	Échauffement sur dépôt : qualification de l'aléa	38
5.2.1	Qualification de l'intensité	38
5.2.2	Qualification de la prédisposition	38
5.2.3	Échauffement sur dépôt : cartographie de l'aléa	38
6.	LES ALÉAS LIÉS AUX PERTURBATIONS HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES D'ORIGINE MINIÈRE	39
6.1	Origine des phénomènes redoutés	39
6.2	Nature et identification des phénomènes redoutés	40
6.3	Modification des émergences	40
6.3.1	Le phénomène et ses mécanismes	40
6.3.2	Qualification de l'aléa « modification des émergences »	41
6.4	Inondation des points bas topographiques	42
6.4.1	Le phénomène et ses mécanismes	42
6.4.2	Qualification de l'aléa « inondation des points bas topographiques »	42
6.5	Modification du régime des cours d'eau	43
6.5.1	Le phénomène et ses mécanismes	43
6.5.2	Qualification de l'aléa « modification du régime des cours d'eau »	44
6.6	Inondations brutales	45
6.6.1	Le phénomène et ses mécanismes	45
6.6.2	Qualification de l'aléa	45
7.	LES ALÉAS LIÉS AUX ÉMISSIONS DE GAZ EN LIEN AVEC L'EXPLOITATION MINIÈRE	47
7.1	Le phénomène et ses mécanismes	47
7.2	Émission de gaz : qualification de l'aléa	48
7.2.1	Qualification de l'intensité	48
7.2.2	Qualification de la prédisposition	49
7.3	Émission de gaz : cartographie de l'aléa	49
8.	DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	51
9.	BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE	53

1

INTRODUCTION

Le présent guide aborde successivement les différents aléas qui peuvent se produire sur les territoires marqués par la présence d'anciennes exploitations minières.

Dans le cadre de la gestion du risque que ces anciens travaux miniers peuvent générer, d'une part, et de l'aménagement durable de ces territoires, d'autre part, l'étude des aléas, et les cartes qui lui sont associées, constituent une étape essentielle.

Il s'agit de délimiter les zones où des aléas existent et d'en évaluer le niveau, afin de déterminer le risque pour les biens existants et les possibilités de construction ou d'aménagement pour le développement du territoire.

Cette étape technique clé permet aux services instructeurs d'élaborer les procédures de gestion du risque minier post-exploitation, aux collectivités de mieux connaître et de s'adapter aux phénomènes redoutés et aux aménageurs de mieux appréhender les conditions de constructibilité.

Ce guide vient en complément et en filiation de celui traitant de la gestion du risque minier post-exploitation [7]. Le lecteur trouvera ici des informations sur le phénomène auquel il peut être confronté, des retours d'expérience qui en ont été établis, des indications sur les paramètres concourant à évaluer et cartographier l'aléa.

Ce document prolonge la démarche initiée par le guide établi en 2006 sous la coordination et la direction scientifique de l'Ineris [1], dont il établit un condensé dédié exclusivement à l'évaluation de l'aléa.

Des phénomènes supplémentaires sont traités : l'affaissement cassant, les crevasses ainsi que les mécanismes spécifiques d'échauffement des dépôts miniers.

L'évaluation de l'aléa effondrement localisé a été sensiblement modifiée, bénéficiant des retours d'expérience de mise en application par GEODERIS [2] et de ceux relatifs aux désordres observés [5].

L'évaluation de l'aléa gaz de mine a également été modifiée de façon sensible, en considérant les avancées et conclusions du guide relatif à cet aléa publié par l'Ineris en 2016 [6].

En revanche le guide ne traite pas de l'impact environnemental et de l'émission de rayonnements ionisants des activités minières. Les phénomènes redoutés qui y sont associés font l'objet d'une démarche d'évaluation et de gestion des risques spécifique et différente de celle menée via l'étude des aléas visée dans le guide de gestion du risque minier post-exploitation [7].

2

NOTIONS ET PRINCIPES IMPORTANTS RELATIFS À L'ÉVALUATION DE L'ALÉA

2.1. Qu'est-ce que l'aléa

L'**aléa** est un terme couramment employé en prévention des risques. Il correspond à la **probabilité** qu'un phénomène (d'origine minière dans le cas présent) se produise sur un site, au cours d'une période de référence, en atteignant une **intensité qualifiable** ou **quantifiable**. La caractérisation d'un aléa repose classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.

En matière de prévention des risques, on entend comme période de référence une durée de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines d'années, pour fixer un ordre de grandeur. Il est donc nécessaire d'intégrer à l'analyse la dégradation inéluctable dans le temps des anciennes mines et l'évolution des matériaux et effluents (gaz, eaux) qui en sont issus à cette échelle de temps.

L'**intensité** du phénomène correspond à l'ampleur des désordres, séquelles ou nuisances susceptibles de résulter du phénomène redouté. Cela intègre une notion de grandeur des événements redoutés (taille et profondeur d'un cratère, hauteur de tranche d'eau, nature et teneur d'une émission de gaz...), mais également leurs potentiels effets sur les personnes et les biens.

La notion de **probabilité d'occurrence** traduit la sensibilité d'un site à être affecté par un phénomène. Quelle que soit la nature des événements d'origine minière redoutés, la complexité des mécanismes, la nature hétérogène du milieu naturel, le caractère 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 avec une approche probabiliste quantitative. On utilise donc une classification qualitative qui caractérise une **prédisposition** du site à être affecté par tel ou tel type de phénomène. C'est donc cette notion qui est retenue dans la suite du document.

Dans une optique de gestion, les intensités et probabilités sont regroupées en classes.

2.2. Comment évaluer et hiérarchiser l'aléa

L'aléa résulte donc 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, d'une part, la classe d'intensité d'un phénomène redouté et, d'autre part, sa classe de prédisposition.

2.2.1. Qualification des classes d'intensité

Des classes d'intensité sont nécessaires pour hiérarchiser les dégâts ou nuisances potentielles en fonction de la nature des phénomènes.

La démarche d'évaluation de l'intensité d'un phénomène consiste à identifier la ou les grandeurs physiques les plus discriminantes 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.

Caractériser les conséquences potentielles implique de se rapporter à la notion de « gravité » des phénomènes redoutés. On entend par gravité, l'importance des conséquences prévisibles sur les enjeux susceptibles d'être présents en surface. Celle-ci s'applique aux personnes (victimes) et aux biens (dégâts).

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.

Les études d'aléa établies dans le cadre de la prévention des risques miniers utilisent les classes suivantes pour définir l'intensité d'un phénomène : **très limitée** (rarement employée, réservée aux phénomènes de très faible incidence), **limitée, modérée, élevée et très élevée** (rarement employée également, réservée à des événements dévastateurs d'intensité exceptionnelle).

2.2.2. Qualification des classes de prédisposition

La qualification de la prédisposition consiste en une analyse de la possibilité d'apparition ou de manifestation en surface d'un phénomène.

Cette analyse s'appuie, en premier lieu, sur le retour d'expérience, à savoir l'existence passée, sur le site étudié ou sur un site similaire, de désordres ou nuisances.

Mais un site minier peut ne pas être le lieu de désordres connus (certains ont pu être oubliés) et receler néanmoins des configurations favorables à la survenue de désordres. Il convient donc, en deuxième lieu, de déceler ces configurations minières par l'examen de la typologie et de la configuration des travaux d'exploitation et de leur environnement topographique, géologique et hydrogéologique.

Par ailleurs, les exploitations minières étant pour la plupart anciennes sur le territoire français, on ne dispose que rarement de l'ensemble des documents et plans sur les travaux, ouvrages et anciens désordres miniers. Certains de ces documents et plans sont par

ailleurs peu précis ou s'appuient sur des référentiels qui ont disparus. Les incertitudes générées par cette non-exhaustivité et ces lacunes d'information peuvent donc conduire à intégrer, dans l'analyse de la prédisposition, un critère de présomption de présence de travaux et/ou ouvrages miniers pouvant conduire à considérer un aléa. Cette démarche est donc complexe et nécessite une expertise éprouvée.

La terminologie suivante est utilisée pour définir la prédisposition d'un site : **très peu sensible** (rarement employée), **peu sensible**, **sensible**, **très sensible**.

2.2.3. Qualification des classes d'aléa

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 dont un exemple est illustré dans le tableau suivant, en rappelant que chaque site peut donner lieu à des ajustements pour s'adapter au contexte spécifique qui le caractérise. Pour chacun des sites, le niveau d'aléa est évalué au cas par cas.

La terminologie suivante doit être utilisée pour qualifier les trois classes d'aléas : **faible**, **moyen** et **fort**.

2.3. Comment cartographier l'aléa

2.3.1. Évaluer l'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 fondamental 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 largement, sur des terrains non directement sous-minés par l'exploitation.

2.3.2. Tenir compte des incertitudes

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

Une base incontournable aux études consiste à positionner sur un fond topographique actuel les travaux et ouvrages miniers, sur lesquels les aléas sont susceptibles de s'exprimer. Ce travail de calage peut mettre en évidence des incertitudes particulièrement importantes si les archives sont anciennes et peu précises, d'origines variées ou même contradictoires. Pour ce qui concerne les aléas « inondations », les surfaces cartographiées sont le plus souvent le résultat d'estimations relevant d'un calcul basé sur des hypothèses ou le résultat d'un avis d'expert.

Tableau 1 : un exemple de tableau de croisement de la prédisposition et de l'intensité pour l'évaluation de l'aléa

Intensité	Prédisposition		
	Peu sensible	Sensible	Très sensible
Limitée	Faible	Faible	Moyen
Modérée	Faible	Moyen	Fort
Élevée	Moyen	Fort	Fort

3

LE DÉROULEMENT D'UNE ÉTUDE D'ALÉA

Une étude d'aléa se déroule en deux phases :

- une phase dite « **informative** », consistant en la présentation des sites miniers étudiés (histoire condensée, environnement géographique et géologique, modalités et agencements d'exploitation, recensement des anciens désordres) et le recueil et la valorisation des données d'archives et de terrain nécessaires à l'évaluation de l'aléa. Cette phase aboutit à l'établissement d'une ou plusieurs cartes informatives ;
- une phase d'**évaluation** des aléas, définissant, par phénomène retenu comme étant pertinent sur les sites étudiés et par configuration minière, les critères d'intensité et de prédisposition évoqués ci-avant et le niveau de l'aléa. Cette phase aboutit à l'établissement d'une ou plusieurs cartes d'aléas en fonction du nombre de phénomènes pertinents et de l'étendue du territoire étudié.

Le rapport de l'étude d'aléa restitue ces deux phases.

3.1. Le périmètre géographique de l'étude

Il s'agit, dans un premier temps, de définir le périmètre de l'étude. Un secteur minier couvre généralement le territoire de plusieurs communes. Les cartes d'aléas produites *in fine* sont portées à la connaissance de ces communes, voire constituent les documents de base à l'établissement d'un PPRM, il est donc important que l'étude d'aléas traite de façon exhaustive, en fonction de la connaissance des anciennes activités minières, l'ensemble des sites et substances minières sur ces territoires. Par exemple, le territoire d'un bassin houiller peut receler également la présence d'autres extractions ou recherches (fer, polymétallique...) méconnues voire oubliées et qui peuvent également influencer sur l'aménagement du territoire.

3.2. La phase informative

La phase informative est absolument fondamentale, non seulement pour le bon accomplissement de la phase d'évaluation des aléas qui en découle (fiabilité de l'évaluation et de la cartographie de ceux-ci), mais aussi pour sa bonne communication aux collectivités territoriales. L'acceptation par celles-ci sera d'autant plus aisée que l'ensemble des éléments miniers disponibles auront été pris en considération et que les incertitudes résiduelles auront été bien identifiées et explicitées.

3.2.1. Recueil des données

3.2.1.1. La recherche de documents et archives

La première source d'information à valoriser est, lorsqu'il existe (mines les plus récentes), le dossier réglementaire d'abandon ou d'arrêt des travaux miniers (DADT) établi par l'exploitant. Ce dossier contient généralement la grande majorité des informations indispensables à l'identification et la hiérarchisation des aléas.

Pour les exploitations orphelines ou anciennes abandonnées sans dossier d'arrêt, ou celles dont les dossiers d'abandon sont anciens et jugés insuffisants au regard des informations qu'ils contiennent pour évaluer les aléas, des recherches complémentaires doivent être entreprises. Il en est de même pour des exploitations récentes sises sur des territoires où des extractions minières anciennes sont répertoriées ou supposées : le dossier d'abandon ou le DADT établi par le dernier titulaire du titre minier peut ne pas avoir intégré l'ensemble de ces vieux travaux, et il est important d'opérer des recherches supplémentaires.

Toutes ces sources d'information doivent être explorées. Les plus intéressantes, consultées systématiquement, sont les archives des DREAL, les archives nationales, du monde du travail, départementales (notamment les séries dites « S », au sein desquelles il existe presque systématiquement un sous-répertoire « mines et carrières ») ou communales. Les archives de la DRAC, des archives des associations spéléologiques, ou de reconnaissance ou de valorisation des espaces souterrains (musées des mines), la banque de données du sous-sol (BRGM), les cartes géologiques, les *Annales des Mines* et les publications spécialisées fournissent également des compléments d'information à ne pas négliger.

La consultation de monographies anciennes, d'ouvrages ou de publications spécialisés, et de thèses, peut également fournir des renseignements précis tout comme les archives de la presse locale (événements produits).

L'objectif est de collecter le maximum d'informations sur la (ou les) méthode(s) d'exploitation, la localisation précise des travaux, les techniques de mise en sécurité adoptées à la fermeture du site, les données techniques importantes (plans, comptes-rendus réglementaires de visite des ingénieurs des mines, dossiers d'autorisation de fonçage de puits, d'indemnisation...) ainsi que les connaissances de désordres anciens survenus.

3.2.1.2. Le positionnement des plans miniers

La phase précédente de recherche de documents permet de collecter des plans miniers datant de

différentes époques de l'exploration à l'exploitation du gisement jusqu'à son arrêt. Il s'agit alors, et c'est une des étapes clés de cette phase informative, de sélectionner les plans les plus fiables, exhaustifs et précis pour cette phase informative et de les reporter sur fond topographique ou orthophotographique de surface, support de la future carte informative. Le positionnement et le calage entre le fond et la surface s'opèrent par repérage d'ouvrages miniers débouchant au jour (puits, galeries) ou autres dépôts, infrastructures ou éléments communs aux plans miniers et au fond cartographique de surface.

Cette démarche est itérative dans la mesure où les phases de reconnaissance sur site permettent généralement de retrouver des ouvrages ou infrastructures mentionnés sur les vieux plans miniers et d'améliorer leur calage par rapport à la surface.

À l'issue de cette démarche itérative, le positionnement des plans et des ouvrages est assorti d'une incertitude. Celle-ci est intégrée par la suite dans la cartographie de l'aléa dont elle constitue un élément important.

Le recours à l'analyse de photographies aériennes à différentes époques peut par ailleurs fournir des informations importantes sur l'évolution dans le temps des installations minières de surface les plus récentes (après 1945).

3.2.1.3. La reconnaissance sur site

Une reconnaissance détaillée du site doit être systématiquement entreprise lors de cette phase informative.

Il s'agit de procéder au repérage des traces des anciennes installations de surface, des ouvrages débouchant au jour et des dépôts miniers, dans l'optique de pouvoir géoréférencer le plus précisément possible les plans miniers. Dans les secteurs dépourvus de plan, et où des travaux de recherche ou d'exploitation sont supposés d'après la consultation des archives, la découverte de galeries, de puits, dépôts, travaux à ciel ouvert, anciennes extractions ou autres ouvrages miniers, indices de mouvements de surface, permet de fournir des indices de présence de vides.

La reconnaissance sur site permet également de retrouver des traces de désordres au droit des secteurs sous-minés, en complément de ceux mentionnés dans les archives ou signalés par les acteurs locaux. On s'attache alors à identifier au mieux les caractéristiques géométriques des désordres afin de pouvoir les relier à un type de phénomène.

Il est distingué ainsi les ouvrages et désordres dits « matérialisés » (vus sans ambiguïté sur le terrain) et les ouvrages et désordres « localisés » (mentionnés sur les plans miniers ou dans les archives mais non vus sur le terrain).

Cette localisation doit être la plus précise possible, afin de réduire au maximum leur incertitude de positionnement intrinsèque, ainsi que celle des travaux miniers souterrains.

Les visites sur site doivent également permettre de recenser les autres indices de type topographique, géologique (affleurements, failles) ou hydrogéologique (sources, zones inondées) importants pour l'analyse.

Lorsque l'accessibilité aux vides et les conditions de sécurité le permettent, cas de plus en plus rare en raison de la fermeture de ces vieux travaux encore accessibles, les visites de reconnaissance des ouvrages souterrains permettent de valider ou de préciser les plans d'exploitation existants ou, si nécessaire, de les lever. Elles fournissent également des informations importantes 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 travaux miniers (piliers dégradés, cloches d'éboulement au toit...).

Concernant les mines à ciel ouvert, les visites de reconnaissance permettent d'observer et caractériser l'état des fronts rocheux.

Cette phase de terrain permet par ailleurs d'apprécier les enjeux présents dans le secteur d'étude (habitations, autres bâtiments occupés, principales infrastructures) bien que l'évaluation des aléas est menée indépendamment de ceux-ci.

Cette phase permet également de recueillir des informations auprès des personnes connaissant le mieux l'environnement de l'ancienne exploitation minière, à savoir les mairies, les populations et les sachants locaux. Ces contacts 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 est incontournable : elle doit permettre, avec une bonne communication des objectifs de l'étude, d'instaurer un climat de confiance favorable à la transmission d'information.

3.2.2. Les cartes informatives

La carte informative est un outil qui recense les éléments essentiels connus (localisation des travaux et des ouvrages débouchant au jour, des désordres ou nuisances passés ou présents, des données géologiques et hydrogéologiques (émergences minières...) ou parfois supposés (indices douteux en surface...). Elle est le support de la carte d'identification et d'évaluation des aléas. Les cartes informatives sont généralement établies sur un orthophotoplan ou un fond IGN à l'échelle du 1/5 000. Des zooms sont généralement proposés lorsqu'il y a une forte densité d'information.

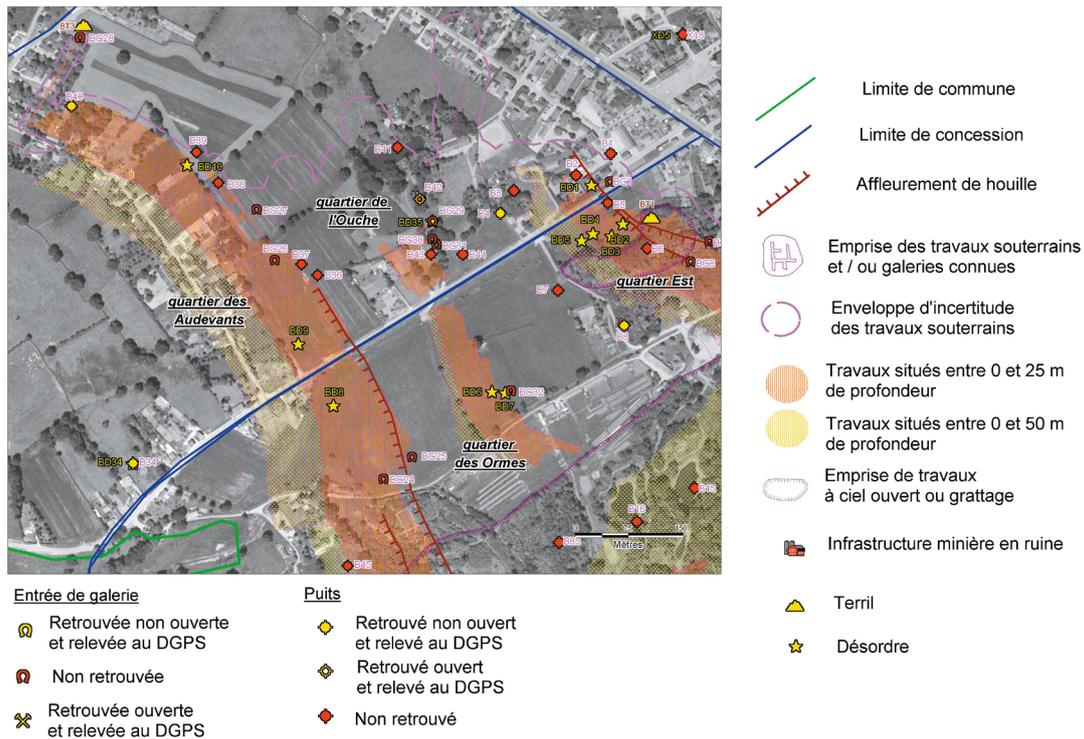


Figure 1 : exemple de carte informative

3.3. La phase d'évaluation des aléas

3.3.1. Le contenu du rapport d'évaluation des aléas

Le rapport d'évaluation des aléas présente d'abord les résultats de la phase informative, telle que décrite au chapitre 3.2, ainsi que les cartes informatives associées.

Le rapport décrit ensuite la phase d'évaluation des aléas :

- dans un premier temps, les aléas retenus sur le site minier considéré sont listés. Il se peut que certains phénomènes pressentis initialement, en raison de la configuration des anciens travaux miniers et/ou de la comparaison à des sites similaires, ne soient au final pas retenus ou que d'autres le soient en fonction d'indices récupérés lors de cette phase : dans ce cas, il est important d'en expliciter les raisons ;
- dans un deuxième temps, il est examiné, par type d'aléa retenu, le phénomène redouté et les mécanismes qui y concourent. L'évaluation du niveau de l'aléa, par les qualifications de l'intensité et du niveau de prédisposition évoqués au chapitre 2.2, puis leur croisement, s'ensuit. Pour un même aléa, plusieurs typologies correspondant à des mécanismes bien distincts peuvent apparaître (par exemple un effondrement localisé peut survenir par rupture d'un puits de mine, ou bien par rupture d'une galerie ou cavité souterraine). Dans ce cas, l'évaluation de l'aléa doit se faire de manière distinctive pour ne pas perdre l'information sur la configuration ou la typologie minière à laquelle elle se rattache.

Enfin, toujours par phénomène et, au sein de celui-ci, par typologie ou configuration, les principes qui ont concouru à cartographier l'aléa sont présentés. Il s'agit de justifier les marges retenues, du fait de

la répercussion et des conséquences en surface du phénomène redouté (marge d'influence), et du fait de l'incertitude de positionnement des travaux et ouvrages miniers par rapport à la surface (marge d'incertitude). Des schémas explicatifs sont appréciés car ils facilitent la compréhension.

Dans les chapitres détaillant les aléas, les principes d'évaluation et de cartographie pour chaque phénomène sont présentés.

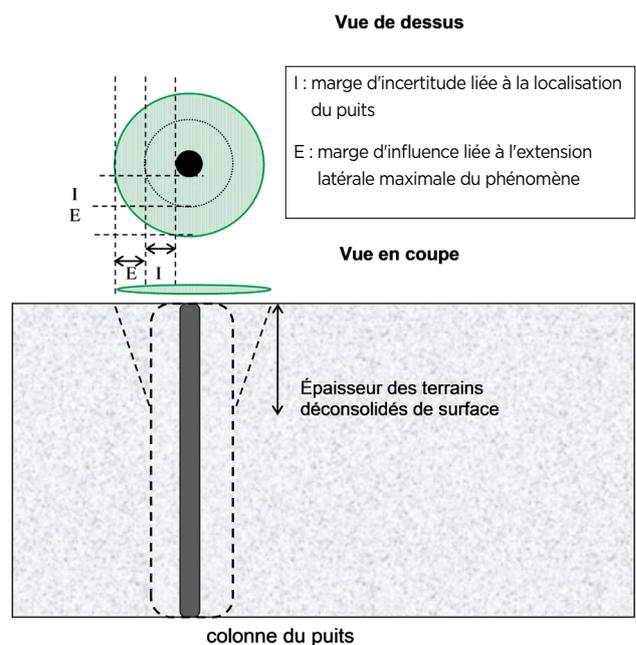


Figure 2 : un exemple de présentation de marge d'aléa « effondrement localisé » liée à la présence d'un puits. La marge d'influence E s'ajoute à la marge d'incertitude I

3.3.2. Les cartes d'aléas

Les cartes d'aléas sont établies par phénomène redouté (des groupements de phénomènes sont envisageables si la lecture n'en est pas altérée), pour une commune ou un groupement de communes donné. Ces cartes permettent de visualiser les zones d'aléas et leur niveau (faible, moyen, fort). La position des ouvrages miniers (ou des principaux d'entre eux) est souvent associée, pour un meilleur repérage.

Ces cartes et les rapports associés constituent un support de base au porter à connaissance des communes réalisé par le préfet de département,

à l'inscription des aléas retenus dans un document d'urbanisme (exemple : plan local d'urbanisme (PLU)), voire à l'établissement d'un plan de prévention des risques miniers (PPRM). Leur utilisation seule est insuffisante : elles doivent être notamment accompagnées du rapport de l'étude d'aléas explicitant la démarche d'analyse. Ces cartes sont généralement établies sur un orthophotoplan ou un fond IGN à l'échelle du 1/5 000. Comme pour la carte informative, des zooms peuvent être proposés lorsqu'il y a une forte densité d'information ou lorsque l'étendue des aléas est très limitée.

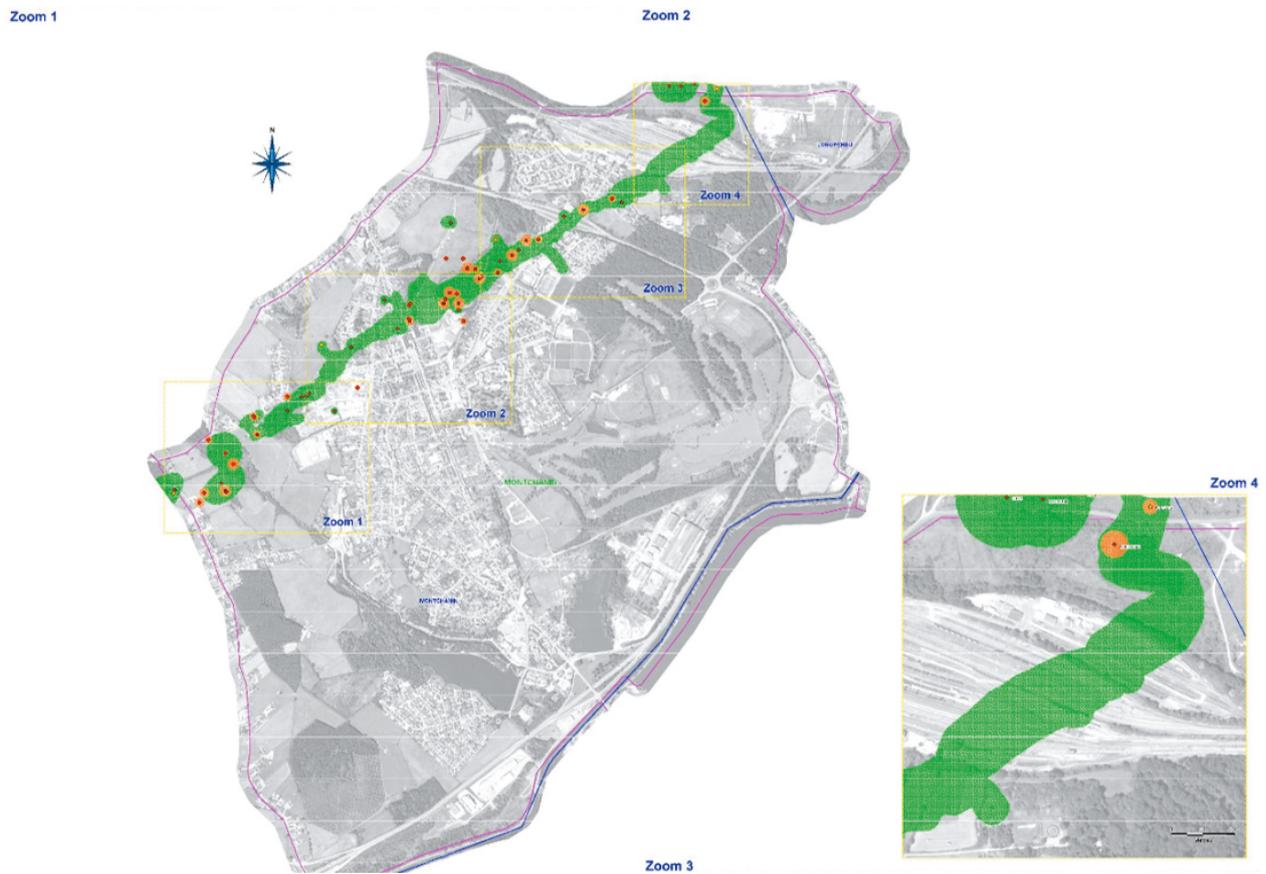


Figure 3 : exemple de carte d'aléa et de zoom de détail sur fond d'orthophotoplan. L'aléa effondrement localisé lié aux travaux souterrains apparaît ici en vert et celui lié aux ouvrages débouchant au jour est représenté par des périmètres circulaires

4

LES ALÉAS LIÉS AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN

4.1. Origine des phénomènes redoutés

L'exploitation minière a consisté à extraire du matériau, parfois en grandes quantités, dans le but de pouvoir en commercialiser une partie sous forme de minerai valorisable. Les excavations ainsi créées, souterraines ou à ciel ouvert, ont modifié de manière irréversible les massifs rocheux où se trouvait le minerai. 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.

4.1.1. 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 importants à la fermeture des travaux.**

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

Dans les exploitations dites partielles où ont persisté des vides résiduels importants (chambres et piliers, chambres vides, cavités de dissolution), la stabilité des anciens travaux peut être remise en cause par l'altération 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 initiaux relevés pour les exploitations avec 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 en surface seront minimisés en surface.

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

Ces travaux souterrains s'accompagnent inévitablement d'ouvrages (puits, galeries, descenderies...) qui ont assuré l'extraction, le déplacement du personnel, l'aération, ou autres fonctions nécessaires ou connexes à l'activité minière. Nombre d'ouvrages interceptent la surface : ils sont alors dénommés « ouvrages débouchant au jour ». Leur stabilité n'est pas garantie en cas de fermeture absente, insuffisante ou ancienne. Leur instabilité engendre généralement des effondrements localisés dont l'ampleur peut être importante si la géologie est particulière, ou lorsqu'il y a présence ou afflux d'eau. Ces ouvrages sont donc partie intégrante de l'étude des aléas « mouvements de terrain ».

4.1.2. Les travaux à ciel ouvert

Selon le contexte géologique, lorsque la profondeur et la teneur du gisement et le contexte géologique le permettaient, les mineurs ont pu exploiter le minerai par mines à ciel ouvert. Les travaux les plus anciens, lorsque le minerai affleurait, étaient effectués par ce mode, généralement de façon artisanale avant que les progrès techniques permettent de structurer l'extraction. On parle ainsi de « grattages », « excavations » ou autres termes régionaux. Selon le minerai extrait, on retrouve également le terme de « ferrière », « charbonnière », « perrière », « minière² ».

Au cours de la vie d'une mine, les conditions techniques ou économiques pouvant se révéler avantageuses, il a pu être créé des mines à ciel ouvert d'extension plus importante afin de récupérer une grande partie voire l'intégralité d'un gisement proche de la surface. 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 (plusieurs centaines de mètres).

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 pentés favorables aux ruptures).

Sous l'effet du temps, de l'érosion hydraulique et du gel, il est fréquent que ces flancs, généralement constitués de gradins et de fronts rocheux, mais également parfois de sols dans le cas des terrains superficiels, subissent des instabilités pouvant aller de simples chutes de blocs ou de ravinements, à la déstabilisation massive d'un front de talus (éboulement, glissement dans le cas d'un matériau meuble). **La combinaison entre la**

2 - Ce dernier terme peut correspondre par ailleurs à un régime d'extraction spécifique, accordé localement par arrêté préfectoral ou ordonnance plus ancienne.

nature géologique des terrains, leur fracturation, et la morphologie des flancs de fosse détermine le volume des masses potentiellement instables ainsi que le mécanisme susceptible d'initier la rupture.

4.1.3. Les ouvrages de dépôts

L'exploitation des mines, souterraines ou à ciel ouvert, a souvent entraîné la constitution de dépôts de résidus miniers à proximité des sites d'extraction. On différencie les résidus d'exploitation et/ou de recherche et les résidus issus d'un « process » de traitement et de valorisation du minerai.

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, au sortir de la chaîne de transformation, sont constitués d'un mélange de matières solides fines et d'eau recueillies à l'extrémité de la chaîne de traitement, lorsque toutes les opérations de valorisation du minerai ont été mises en œuvre. Ils contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments minéraux accompagnateurs ou en substances 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'extraction, la séparation et la concentration des métaux valorisables. Ils peuvent également contenir des matières combustibles.

Ces résidus ont été décantés au sein de bassins de rétention implantés dans des secteurs présentant des contextes topographiques et géologiques adaptés à cet effet (flanc de vallée, talwegs...) ou endigués avec des ouvrages de rétention érigés en périphérie de la zone de stockage. Ces ouvrages, appelés communément et souvent de manière impropre *digues*³, peuvent être en réalité des *barrages*, souvent construits avec du stérile de pierres de mine dont l'objectif principal est de constituer une retenue pour le stockage de résidus de traitement du minerai.

La nature et la granulométrie des matériaux constituant ces ouvrages peuvent être très variables. La rupture ou la déformation des ouvrages de dépôt résultent généralement de l'évolution défavorable d'un ou plusieurs facteurs gouvernant le comportement mécanique intrinsèque des déblais ou résidus, plus souvent de leur assise. Les désordres

les plus caractéristiques susceptibles d'affecter ces ouvrages sont, par ordre d'intensité croissante : les mouvements superficiels (ravinelements, glissements

superficiels), les glissements profonds et les coulées boueuses.

4.1.4. Synthèse des désordres possibles par type d'anciens ouvrages miniers

Le Tableau 2 suivant (voir p. 17) permet d'appréhender de manière synthétique les principaux désordres de type « mouvements de terrain » classiquement rencontrés selon deux facteurs d'entrée classiques (les phénomènes ou les types d'ouvrages miniers).

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.

3 - Ces termes de « digue » et de « barrage » ont de plus une connotation réglementaire dont il convient de prendre garde dans les études d'aléas.

Tableau 2 : récapitulatif des principaux désordres susceptibles de se développer par type d'anciens ouvrages miniers

Ouvrage minier	Phénomènes de « mouvement de terrain »							
	Effondrement localisé	Affaissements progressifs	Affaissements cassants	Crevasse	Effondrement généralisé	Tassement	Mouvements de pente (terrains meubles)	Mouvements de pente rocheuse
Ouvrages souterrains								
Exploitation totale profonde		Possible		Possible dans des cas particuliers (voir 4.5)		Possible		
Exploitation partielle	Possible	Possible	Possible dans des cas particuliers (voir 4.4)	Possible dans des cas particuliers (voir 4.5)	Possible dans des cas particuliers (voir 4.6)	Possible		
Exploitation filonienne	Possible	Possible				Possible		
Exploitations salines par cavités de dissolution	Possible	Possible			Possible dans des cas particuliers (voir 4.6)			
Anciens travaux en combustion	Possible	Possible				Possible		
Ouvrages miniers débouchant au jour	Possible	Possible				Possible		
Zones d'affleurement	Possible					Possible		
Travaux à ciel ouvert								
Découvertes remblayées	Possible					Possible		
Découvertes non remblayées en roche dures								Possible
Découvertes non remblayées en roche tendre							Possible	
Ouvrages de dépôt								
Terrils, verses, dépôts de stérile, « digues »	Possible					Possible	Possible	Possible
Bassin de décantation, rétention de matériaux fins avec ou sans digue						Possible	Possible	

4.2. Les effondrements localisés

4.2.1. Le phénomène, les mécanismes, les 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 vides miniers à l'origine. Si, dans la majorité des cas, la profondeur du cratère se limite à quelques mètres, dans certaines configurations particulières, elle peut atteindre voire dépasser une dizaine de mètres (effondrement de tête de puits par exemple).

En fonction du mécanisme initiateur du désordre et de la nature des terrains de sub-surface, les parois du cratère peuvent être subverticales 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 que les effondrements localisés sont des phénomènes potentiellement dangereux pour les personnes et les biens, notamment lorsqu'ils se développent au droit ou à proximité de secteurs urbanisés.



Photographie 1 : exemple d'effondrement localisé

Les principaux mécanismes ou scénarios initiateurs sont présentés de manière succincte dans le Tableau 3 (voir p. 19).

4.2.2. Effondrement localisé : qualification de l'aléa

4.2.2.1. Qualification de l'intensité

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

C'est principalement le **diamètre de l'effondrement** qui influe 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 qui est retenu 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 matière 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 elle s'avère souvent délicate à prévoir, notamment pour ce qui concerne les fontis et les débousses de puits.

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.

Tableau 4 : effondrement localisé : classes d'intensité

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
Limitée	$\varnothing < 5 \text{ m}$
Modérée	$5 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Élevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Le Tableau 4 propose une modification de la valeur seuil qui distingue les intensités limitées et modérées par rapport à la proposition du guide de 2006 [1]. La valeur seuil était de 3 m dans le guide de 2006, elle est à présent de 5 m.

En effet, la réalisation des cartes d'aléa « mouvements de terrain » liés à la présence d'anciens travaux miniers montre que le phénomène majoritairement prévu en termes de superficie d'aléa est l'effondrement localisé. Ceci a conduit à réaliser une analyse statistique sur plus de 1800 effondrements localisés miniers [5]. Cette analyse montre que :

- 90 % des effondrements miniers ont un diamètre inférieur à 10 m : les effondrements de très grand diamètre sont exceptionnels et correspondent à des contextes miniers très spécifiques qui sortent clairement des « cas courants » ;
- plus d'un tiers des effondrements ont un diamètre strictement inférieur à 3 m et près des deux tiers ont un diamètre inférieur à 5 m ;
- en zone d'aléa faible, plus de la moitié des effondrements recensés ont un diamètre inférieur à 3 m et plus de 80 % un diamètre inférieur à 5 m.

Par ailleurs, le CSTB fournit des dispositions constructives sur les zones susceptibles d'être affectées par un effondrement localisé de diamètre inférieur à 5 m ([13]).

Ces considérations ont mené à modifier les classes d'intensité de l'aléa effondrement localisé en modifiant la valeur coupure du diamètre de 3 m à 5 m.

Tableau 3 : effondrement localisé : principaux mécanismes initiateurs

Mécanisme initiateur	Mécanismes de propagation	Principales remarques, fréquence estimée des configurations (en France)
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 progressive en surface d'une cheminée consécutivement à un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation...).	L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds, que ce soit des galeries isolées ou des zones exploitées sur des emprises plus importantes (tailles, chambres et piliers...). 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 ne sont plus susceptibles de provoquer ce phénomène en surface. Très fréquent
L'effondrement par rupture de pilier(s) isolé(s)	Au sein d'une exploitation partielle 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 l'épaisseur et la raideur du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes. On parle alors de rupture de pilier(s) isolé(s) .	L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds (de l'ordre de 50 m), exploités par chambres et piliers et sous conditions particulières. Peu fréquent compte tenu des configurations particulières requises
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 auxquels il est raccordé, avec pour conséquence la formation en surface d'un cratère présentant les mêmes dimensions que la colonne du puits. Ce déboufrage peut s'accompagner, ou être suivi, d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains peu cohésifs environnants, comme le sont généralement les terrains superficiels. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent des caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et mécaniques locales des terrains. Le mécanisme de rupture du revêtement de puits peut être occasionné pour un puits non remblayé et mal obturé.	Déboufrage : fréquent sur les puits très anciens, et en particulier pendant la période d'ennoyage Effondrement de tête de puits : dépend de la nature du revêtement, des éventuels ouvrages de sécurité : peu fréquent
La rupture d'une tête de filon	L'exploitation d'un filon à proximité de la surface peut engendrer la rupture de la tête de filon. Cette rupture peut se développer par cisaillement le long des interfaces filon-épontes (on parle alors de rupture du pilier couronne) ou par cisaillement subvertical de l'éponte 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. Assez fréquent
Déboufrage 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 déboufrage 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 déboufrage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement peut induire un effondrement en surface dont la forme et les dimensions dépendent directement des conditions d'exploitation.	Peu fréquent
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 des vapeurs ou des gaz émis.	Peu fréquent
Dissolution	Le mécanisme de dissolution peut générer la formation d'effondrements localisés dans des dépôts ou vides souterrains peu profonds liés à l'exploitation d'évaporites (sel, potasse).	Peu fréquent

4.2.2.2. Qualification de la prédisposition

L'évaluation de la prédisposition d'un site à l'apparition d'un effondrement localisé dépend de trois classes de paramètres :

- la présence de phénomènes analogues sur le site ou dans des configurations (géologie, conditions d'exploitation...) identiques ou proches ;
- des paramètres liés à la prédisposition à la rupture de l'ouvrage souterrain : il s'agit principalement de la largeur de la galerie ou de la chambre et de la nature des premiers bancs du toit (épaisseur, résistance, fracturation) ;

- des paramètres liés à la prédisposition à la remontée de l'instabilité jusqu'en surface : on retrouve ici la nature et l'épaisseur des bancs du recouvrement qui détermineront le coefficient de foisonnement ou la formation d'une voûte stable.

À ces paramètres peuvent s'ajouter un certain nombre de facteurs aggravants ou déclenchant comme l'**hygrométrie** et l'**altération du milieu**, le **fluage** et l'**influence du temps**, la **mise en charge hydraulique**, l'**activité sismique** et les **facteurs anthropiques** (activités en surface).

Le tableau suivant identifie les classes de prédisposition à l'effondrement localisé des travaux souterrains.

Tableau 5 : effondrement localisé : caractérisation de la prédisposition

Prédisposition d'une zone à la manifestation d'un effondrement localisé	Éléments caractéristiques
Très sensible	<ul style="list-style-type: none"> • le phénomène s'est déjà produit à plusieurs reprises sur la zone concernée ; • et les conditions sont remplies pour que le phénomène se produise plusieurs fois sur la zone concernée à l'échelle de vies humaines (certitude sur l'existence de travaux, connaissance suffisante des caractéristiques permettant de démontrer la réalisation du phénomène, lithologie connue et favorable au développement du phénomène) ; • ou la zone est connue pour présenter des conditions dégradées par rapport à une situation de prédisposition « sensible » établie ; • ou la zone est connue pour présenter des facteurs aggravants pouvant favoriser le phénomène.
Sensible	<ul style="list-style-type: none"> • un phénomène similaire s'est déjà produit sur la zone concernée ou le phénomène s'est déjà produit sur un site similaire à la zone concernée ; • et les conditions pour que le phénomène se produise sur la zone concernée ne sont pas remplies avec autant de certitude que dans le cas « très sensible » (par exemple : manque de connaissance sur les dimensions des travaux dont l'existence est par ailleurs avérée, sur l'état de remblaiement, sur la lithologie).
Peu sensible	<ul style="list-style-type: none"> • l'occurrence du phénomène sur la zone concernée est peu probable mais le retour d'expérience est insuffisant pour pouvoir l'écartier complètement (cas de travaux miniers avérés mais sans aucun phénomène similaire répertorié) ; • et aucun facteur aggravant susceptible de favoriser le phénomène n'est connu.
Très peu sensible	<ul style="list-style-type: none"> • lithologie particulièrement favorable pour stopper la remontée d'un fontis (bancs résistants massifs et épais) ; • ou la présence de travaux est suspectée ou non connue avec certitude (zone proche des affleurements présentant des caractéristiques géologiques favorables à la réalisation de travaux miniers par exemple, déductions à partir d'informations...) ; • ou la présence de travaux est connue mais leur localisation est mauvaise (la surface des travaux est faible par rapport à la surface d'incertitude) ; • et l'occurrence du phénomène sur la zone concernée est peu probable mais le retour d'expérience est insuffisant pour pouvoir l'écartier complètement.

La prédisposition à l'effondrement d'un puits doit tenir compte des deux mécanismes possibles : le débouillage du remblai au sein de celui-ci, et la rupture de la tête de puits.

Le *débouillage d'un remblai de puits* est sensible aux variations prévisibles du niveau hydrogéologique

dans l'ouvrage (remontée des eaux, battements de nappe), à la présence de galeries connectées au puits et non obturées par des serrements, à l'ancienneté du remblayage et à l'existence de facteurs aggravants dans l'environnement du puits tels que les vibrations ou les surcharges. D'une manière générale,

l'hétérogénéité potentielle du remblai et le nombre de connexions au puits augmente avec la profondeur de celui-ci. En l'absence d'éléments plus précis sur les puits, notamment ceux très anciens, ce critère de profondeur est souvent pris en compte dans l'évaluation de la prédisposition.

Il convient également d'apprécier la prédisposition à l'effondrement de la structure mise en place en tête du 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 cette prédisposition à la rupture.

Le second phénomène peut être concomitant au premier. Bien que ce cas soit relativement rare, il doit être considéré.

Les critères défavorables entrant alors en ligne de compte sont 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 qui peuvent conduire à ce que le phénomène déborde largement de l'emprise stricte du puits.

4.2.3. Effondrement localisé : cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa comprend :

- une marge d'influence correspondant à l'emprise potentielle du cône d'effondrement ;
- à laquelle s'ajoute l'incertitude cartographique.

L'emprise du cône d'effondrement, c'est-à-dire le diamètre prévisible d'un fontis en surface est le résultat d'une analyse basée sur :

- le retour d'expérience disponible sur le site concerné (caractéristiques de fontis observés) ;
- la connaissance de la géométrie du vide souterrain ;
- la nature et l'épaisseur des terrains peu cohésifs de surface dans lesquels le cône d'effondrement peut avoir une pente variable selon le type de matériau.

4.3. Les affaissements progressifs

4.3.1. Le phénomène, les mécanismes, les 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 4).

Ce type de manifestation concerne aussi bien les exploitations en plateau 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'extensions (zones en traction vers l'extérieur de la cuvette).

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.

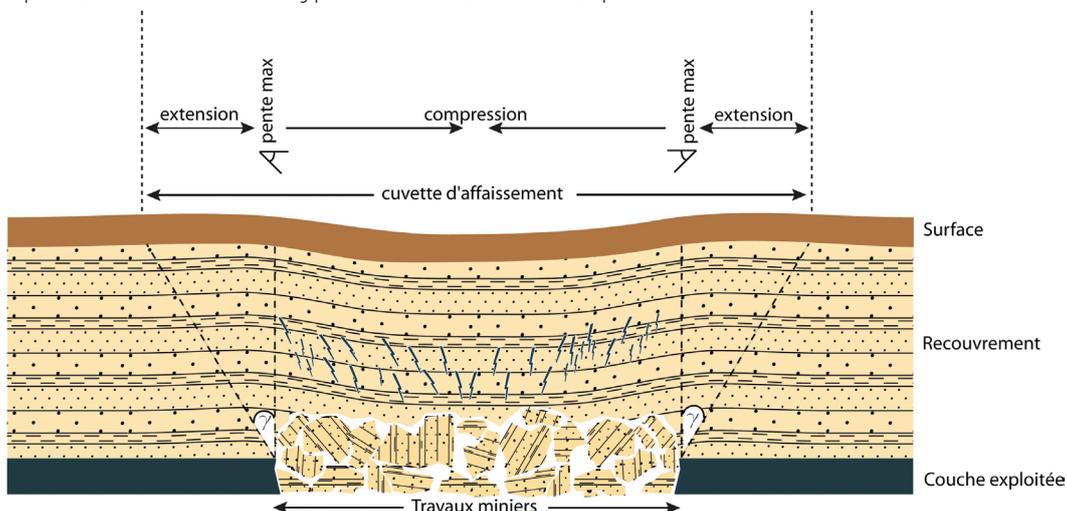


Figure 4 : principe d'une cuvette d'affaissement et de ses conséquences en surface.

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 (Figure 4). 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 plateau. L'existence d'un pendage des travaux miniers influe également directement sur les valeurs de l'angle d'influence, tout comme la présence d'accidents géologiques majeurs (failles).

Les principaux mécanismes ou scénarios initiateurs sont présentés de manière succincte dans le tableau suivant :

Tableau 6 : affaissement progressif : principaux mécanismes initiateurs

Mécanisme initiateur	Mécanismes de propagation	Principales remarques, fréquence estimée des configurations (en France)
Éboulement souterrain provoqué au sein d'exploitations dites « totales », dans des terrains stratifiés.	Éboulement provoqué des bancs du toit de l'exploitation souterraine, foisonnement des matériaux éboulés, fléchissement des terrains de recouvrement, apparition progressive d'une cuvette en surface.	La quasi-totalité de l'affaissement se produit durant l'extraction, la durée de l'affaissement résiduel se limite à quelques années. Reprises d'affaissement non exclues si modification des conditions environnementales. Très peu fréquent du fait de l'ancienneté des travaux miniers.
Éboulement souterrain au sein d'exploitations partielles en terrains stratifiés.	Rupture différée d'un ou plusieurs éléments de maintien d'un quartier souterrain étendu (piliers, intercalaires entre couches, toit, mur). Mécanismes de propagation vers la surface similaire au cas précédent.	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Assez fréquent mais configurations spécifiques (exploitations souterraines étendues).
Éboulement souterrain au sein d'exploitations filoniennes.	Plusieurs mécanismes possibles selon les méthodes d'exploitation.	Phénomène pertinent si le filon est exploité sur une grande extension, s'il possède une grande épaisseur et n'est pas trop profond. Le pendage du gisement influe également sur la pertinence de retenir cet effet (faible à nulle si le gisement est très penté) [22]. Peu fréquent
Éboulement souterrain de cavités salines. Nappes salées actives au toit du sel créées ou modifiées par une ancienne activité d'exploitation (par pompage et/ou dissolution).	Dissolution du sel au toit du sel par introduction d'eau douce non maîtrisée et se poursuivant en situation de post-exploitation. Plusieurs mécanismes possibles selon les méthodes d'exploitation.	Selon les configurations, la dissolution peut : <ul style="list-style-type: none"> • être relativement concentrée spatialement et générer des cuvettes d'affaissement marquées mais généralement peu étendues ; • ou se développer plus largement en périphérie des zones éboulées ou encore sur la totalité de la nappe salée créée. Assez fréquent

4.3.2. Affaissement progressif : qualification de l'aléa

4.3.2.1. Qualification de l'intensité

L'intensité est qualifiée par 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, l'effet de mise en pente est le principal paramètre retenu.

Les classes d'intensité qualifient les 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.

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.

Tableau 7 : affaissement progressif : classes d'intensité

Principaux facteurs d'évaluation	Classe d'intensité	Mise en pente (en %)
Ouverture des travaux miniers souterrains, méthode d'exploitation, taux de défrètement, profondeur et largeur exploitées des panneaux, nature des terrains de recouvrement, pendage des couches, topographie de surface, présence d'accidents géologiques, etc.	Très limitée	$P < 1$
	Limitée	$1 < P < 3$
	Modérée	$3 < P < 6$
	Élevée	$P > 6$



Photographie 2 : exemple d'affaissement

4.3.2.2. Qualification de la prédisposition

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.

Les autres critères d'augmentation ou de diminution de la prédisposition sont décrits ci-après :

Tableau 8 : affaissement progressif : critères de prédisposition

Contexte minier	Principaux critères de pertinence/ augmentation de la prédisposition	Principaux critères de diminution/non pertinence de la prédisposition	Commentaires
Exploitations totales par foudroyage au toit	Délai entre la date des exploitations souterraines et l'étude d'aléa de l'ordre de quelques années (cas de figure très rare).	Délai exploitation souterraine/étude d'aléa supérieure à dix ans. Cas de figure général.	Reprises de mouvement non exclues (présence d'eau/surcharges anthropiques). Voir dans ce cas aléa tassement.
Exploitations partielles menées en terrains stratifiés	<p>Lié à l'état de contraintes s'exerçant au toit et sur les piliers des exploitations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - taux de défrèvement élevé ; - profondeur exploitée élevée ; - ratio largeur exploitée/profondeur exploitée élevé ; - conditions d'exploitation des secteurs adjacents, pouvant augmenter l'état de contraintes ; - caractéristiques géométriques et de position des piliers. <p>Lié à la résistance des piliers et du toit de l'exploitation souterraine</p> <ul style="list-style-type: none"> - caractéristiques géomécaniques de la roche ; - aptitude à l'altération/au vieillissement de la roche ; - arrivée ou variation du niveau d'eau ; - failles, fracturation de la roche. 	<p>Taux de défrèvement faible.</p> <p>Ratio largeur exploitée/profondeur exploitée faible ou insuffisant.</p> <p>Profondeur exploitée insuffisante pour que la contrainte s'exerçant sur les travaux miniers soit le critère le plus pertinent.</p>	Le critère profondeur des travaux joue, en augmentant, sur l'augmentation de la prédisposition mais, <i>a contrario</i> , sur la diminution de l'intensité.
Exploitations salines par dissolution ou par mine sèche	<p>Présence ou invasion d'eau non saturée, à fort potentiel de dissolution, à proximité ou dans les cavités. Ouvrages débouchant au jour, défailants ou mal obturés et facilitant le transit des eaux.</p> <p>Perturbation de l'étanchéité des terrains par des exploitations proches.</p> <p><i>Pendage des couches au toit du sel favorisant un effet de propagation « amont pendage », accidents ou structures géologiques facilitant la migration de l'eau non saturée à potentiel de dissolution.</i></p>	<p>Cavités séparées des eaux par formation géologique étanche. Eaux saturées en sel à faible potentiel de dissolution.</p> <p>Obturation des ouvrages à long terme maîtrisée.</p> <p><i>Absence de pendage, accidents ou structures géologiques défavorables.</i></p>	Phénomène qui peut être pérenne ou qui peut s'atténuer puis disparaître avec la mise en place d'un équilibre hydrogéologique favorable.
Exploitations filoniennes	Grande épaisseur exploitée. Exploitation inclinée ou pentée mais non subverticale. Remblaiement douteux ou absent.	<p>Exploitations très pentées ou subverticales, remblayées.</p> <p>Couche de faible puissance.</p>	Critères de ratio état de contrainte/résistance similaires, sur le principe, aux exploitations stratifiées.

4.3.3. Affaissement progressif : cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa doit tenir compte de la marge d'influence d'un affaissement, qualifiant l'aire de surface pouvant être affectée par un désordre. Cette marge est souvent construite à partir de la qualification d'un *angle d'influence*. Celui-ci bénéficie des retours d'expérience des mesures effectuées lors des périodes d'exploitation et du suivi de désordres en surface. L'angle d'influence est défini par l'expert en fonction :

- du contexte minier (voir les configurations ci-avant) ;
- des conditions d'exploitation aux abords du quartier souterrain dont on qualifie l'aléa ;
- de la nature géologique du recouvrement.

4.4. Les affaissements cassants

4.4.1. Le phénomène, les mécanismes, les effets

L'affaissement cassant est un phénomène qui requiert des conditions d'exploitation et de nature du recouvrement particulières [4]. Il peut être envisagé lorsque les conditions suivantes sont réunies :

- il requiert l'existence de travaux miniers exploités de manière partielle (par chambres et piliers notamment) situés à quelques centaines de mètres de profondeur ;
- il requiert l'existence de vides résiduels importants dans ces travaux miniers (pas de remblayages ou d'effondrements au fond) ;
- le recouvrement au droit des travaux est principalement constitué de matériaux cassants.

Dans ce scénario, le toit se rompt par cisaillement le long des appuis (bord du panneau). La rupture peut dès lors se propager jusqu'en surface et permettre une descente en masse des terrains de recouvrement. La zone affaissée en surface est dès lors délimitée par un réseau de crevasses à l'aplomb de la périphérie du panneau concerné, d'où le nom retenu « d'affaissement cassant ».

C'est le développement possible de crevasses en bordure de cuvette qui justifie la distinction de l'affaissement cassant de l'affaissement progressif. Ces crevasses peuvent présenter des risques structurels pour les bâtiments situés dans leur emprise.

Une autre caractéristique de l'affaissement cassant est la cinétique du phénomène qui pourrait s'avérer beaucoup plus rapide que dans le cas d'un affaissement progressif. En effet, bien que le phénomène s'initie généralement en souterrain en place en l'espace de plusieurs jours (fracturation et écrasement des piliers, fracturation préliminaire du toit), la manifestation en surface peut se faire brutalement (rupture d'un toit fragile) et s'accompagner d'une ou de plusieurs secousses susceptibles d'ébranler les édifices les moins adaptés à ce type de sollicitations.

4.4.2. Affaissement cassant : qualification de l'aléa

4.4.2.1. Qualification de l'intensité

Compte tenu du caractère brutal du phénomène en surface et de sa dangerosité, on retient forfaitairement une intensité de niveau modéré à élevé pour l'aléa affaissement cassant.

4.4.2.2. Qualification de la prédisposition

La manifestation d'un affaissement cassant requiert des conditions très particulières évoquées au 4.4.1.

4.4.3. Affaissement cassant : cartographie de l'aléa

Comme dans le cas de l'affaissement, la cartographie de l'aléa doit tenir compte de la marge d'influence d'un affaissement cassant, qualifiant l'aire de surface pouvant être affectée par un désordre.

Dans le cas de l'affaissement cassant, la physique du phénomène et le retour d'expérience sur les événements de cette nature mettent en évidence que la rupture est généralement subverticale à l'aplomb des bords de la zone effondrée au fond. Compte tenu du rôle majeur que peuvent jouer certaines failles dans la propagation de ce type d'instabilité, on retient une valeur d'angle d'influence de 10° pour la définition de la marge d'influence.

4.5. Les crevasses

4.5.1. Le phénomène, les mécanismes, les effets

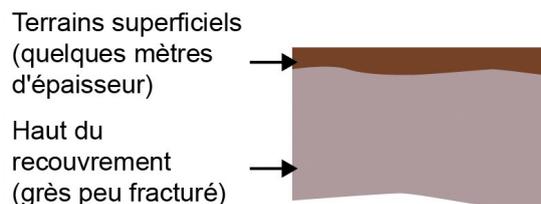
Les crevasses sont, si on les définit de manière purement géométrique, des discontinuités marquées, d'ouverture pluri-centimétrique à pluri-décimétrique, d'extension pouvant aller de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres, et de profondeur variable pouvant atteindre plusieurs mètres.

Plusieurs typologies de phénomènes peuvent être à l'origine de leur formation, évoquées dans le présent guide : les affaissements, les affaissements cassants et les effondrements généralisés.

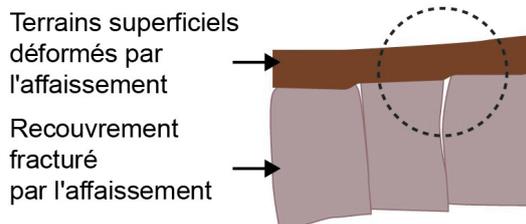
Nous en établissons toutefois un chapitre particulier parce que l'apparition et la découverte en surface de ces crevasses, dans des conditions particulières, peut se produire de nombreuses années voire plusieurs dizaines d'années après leur formation (Figure 5, voir p. 26).

Les crevasses provoquées par les effets des dépilages sont souvent découvertes à l'occasion de travaux anthropiques de surface (terrassements de voiries, infrastructures ou bâtiments). Plus rarement, elles peuvent apparaître en surface lors d'épisodes climatiques particuliers (pluviométrie importante, épisodes de gel-dégel) ou lorsque les activités anthropiques génèrent des flux d'eau importants (fuites de réseaux). Dans ces deux derniers cas, le mécanisme prépondérant est la mobilisation par les écoulements des matériaux fins au droit ou au sein de la crevasse qui migrent au fond de celle-ci, entraînant par débouillage les terrains meubles sus-jacents. Le phénomène est généralement brutal, voire quasi-instantané.

A - Etat initial avant l'exploitation minière



B- Affaissement minier et création des fractures du recouvrement



C - Erosion des terrains superficiels et apparition de la crevasse en surface

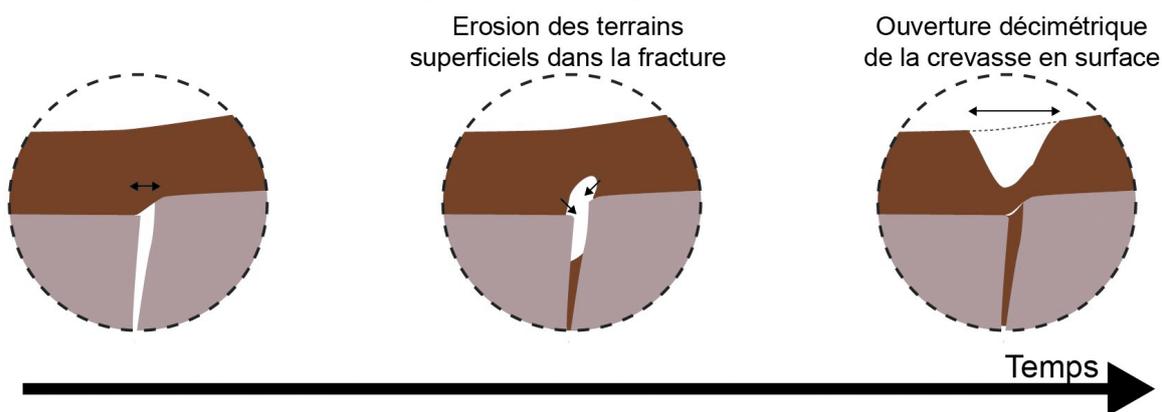


Figure 5 : illustration des mécanismes à l'origine des crevasses dans le recouvrement et de leur apparition en surface après évolution dans les terrains superficiels (d'après J. P. Piguet et O. Deck, 2014)

Sur le territoire français, il existe deux secteurs qui regroupent la majorité, voire l'exclusivité, des désordres de type crevasse dans ces conditions particulières de manifestation en surface différée, longtemps après l'exploitation minière. Ces secteurs sont le bassin houiller lorrain et le bassin ferrifère lorrain.

Même si les typologies de ces deux bassins miniers sont très différentes, on retrouve deux critères communs propices à la *formation* des crevasses, qui peuvent être extrapolés le cas échéant à d'autres configurations minières : l'existence de quartiers qui se sont effondrés et ont conduit à l'affaissement des terrains de recouvrement, d'une part, et la nature géomécanique rigide et cassante de ces derniers, d'autre part.

Lorsqu'un affaissement se produit, les terrains de recouvrement subissent des déplacements verticaux et horizontaux. Les terrains constitués de roches rigides et cassantes, sans discontinuités initiales importantes, ont tendance à donner lieu à des fractures et peuvent donc générer *a posteriori* des crevasses à la surface.

Le critère principal d'*apparition* différée en surface est la présence de terrains superficiels meubles pouvant être remobilisés par l'érosion, les phénomènes climatiques particuliers ou exceptionnels, ou encore les activités anthropiques.

4.5.2. Crevasses : qualification de l'aléa

4.5.2.1. Qualification de l'intensité

Même si ces désordres sont marqués par une forte anisotropie (grande longueur), qui peut constituer un

facteur aggravant si des fondations de bâtiments ou infrastructures sont construites dans cette direction de la longueur de la crevasse et au droit de celle-ci, on peut considérer que l'**extension - ou la largeur** - de ces crevasses qualifie en premier lieu l'intensité du phénomène en surface (en incluant la marge d'influence).

La profondeur réelle d'une crevasse est un critère difficile à évaluer dans la mesure où cette discontinuité est remplie de matériaux meubles pouvant en masquer le fond. Cela ne constitue pas un facteur discriminant pour l'évaluation de l'intensité.

Les retours d'expérience des crevasses observées sur le territoire français indiquent une largeur moyenne de l'ordre de 20 cm (bassin houiller lorrain) à 50 cm environ (bassin ferrifère lorrain, cette valeur étant à tempérer par le nombre bien plus faible de cas d'observation [26]). Dans des conditions particulières de terrains pentés, en contexte de coteau, cette largeur peut être plus importante, du fait de l'érosion des rebords au sein de la pente élargissant la discontinuité. Celle-ci ne dépasse toutefois généralement pas le mètre de largeur. Le cas le plus défavorable recensé en France est une arrivée d'eau engendrant une vidange brutale des matériaux et provoquant un ravinement des terrains de surface : le désordre généré avait une largeur de 2 m.

Les retours d'expérience des désordres sur les bassins affectés montrent qu'ils n'ont conduit qu'à l'apparition de fissures sur les bâtiments, sans que l'intégrité de ceux-ci ne soit affectée. Les crevasses peuvent

toutefois occasionner des ruptures au sein de conduits et réseaux souterrains.

Dans ces conditions décrites d'apparition très postérieure aux travaux d'exploitation, le mouvement minier engendrant une mise en pente des terrains de surface s'est produit et stabilisé. Il se produit alors ces mécanismes de migration brutale des matériaux meubles entre les rebords de la crevasse. Aussi peut-on considérer d'une manière générale que d'un rebord à l'autre il n'existe pas de mouvement vertical différentiel significatif.

Ces considérations conduisent à évaluer l'intensité selon le Tableau 9. 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.

Tableau 9 : crevasses : classes d'intensité

Classe d'intensité	Largeur de la crevasse en surface
Très limitée	$l < 0,5 \text{ m}$
Limitée	$0,5 \text{ m} < l < 5 \text{ m}$

4.5.2.2. Qualification de la prédisposition

La prédisposition au phénomène de crevasse est de prime abord liée à la présence en profondeur de quartiers d'exploitation effondrés ayant conduit à un affaissement du recouvrement, au caractère rigide et cassant des roches qui constituent ce dernier, et à la présence de terrains superficiels meubles conduisant à différer l'apparition en surface.

Une étude récente établie par GEODERIS sur le bassin houiller lorrain [3] indique que la valeur de la déformation maximale de la ou des cuvettes d'affaissement au droit des quartiers souterrains plats ou peu pentés effondrés peut être considérée comme un paramètre majeur permettant d'évaluer la prédisposition. Plus cette valeur est élevée, plus les mises en pente et contraintes de traction générées dans les terrains de recouvrement sont importantes, induisant ainsi l'apparition de fractures dans les terrains rigides et cassants.

La prédisposition au droit de zones d'exploitation en dressants, contexte où de nombreuses crevasses ont été relevées dans le bassin houiller, est assujettie à la hauteur et la densité des travaux d'exploitation.

Le tableau 10 regroupe les facteurs aggravants, ou au contraire limitants, voire d'exclusion, relatifs à cette prédisposition.

Tableau 10 : crevasses : facteurs aggravants, limitants voire d'exclusion de la prédisposition

Facteurs aggravants	<p>La <i>méthode d'exploitation</i> par foudroyage a une influence aggravante sur la prédisposition des crevasses, par rapport à une exploitation par chambres et piliers.</p> <p>La présence et l'orientation de <i>failles ou discontinuités géologiques majeures</i> a pu faciliter les cassures et le développement de crevasses vers la surface.</p>
Facteurs limitants voire d'exclusion	<p>La présence, au-dessus du recouvrement rigide, de <i>formations meubles sur une épaisseur suffisamment importante</i>, conduit à ce que les fractures ne puissent atteindre la surface et générer des crevasses.</p> <p>Les affaissements au droit de quartiers exploités et effondrés d'<i>extension faible</i> conduisent à des valeurs de déformation négligeables à nulles en surface.</p> <p>La <i>position d'une zone de surface par rapport à l'affaissement souterrain</i> est un critère important : le centre d'une cuvette d'affaissement correctement délimitée est une zone où la déformation des terrains s'est opérée uniquement en compression. En conséquence, la formation de fractures et l'apparition de crevasses n'est pas possible.</p> <p>Lorsqu'une même zone de surface a été affectée par plusieurs affaissements (exploitation successive ou différée de panneaux situés à des profondeurs différentes), la délimitation de zones de compression ou de traction est beaucoup plus délicate et nécessite des expertises particulières. Cela peut constituer toutefois un facteur limitant voire d'exclusion lorsqu'une zone initialement affectée par des mouvements de traction est soumise postérieurement à des mouvements de compression : les fractures initialement générées se referment alors.</p>

4.5.3. Crevasses : cartographie de l'aléa

Dans le cas où un seul panneau minier s'est effondré, la position des crevasses potentielles s'établit dans la zone de déformation en extension de l'affaissement, qui figure en jaune sur la Figure 6. Lorsque plusieurs affaissements se sont superposés, la cartographie est plus complexe et nécessite une expertise appropriée.

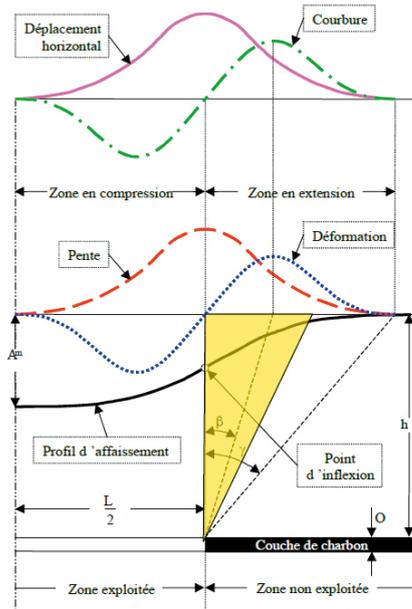


Figure 6 : profils de déformation et de mise en pente d'une cuvette d'affaissement par rapport à un panneau exploité unitaire. La zone en jaune est la zone de crevasses potentielle (avec O : ouverture de la couche de charbon, h : la profondeur de la couche exploitée, A_m : amplitude maximale de l'affaissement produit en surface, L : largeur de la zone exploitée, β : angle de déformation maximale, γ : angle d'influence)

4.6. Les effondrements généralisés

4.6.1. Le phénomène, les mécanismes, les 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 dans le cas de l'effondrement d'une cavité de dissolution saline. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, subverticales, délimitant des « marches d'escalier » dont les conséquences peuvent, elles aussi, s'avérer très dommageables pour les personnes et les biens situés en surface.

Ce sont des phénomènes rares dont les conséquences sont néanmoins potentiellement graves car ils génèrent une quantité considérable d'énergie. Ils peuvent ainsi s'accompagner de secousses sismiques et d'effets de souffle susceptibles de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts.

Les principaux mécanismes ou scénarios initiateurs sont présentés de manière succincte dans le tableau suivant :

Tableau 11 : effondrement généralisé : principaux mécanismes initiateurs

Mécanisme initiateur	Configurations sensibles Mécanismes de propagation	Principales remarques, fréquence estimée des configurations (en France)
Effondrement brutal de piliers abandonnés résultant d'une rupture du toit	<i>Quartier minier souterrain présentant un taux de défruitement élevé, des volumes de vides importants, des piliers sous-dimensionnés ou des exploitations multi-niveaux.</i> Recouvrement constitué d'un (ou des) horizon(s) raide(s) atteignant la limite élastique et se rompant brutalement. Surcharge soudaine sur les piliers qui rompent de manière simultanée. Descente du recouvrement brutale (quelques secondes).	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est très peu fréquent .
Rupture en chaîne des piliers	<i>Piliers d'un quartier souterrain ayant atteint l'état-limite de stabilité, affectés par la modification ou le développement d'un facteur déclenchant.</i> Rupture de proche en proche des piliers. Le recouvrement s'effondre en suivant le front d'éboulement souterrain. Phénomène moins brutal que le précédent (quelques minutes à quelques heures) mais reste potentiellement dangereux.	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est peu fréquent .
Effondrement de cavités salines de dissolution	Rupture différée du toit de cavités salines. Cette rupture peut être due à une dissolution complémentaire conduisant à l'évolution de la taille des cavités jusqu'à la valeur limite de rupture de l'ouvrage. Une évolution significative de la charge hydraulique dans la cavité peut également conduire à la rupture du toit. Rupture généralement brutale du toit de la cavité, la cinétique du mouvement étant conditionnée par l'évacuation de la saumure et la présence de vide dans la cavité.	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est très peu fréquent .

4.6.2. Effondrement généralisé : qualification de l'aléa

4.6.2.1. 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 défrêtement des chantiers), peut mettre en péril la sécurité des personnes et des biens situés dans l'emprise de l'instabilité.



Photographie 3 : conséquences en surface d'un effondrement généralisé

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 élevée, du fait également de l'absence de parades permettant de s'affranchir des conséquences prévisibles d'un tel phénomène en surface.

Tableau 12 : effondrement généralisé : classe d'intensité

Classe d'intensité	Description
Élevée	Effondrement en masse de la surface

4.6.2.2. Qualification de la prédisposition

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.

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.

Tableau 13 : effondrement généralisé : critères de prédisposition

Contexte minier	Principaux critères de pertinence/ augmentation de la prédisposition	Principaux critères de diminution/non pertinence de la prédisposition
Exploitations partielles menées en terrains stratifiés	<p>Liés aux conditions souterraines</p> <ul style="list-style-type: none"> - contraintes élevées s'exerçant au sein des piliers (liées au taux de défruitement, à la profondeur des travaux et aux conditions d'exploitation des secteurs proches) ; - configuration d'exploitation favorable à la rupture (piliers de fort élancement, matériaux fragiles, mauvaises superpositions des piliers...) ; - présence de piliers sous-dimensionnés en grand nombre ; - l'absence de « piliers barrières » susceptibles de bloquer la propagation d'un front d'effondrement ; - autres facteurs tels que la sensibilité des matériaux à l'eau, le comportement du mur (risque de poinçonnement, la présence de failles...) ; - pour les mines de sel exploitées par chambres et piliers, présence d'aquifères ou toute masse d'eau libre importante (canaux, rivières, lacs...) susceptibles de se déverser dans les anciens travaux et fragiliser les piliers (par dissolution possible des piliers et/ ou fragilisation du mur de la mine). <p>Lié à la possibilité d'une rupture brutale du recouvrement</p> <ul style="list-style-type: none"> - extension latérale d'exploitation suffisante au regard de l'épaisseur de recouvrement ; - présence d'un (ou de) banc(s) raide(s) au sein du recouvrement susceptible de se rompre de manière brutale. 	<p>Taux de défruitement faible.</p> <p>Ratio largeur exploitée/ profondeur exploitée faible ou insuffisant.</p> <p>Piliers correctement ou sur dimensionnés.</p> <p>Profondeur exploitée insuffisante pour que la contrainte s'exerce sur les travaux miniers soit le critère le plus pertinent.</p> <p>Absence de banc(s) raide(s) dans le recouvrement, privilégiant une typologie de phénomène « affaissement ».</p>
Cavités salines	<p>Grandes dimensions horizontales et faible profondeur de la cavité.</p> <p>Planche de sel au toit de la cavité peu 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.</p> <p>Présence d'un banc raide au sein du recouvrement qui permet, par résistance à la traction, le développement de cavités de grande extension et conduit à un effondrement en surface de caractère brutal.</p> <p>Existence d'une possible circulation d'eau non saturée contribuant à dissoudre du sel et augmenter, par-là même, la dimension des cavités.</p> <p>Incertitude sur les dimensions exactes de la cavité (travaux très anciens mal connus, mise en communication de cavités entre-elles).</p>	<p>Faibles dimensions horizontales de la cavité.</p> <p>Planche de sel au toit suffisamment épaisse participant à la stabilité de l'édifice.</p> <p>Absence de recouvrement raide privilégiant une typologie de phénomène « affaissement ».</p> <p>Cavités séparées des eaux par une formation géologique étanche, eaux saturées en sel à faible potentiel de dissolution.</p>

4.6.3. Effondrement généralisé : cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa doit tenir compte de la marge d'influence d'un effondrement généralisé, qualifiant l'aire de surface pouvant être affectée par un désordre. Cette marge d'influence est d'une manière générale plus limitée que dans le cadre de l'affaissement. Dans les configurations de rupture brutale d'un banc raide au toit ou dans le recouvrement du quartier souterrain,

ou d'une cavité saline, l'emprise de l'effondrement en surface peut s'approcher de l'aire des vides souterrains potentiellement instables. Toutefois, du fait de l'intensité élevée attendue, de l'incertitude de position des travaux miniers, et, par ailleurs, de la présence de matériaux meubles en surface pouvant augmenter l'emprise de l'effondrement, même postérieurement à l'évènement (ces matériaux atteignant un « profil d'équilibre »), une marge de sécurité est généralement considérée.

4.7. Les tassements

4.7.1. Les phénomènes, les mécanismes, les effets

Le terme de tassement regroupe dans le cas présent des phénomènes distincts liés au réarrangement des terrains de surface, du fait de la présence de travaux miniers souterrains, d'ouvrages de dépôt, de découvertes ou ouvrages miniers remblayés, ou encore du fait de perturbations hydrogéologiques liées à l'ancienne activité minière.

Les conséquences redoutées sont limitées, sans préjudice pour les vies humaines. Elles résultent principalement du fait que les terrains de surface peuvent être affectés par des tassements différentiels qui sont susceptibles d'engendrer des effets sur les bâtiments et les infrastructures.

Les principaux mécanismes ou scénarios initiateurs sont présentés de manière succincte dans le tableau suivant :

Tableau 14 : tassements : principaux mécanismes initiateurs

Mécanisme	Configurations sensibles	Principales remarques, fréquence estimée des configurations (en France)
Réarrangement des terrains au droit d'anciennes zones minières effondrées, mal dépilées ou mal remblayées	<p>Les terrains au droit de travaux souterrains exploités à l'aide d'une méthode induisant le foudroyage du toit (exploitation par taille ou par piliers dépilés) peuvent être sujets 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).</p> <p>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.</p> <p>Par ailleurs, les plus anciens de ces travaux, du fait d'une configuration d'exploitation moins régulière, voire anarchique, peuvent être moins bien foudroyés ou remblayés et présenter des vides souterrains résiduels. Si ces derniers sont de volume et d'extension limités, la rupture au sein de ces travaux peut engendrer des tassements (dénommés également dans ce cas « mouvements résiduels ») dont l'amplitude peut être importante, d'ordre décimétrique.</p>	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est peu fréquent .
Tassement par compaction/consolidation de matériaux meubles	Ces mécanismes concernent les ouvrages de dépôts, ainsi que les sites de découvertes et autres ouvrages miniers 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 termes de nature des matériaux que 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 se consolider et subir une compaction parfois importante, susceptible d'engendrer la formation d'une dépression en surface.	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux, notamment sous l'effet de perturbations extérieures. Les configurations requises font que ce phénomène est fréquent .
Compaction secondaire des terrains	De caractère exceptionnel, ce mécanisme consiste en la modification du régime hydrogéologique résultant de l'arrêt des travaux miniers, induisant des remontées et/ou battements de la nappe au sein de terrains sensibles à un phénomène de compaction secondaire (argiles très plastiques, tourbes par exemple) ou de remobilisation et de migration (sables fins).	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est très peu fréquent .
Soulèvement des terrains	<p>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.</p> <p>Ce phénomène se manifeste par une remontée et non un abaissement des terrains de surface. Le mécanisme initiateur est toutefois sensiblement le même que celui à l'origine des tassements. 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.</p>	Le phénomène peut être initié plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Les configurations requises font que ce phénomène est très peu fréquent .

4.7.2. Tassement : qualification de l'aléa

4.7.2.1. Qualification de l'intensité

Les nuisances initiées par les phénomènes de tassement résultent du développement de tassements différentiels (différents en amplitude d'un point à l'autre d'une fondation de bâtiment, infrastructure...). C'est principalement l'amplitude verticale de ces mouvements différentiels qui régit l'intensité du phénomène, mais comme il est difficile d'évaluer cette amplitude, on se réfère généralement à celle du tassement maximal possible en un point donné.

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).

Tableau 15 : tassement : classes d'intensité

Classe d'intensité	Amplitude prévisible
Très limitée	Amplitude d'ordre centimétrique
Limitée	Amplitude d'ordre décimétrique

4.7.2.2. Qualification de la prédisposition

Quel que soit le contexte d'exploitation, deux critères 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 ;
- la présence d'ouvrages de dépôts, d'anciennes découvertes et autres ouvrages miniers remblayés, et ce même si peu d'indices ont été observés sur le terrain. Les matériaux constitutifs, en général meubles, sont en effet susceptibles d'être remobilisés sous l'effet de surcharges et perturbations externes.

Dans le cas des *ouvrages de dépôt*, la prédisposition peut être augmentée si :

- le dépôt possède une épaisseur importante ;
- s'il est constitué de matériaux aptes à se consolider ou être compactés (les argiles ou matériaux constitués de fractions très fines sont ainsi plus sensibles que des sables, graviers ou graves). On notera que les sables fins peuvent être mis en suspension et migrer lorsqu'il y a un afflux important d'eau ;
- la méthode de mise en place du dépôt a consisté en un simple déversement, sans compactage spécifique, qui engendre des dépôts dont le taux de vide est plus important, et ainsi davantage aptes à se réarranger.

Pour ce qui concerne les terrains situés au droit d'*anciennes exploitations menées par foudroyage du toit*, ou encore

d'*anciens dépilages mal foudroyés*, la profondeur de ceux-ci constitue le facteur principal de prédisposition au tassement. On peut considérer que, hormis pour des configurations spécifiques (importante épaisseur exploitée par exemple), des travaux situés à plus de 50 mètres de profondeur ne peuvent pas générer de tassements perceptibles en surface.

Le mécanisme de *compaction secondaire* est rare et exige la conjugaison de deux facteurs : d'une part une modification marquée des conditions hydrogéologiques du fait de l'exploitation minière (remontée ou battement de nappe), d'autre part la présence de terrains sensibles au phénomène de compaction ou de remobilisation (tourbe, argiles plastiques, sables fins dans le cas de la remobilisation).

4.7.3. Tassement : cartographie de l'aléa

La cartographie est variable selon le cas de figure :

- limitée à l'ouvrage de dépôt, la découverte ou l'ouvrage remblayé ;
- correspondant à l'emprise des travaux miniers foudroyés ou mal dépilés pouvant être assortie d'un angle d'influence tel que décrit dans le chapitre relatif aux affaissements ;
- limitée aux zones de terrains sensibles à la compaction secondaire.

4.8. Les mouvements de pente de matériaux meubles : glissements, mouvements superficiels, coulées

4.8.1. Les phénomènes, les mécanismes, les effets

Les instabilités de pente constituent le type de désordres le plus couramment observé sur les ouvrages de dépôts ou versants, édifiés ou creusés avec ou dans des matériaux meubles (roche très altérée, sol, remblai anthropique, résidus). Ces instabilités regroupent en réalité des phénomènes distincts, dont les principaux sont : les glissements, les mouvements superficiels et les coulées.

Les **glissements** 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 parfois complexe).

Les volumes concernés dépendent de la profondeur de la zone de rupture. Ainsi on évoque le terme de **glissement profond** lorsque la surface de rupture se trouve à quelques dizaines de mètres de profondeur, et de **glissement superficiel** lorsque cette surface est sise à quelques mètres de profondeur.

Les conséquences d'un glissement profond peuvent s'avérer importantes, celui-ci pouvant se répandre vers l'aval de la pente sous forme de cône d'épandage et être à l'origine de la dégradation des éventuels bâtis et ouvrages. Il peut également affecter des éventuelles constructions et infrastructures sises en bordure sommitale de la pente, à proximité de la zone de départ (dénommée également « niche

d'arrachement ») du glissement. Ainsi peut-on considérer que les glissements profonds ne peuvent affecter que des versants meubles, dépôts ou terrils de hauteur conséquente (plusieurs dizaines de mètres), ce qui limite le nombre de cas pouvant être concernés.



Photographie 4 : glissement profond du terril Mieg, bassin minier de Pechelbronn, Alsace

Les conséquences d'un glissement superficiel sont en revanche beaucoup plus limitées, ne concernant que la pente elle-même ou ses proches abords amont et aval. Ce phénomène est beaucoup plus fréquent en raison du très grand nombre de cas de pentes et versants miniers de hauteur limitée.

On regroupe dans le terme de **mouvements superficiels** des phénomènes qui ne sont pas associés à l'existence d'une surface de rupture bien définie : ce peut-être des reptations de sols ou matériaux par modification de leur comportement mécanique en présence d'eau, ou encore du ravinement d'une pente par l'eau.

Les **coulées** sont des mouvements où le matériau de la pente est totalement déstructuré et remobilisé du fait d'une forte présence d'eau. Il se transforme alors en un fluide visqueux qui s'écoule à une vitesse élevée (généralement entre 1 m/s et 7 m/s). Cet écoulement possède souvent un front, généralement raide, composé de blocs de matériaux et de débris divers. Dans le domaine des risques naturels en montagne

on emploie souvent le terme de lave torrentielle correspondant au même mécanisme mais impliquant des surfaces beaucoup plus importantes.

Les coulées constituent les désordres les plus dangereux susceptibles d'affecter les personnes et les biens situés dans l'environnement d'une pente. Elles sont toutefois très rares, liées à un apport d'eau (pluviométrie, ou d'origine anthropique) anormal ou exceptionnel.

4.8.2. Mouvements de pente de matériaux meubles : qualification de l'aléa

4.8.2.1. Qualification de l'intensité

Le paramètre principal pour l'évaluation de l'intensité est le volume de matériau mis en mouvement. Parmi les principaux facteurs susceptibles de jouer sur ce volume, on citera : la nature et la granulométrie des matériaux constituant la pente, sa hauteur, son pendage et sa morphologie, l'intensité des ruissellements prévisibles, l'existence ou non de mesures d'aménagement (couverture, engazonnement...).

Dans le cas spécifique de la *coulée*, qui est un désordre de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents dans sa trajectoire, il n'est pas aisé d'identifier une grandeur caractéristique permettant de discriminer ses conséquences. Il est donc retenu la hauteur de flux du fluide visqueux, la cinétique du phénomène étant élevée et non discriminante.

D'autres facteurs influent sur les caractéristiques 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 16 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.

Tableau 16 : mouvements de pente de matériaux meubles : classes d'intensité

Classe d'intensité	Description	Paramètre et valeur seuil
Très limitée	Reptations, ravinements	Volume de quelques m ³
Limitée	Glissements superficiels, ravinements importants	Volume de 10 à 100 m ³
Modérée	Glissements profonds	Volume de 100 à 5000 m ³
	Coulée capable de dégrader certains bâtiments et de mettre en danger la circulation	Hauteur de flux < 50 cm
Élevée	Glissements profonds majeurs	Volume > 5 000 m ³
	Coulée dévastatrice pour les personnes et les biens	Hauteur de flux > 50 cm

4.8.2.2. Qualification de la prédisposition

Les facteurs qui contribuent à augmenter la prédisposition d'une pente sont les suivants :

- l'existence d'indices d'anciens mouvements, encore visibles sur le terrain ou décrits dans les archives, dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines ;
- la présence de signes traduisant l'activité des mouvements déjà initiés (fissures de décompression, bourrelets en pied, arbres penchés, rigoles, ravines...) ;
- 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 topographie, le pendage et la morphologie de la pente ;
- la nature, la topographie et les conditions hydrogéologiques des terrains d'assise des dépôts (terrains plastiques) ;
- l'éventuelle modification, d'origine naturelle ou anthropique, des conditions hydrauliques locales (affaiblissement de la butée de pied en cas de crues sévères d'un cours d'eau en pied d'une pente, altération du dispositif de drainage ou d'aménagement des écoulements, création de bassins de décantation, rupture de canalisation, drains bouchés, canaux de ruissellement remplis par des éboulis...) ;
- 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...) ;
- la présence d'anciens travaux miniers souterrains au droit de la pente, susceptible de se rompre et d'engendrer la déstabilisation de celle-ci.

L'existence de réaménagements ou de parades (couverture, végétalisation, soutènements, reprofiliages de pentes...) peut en revanche diminuer la prédisposition.

4.8.3. Mouvements de pente de matériaux meubles : cartographie de l'aléa

La cartographie de cet aléa doit tenir compte, non seulement de la pente, mais également des zones sommitales ou en aval pouvant être impliquées dans le phénomène. C'est notamment le cas des glissements profonds où la niche d'arrachement peut se trouver au sein de la partie sommitale, et où la zone d'épandage s'inscrit en partie aval du talus. Lorsqu'il n'est pas observé sur le terrain de glissements actifs, il est courant de considérer, par retour d'expérience, et en fonction de la morphologie de la pente et de la nature des matériaux constitutifs, des valeurs fraction de la hauteur de la pente H , que ce soit pour l'aval ou,

de manière plus limitée, de l'amont de celle-ci. Ainsi retrouve-t-on fréquemment les valeurs de $H/2$, $H/3$, selon le cas considéré : l'aire cartographiée déborde donc la zone pentée.

La zone d'épandage en aval est beaucoup plus étendue dans le cas d'une coulée, et est tributaire principalement de la morphologie de la surface en pied de la pente. Selon qu'on soit en présence d'une aire plane, ou *a contrario* d'un thalweg pouvant canaliser la coulée, la limiter latéralement mais la propager longitudinalement, l'aire cartographiée sera très différente. L'observation de terrain et une topographie précise du pied de la pente sont des requis importants pour une cartographie pertinente de l'aléa dans ce cas.

4.9. Les mouvements de pentes rocheuses : éboulements, chutes de blocs

4.9.1. Le phénomène, les mécanismes, les effets

Les mouvements de pentes constituées dans des roches (principalement les flancs d'anciennes mines à ciel ouvert) sont la mobilisation de masses, plus ou moins volumineuses, se détachant de la paroi et se propageant au pied du front.

Les sollicitations géologiques et liées à l'exploitation minière que ces pentes ont subies se traduisent par des plans de fragilité et de rupture qui s'ajoutent aux discontinuités existantes. Ces plans d'origines diverses contribuent à découper le massif rocheux en blocs et volumes dont la géométrie peut être variable.



Photographie 5 : front rocheux disloqué en blocs, bassin minier de Villeveyrac

Les fronts rocheux sont soumis à la gravité et aux actions naturelles et climatiques (pluie, variation de température, alternance de gel et dégel, vent...) qui agissent sur la roche et ses discontinuités, conduisant à une évolution lente du massif rocheux. De plus, ces mécanismes naturels de démantèlement peuvent être déclenchés ou amplifiés par :

- la végétation (action des racines dans les plans de fragilité de la roche, action du vent sur la déstabilisation ou le mouvement des arbres...) ;

- les activités humaines (terrassements, extractions de matériaux) ;
- les secousses sismiques.

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'éboulements (10 m^3 à 10^4 m^3), voire d'éboulements majeurs ($> 10^4 \text{ m}^3$).

Quel que soit le volume mobilisé, la chute de masses rocheuses présente un danger pour les personnes se situant au sein de la zone d'épandage. À 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 de la zone rocheuse mobilisée du fait de sa propagation. Cette dernière dépend du volume potentiellement instable et 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.

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...).

4.9.2. Mouvements de pentes rocheuses : qualification de l'aléa

Dans le cadre de la prévention des risques naturels, la caractérisation de l'aléa de mouvements de pentes rocheuses se décompose généralement en deux mécanismes qui suivent les phases d'évolution du mouvement rocheux :

- la déstabilisation et la mobilisation initiale des matériaux (aléa de rupture) ;
- le mouvement des masses suivant une certaine trajectoire, jusqu'à leur arrêt (aléa de propagation).

La combinaison de ces deux mécanismes aboutit à un « aléa résultant ».

Dans le cas des fronts rocheux d'origine minière qui concernent le présent guide, la qualification a été volontairement simplifiée. Les raisons en sont que les fronts ont généralement une hauteur relativement limitée par comparaison aux versants naturels. Les cas d'anciennes mines à ciel ouvert profondes existent mais leur morphologie généralement circulaire et circonscrite conduit à limiter l'aléa de propagation au fond de la fosse.

4.9.2.1. Qualification de l'intensité

C'est le volume de matériau mis en mouvement qui est retenu pour discriminer les classes d'intensité. Suivant le volume de matériau éboulé, 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.

Tableau 17 : mouvements de pentes rocheuses : classes d'intensité

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

4.9.2.2. Qualification de la prédisposition

Les facteurs qui contribuent à augmenter la prédisposition d'une pente rocheuse à la rupture sont les suivants :

- l'existence d'indices d'anciens mouvements, encore visibles sur le terrain ou décrits dans les archives, dans un secteur proche présentant des caractéristiques géologiques et d'exploitation voisines ;
- la présence de signes traduisant une activité récente de mouvement (blocs tombés au sol, éboulements, cassures fraîches sur les fronts...) ;
- la géométrie des fronts : plus celle-ci est importante et la pente prononcée et plus le front pourra être marqué par des discontinuités préjudiciables à la stabilité ;
- le réseau de discontinuités affectant le massif est un facteur primordial. Ces discontinuités peuvent être des joints de stratification, des failles, fractures ou diaclases, ou encore des contacts entre le massif et les terrains superficiels. Ces discontinuités découpent les masses rocheuses et facilitent leur rupture. Différentes typologies existent, dont les plus fréquentes sont : glissement plan, glissement dièdre (selon une ligne intersectrice de deux plans de fracturation), basculement, détachement... ;
- de nombreux facteurs extérieurs peuvent 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.

4.9.3. Mouvements de pentes rocheuses : cartographie de l'aléa

Comme pour les talus constitués dans des matériaux meubles, la cartographie doit tenir compte, non seulement de la pente, mais également des zones sommitales ou en aval pouvant être impliquées dans le phénomène.

La zone sommitale peut en effet être concernée par des éboulements, *a fortiori* par des éboulements majeurs, l'aléa pouvant être déclenché au sein de discontinuités débouchant dans le front mais se prolongeant bien en amont au sein du rebord supérieur de celui-ci.

La zone aval est concernée par la propagation de la chute de blocs ou de l'éboulement : la phase informative (analyse d'anciennes instabilités) et le

relevé sur le terrain de la distance au front de blocs tombés ou éboulements sont des éléments de justification précieux. Lorsqu'il n'est pas observé sur le terrain de zones d'éboulement actives, il est courant de considérer, par retour d'expérience, et en fonction de la morphologie de la pente, de la nature des matériaux constitutifs, et de la densité de discontinuités, des valeurs fraction de la hauteur de la pente H . Ainsi retrouve-t-on fréquemment les valeurs de $H/2$, $H/3$, selon le cas considéré.

La zone de propagation en aval peut être beaucoup plus étendue si la surface en pied est pentée. L'observation de terrain, une topographie précise du pied de la pente sont des requis importants pour une cartographie pertinente de l'aléa. L'utilisation de logiciels de trajectographie peut être utile pour les cas les plus complexes.

5

LES ALÉAS LIÉS À L'ÉCHAUFFEMENT DES TERRAINS SUR DÉPÔT MINIER

5.1. Le phénomène, les mécanismes, les effets

Les terrains sédimentaires renfermant des horizons suffisamment riches en éléments carbonés solides (charbon, lignite, schistes bitumineux, tourbes), sont susceptibles d'être affectés par des combustions *in situ* de massifs, vierges de travaux ou non. Ces combustions peuvent être déclenchées par les effets de travaux miniers ou de terrassements du fait de l'auto-échauffement engendré par l'oxydation des roches hydrogéo-carbonées mises au contact de l'air (on parle alors de combustions spontanées), soit provoquées par le contact de feux vifs au droit des affleurements (feux de forêts naturels, écobuages...).

Les éléments pierreux stériles issus de l'extraction des produits minéraux carbonés mis en dépôt sur ces sites miniers (charbons cendreux, schistes charbonneux, schistes bitumineux...) sont pareillement sujets à échauffements. Ils peuvent entrer en combustion spontanée peu de temps (quelques mois à quelques années) après leur mise à dépôt, par auto-échauffement des matériaux frais, lorsque leur composition les rend particulièrement sensible à l'oxydation (cas de certains charbons plus ou moins pyriteux), ou, plus tardivement, au contact de feux vifs sur les flancs des dépôts, voire après une période d'exposition prolongée à un rayonnement thermique solaire important (sécheresse).



Photographie 6 : défournement et arrosage d'un terril en combustion, bassin minier du Gard

La durée des phénomènes de combustion est très variable selon le contexte, de quelques mois à plusieurs dizaines d'années.

Le phénomène redouté caractérisé dans une étude d'aléa est relatif au déclenchement de feux de broussailles ou de forêts et aux brûlures accidentelles de personnes sur ces sites sensibles :

- brûlures accidentelles de personnes : les risques de brûlure pour les personnes sont importants et d'autant plus élevés que les combustions sont superficielles, principalement sur les flancs ventilés des dépôts. De multiples accidents mortels individuels ou collectifs sont survenus par le passé ;
- déclenchement de feux de broussailles ou de forêts : la présence de terrains en combustion à proximité de la surface est susceptible de déclencher, en période de sécheresse ou de grands vents, des feux de broussailles ou de forêts pouvant avoir de graves conséquences si l'on se situe notamment en région méditerranéenne.

D'autres phénomènes dangereux peuvent résulter d'un mécanisme d'échauffement :

Production de gaz toxiques et/ou asphyxiants

Les problèmes posés par l'entrée en combustion d'anciens travaux miniers ou dépôts concernent en premier lieu la toxicité des vapeurs de combustion qui contiennent des gaz toxiques et/ou asphyxiants (CO, CO₂, CH₄, SO₂, NO_x, H₂S, HCN...), souvent malodorants (produits soufrés, goudrons, mercaptans), chargés d'éléments traces métalliques tels que mercure, plomb, arsenic.... Ces vapeurs sont produites parfois en grand volume lorsque les foyers sont superficiels et bien ventilés. Les émanations peuvent être plus sournoises (c'est-à-dire difficilement prévisibles) lorsque la combustion est profonde et que les gaz émis se diffusent vers la surface au travers de fissures et de crevasses.

Production de gaz explosibles

Des cas d'explosion de gaz inflammables issus de la combustion ou de la pyrolyse des produits organiques (H₂, CO, CH₄, hydrocarbures) et accumulés dans des cavités peuvent également survenir, tant sur des feux de travaux souterrains que sur des échauffements de dépôts. Les explosions peuvent être suffisamment puissantes lorsqu'elles se produisent dans les vides confinés présents dans les vieux travaux abandonnés. Elles sont moins fortes et non confinées lorsqu'elles concernent l'inflammation des gaz accumulés dans les petites cavités ou crevasses formées sur les flancs des dépôts houillers.

Affaissements ou effondrements de terrains

La réduction de volume des terrains affectés par la combustion provoque l'affaissement ou l'effondrement des terrains sus-jacents selon la profondeur et

l'importance des foyers. Les dommages aux biens peuvent être spectaculaires lorsqu'ils affectent les bâtiments ou les voiries.

Impact hydrogéologique : minéralisation des eaux souterraines

La lixiviation naturelle des terrains houillers ou dépôts affectés par les effets de la combustion libère des sels minéraux que l'on retrouve dans les nappes environnantes. Il s'agit essentiellement de sulfates produits par l'oxydation des pyrites, d'oxy-hydroxydes de fer et de magnésium, outre l'arsenic issu des arséno-pyrites.

Cas des échauffements souterrains

Les échauffements peuvent concerner des travaux miniers souterrains et des ouvrages de dépôts. Dans une étude d'aléa, les phénomènes redoutés liés à des échauffements de travaux souterrains sont étudiés dans le cadre de l'aléa « effondrement localisé » qui en est la principale conséquence possible en surface. L'aléa « échauffement » est limité aux ouvrages de dépôt.

5.2. Échauffement sur dépôt : qualification de l'aléa

5.2.1. Qualification de l'intensité

L'échauffement d'un ouvrage de dépôt est de nature à porter atteinte à la sécurité des personnes et des biens présents en surface ou aux abords proches en raison des risques de brûlure, d'émanations gazeuses ou de déclenchement de feux notamment.

C'est principalement le volume de matériau susceptible d'entrer en combustion ou l'emprise de la zone en surface impactée qui influe sur les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes et des biens présents dans la zone d'influence du désordre. Ce sont donc des paramètres de volume et de superficie qui peuvent être retenus comme grandeur représentative.

On retient couramment une intensité « modérée » pour un aléa échauffement sur ouvrage de dépôt.

5.2.2. Qualification de la prédisposition

Les anciens dépôts issus de l'extraction des roches combustibles demeurés imbrûlés conservent une prédisposition à l'entrée en échauffement de la fraction des éléments pierreux carbonés qu'ils contiennent.

La prédisposition d'un ouvrage de dépôt à l'apparition d'un échauffement dépend :

- de l'existence d'observations ou mesures thermiques (par exemple par thermographie) attestant qu'un mécanisme d'échauffement affecte l'ouvrage ;
- de la manifestation de phénomènes analogues sur d'autres ouvrages de dépôts, sur le site ou dans des configurations identiques ou proches ;

- de la nature des matériaux constitutifs de l'ouvrage de dépôt :

- les terrils les plus prédisposés à entrer en combustion sont les terrils dits de mine ou de fosse, constitués de produits « tout-venant » issus des creusements de galeries au rocher, de voies au charbon et des résidus de schéidage du charbon extrait. Ils sont composés de matériaux de granulométries étendues (0-200 mm) et de natures très diverses (blocs gréseux, schistes plus ou moins charbonneux, bitumineux et pyriteux, argilites, charbon, bois de mine, déchets divers plus ou moins combustibles...). Les matériaux combustibles entrent pour 15 à 35 % dans la composition des terrils de fosse ;
- les terrils dits de lavoir sont constitués de matériaux de granulométrie plus fine et plus régulière (0-20 mm), de nature essentiellement schisteuse. Ils peuvent contenir des matières carbonées en proportion encore notable, mais d'autant moins que les lavoirs dont ils sont issus sont plus modernes. La teneur en cendres des stériles de lavoirs d'avant la seconde guerre mondiale était de l'ordre de 75 % contre 85 % pour les ouvrages récents. Les cas de combustion de terrils issus de lavoirs modernes sont rares.

5.2.3. Échauffement sur dépôt : cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa comprend l'emprise de l'ouvrage de dépôt à laquelle s'ajoutent l'incertitude de positionnement de l'ouvrage et l'incertitude liée au support cartographique.

6

LES ALÉAS LIÉS AUX PERTURBATIONS HYDROLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES D'ORIGINE MINIÈRE

6.1. Origine des phénomènes redoutés

Les anciens travaux miniers, du moins en ce qui concerne les plus importants d'entre eux, ont généré parfois de profondes perturbations hydrologiques et hydrogéologiques et modifié, souvent de manière irréversible, la morphologie et la structure des bassins versants superficiels, des réservoirs et aquifères souterrains. En conséquence, les écoulements de l'eau, tant superficiels que souterrains, ont été bouleversés. Ces modifications se sont exercées pendant la phase d'exploitation des mines mais se sont poursuivies après cessation de l'activité (Figure 7).

Il faut toutefois ne pas oublier que pour les types d'aléa qui résultent de ces perturbations, la cause minière n'est parfois pas exclusive. L'activité minière a par exemple pu en son temps contribuer au développement économique d'un secteur, ce qui a pu induire des prélèvements d'eau industrielle et collective très importants et donc contribuer au rabattement des aquifères. Dans de tels cas, le niveau de remontée d'eau en final dépend de l'arrêt des exhaures mais aussi des consommations d'eau diverses résiduelles.

Les *exploitations minières souterraines* ont, pour la plupart d'entre elles, été dénoyées durant les travaux d'extraction. Les pompages opérés ont conduit à un rabattement du niveau de la nappe phréatique avec pour conséquence le tarissement de sources ou de puits d'approvisionnement en eau proches, voire la modification du débit des cours d'eau superficiels.

À l'issue de la période d'exploitation, l'arrêt des pompages conduit à un ennoyage progressif (de

quelques mois à plusieurs dizaines voire centaine d'années) des travaux miniers et à la remontée du niveau hydrostatique. Un drainage naturel vers la surface s'établit dans les points bas topographiques (vallées, dépressions) souvent par l'intermédiaire de galeries minières débouchant au jour. De nouvelles émergences apparaissent ainsi.

Dans certains grands bassins miniers arrêtés à la fin du xx^e siècle, l'ennoyage est en cours actuellement, et des pompages sont entrepris pour éviter l'ennoyage futur des points bas topographiques et/ou la contamination, par les eaux ayant rempli les réservoirs miniers, des aquifères proches de la surface utilisés pour l'alimentation.

Quel que soit le cas de figure, on peut considérer que le niveau hydrostatique, dans les environs de l'ancienne exploitation, ne retrouve pas sa position initiale.

Dans le cas des *mines à ciel ouvert*, l'impact concerne en premier lieu les écoulements de surface dans la mesure où la topographie se trouve fortement perturbée. Lorsque l'excavation a été suffisamment profonde pour atteindre la nappe phréatique, des pompages ont pu être entrepris.

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 conduit 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.

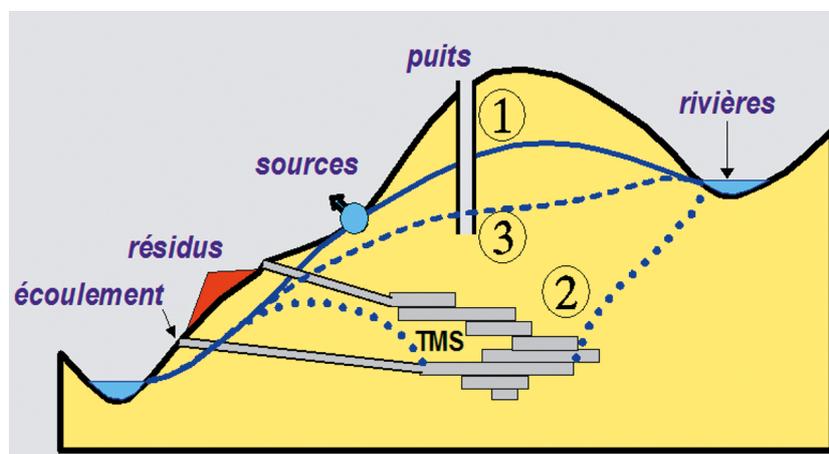


Figure 7 : schéma conceptuel de l'impact des travaux miniers souterrains sur l'hydrodynamique pendant et après l'exploitation.
(1) niveau hydrostatique avant exploitation, (2) pendant l'exploitation, (3) après abandon

Tableau 18 : les principaux phénomènes d'ordre hydrologique et hydrogéologique d'origine minière

Nature du « phénomène »	Fréquence observée (retour d'expérience en France)	Typologie très succincte du bassin minier ou de la configuration minière	Prégnance des perturbations (retour d'expérience en France)
Modification des émergences	Très fréquent	Tout bassin minier ayant été l'objet de travaux miniers nécessitant des pompages d'exhaure. Présence de points bas topographiques et d'ouvrages miniers constituant des nouvelles émergences.	Limitée
Inondation de points bas topographiques	Peu fréquent	Exploitations minières ayant généré un fort volume de vide sur des territoires étendus. Le niveau hydrostatique intersecte la topographie (celle-ci ayant pu être perturbée par des mouvements de terrain d'origine minière). La communication entre les eaux du réservoir minier et les aquifères supérieurs peut constituer un facteur aggravant.	Élevée lorsque les points bas ont été anthropisés
Modification du régime des cours d'eau	Peu fréquent		Variable selon l'usage des cours d'eau
Inondation brutale	Très peu fréquent	Obstruction naturelle, ou liée à des travaux anthropiques, de nouvelles émergences minières. Rupture brutale de ces obstacles.	Élevée si les zones en aval de ces émergences ont été anthropisées

6.2. Nature et identification des phénomènes redoutés

Les principales perturbations, dont on adoptera par simplification le terme de phénomène, sont présentées dans le Tableau 18 et développées au sein de ce chapitre.

Rappelons que nous n'abordons dans ce chapitre que les perturbations d'ordre hydrologique et hydrogéologique, liées à la seule présence potentielle d'eau. Les aspects liés à l'impact environnemental de ces eaux minières ne sont pas traités dans le présent guide.

6.3. Modification des émergences

6.3.1. Le phénomène et ses mécanismes

Les exutoires des nappes d'eau souterraine, qu'ils soient naturels (sources, résurgences) ou artificiels (puits ou galeries débouchant au jour), peuvent connaître, du fait entre autres de la modification engendrée par l'exploitation minière, 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 ;

- 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 – dans la plupart des cas une galerie – aménagé pour servir de point de débordement au réservoir minier. Elle peut également prendre la forme d'une source ou d'une résurgence « naturelle » apparaissant en un point bas de la topographie. On notera par ailleurs que, dans les parties les plus à l'amont des bassins versants hydrogéologiques, certaines émergences qui existaient avant l'exploitation minière peuvent ne pas réapparaître après la cessation de celle-ci.

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 ou contribué à assécher.

Ce milieu ayant été modifié, les nouvelles circulations diffèrent souvent des anciennes. Elles empruntent les cheminements anciens, mais également certains cheminements nouveaux, créés entre autres 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.



Photographie 7 : résurgence d'eau légèrement salée liée à une exploitation de sel par dissolution en Franche-Comté

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. Le milieu peut en effet se modifier au cours du temps (effondrement de vides miniers, mobilisation de discontinuités préexistantes de types karsts ou failles, phénomènes physico-chimiques - entre autres des phénomènes de dissolution-précipitation - modifiant la perméabilité et les qualités géomécaniques 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.

6.3.2. Qualification de l'aléa « modification des émergences »

6.3.2.1. 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'intensité.

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).

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.

Tableau 19 : modification des émergences : classes d'intensité

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

6.3.2.2. 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 :

Existence d'indices d'anciennes sources situées, avant l'exploitation minière, à proximité immédiate

Existence d'ouvrages miniers débouchant au jour connectés au réservoir souterrain

Présence d'hétérogénéités naturelles (zones à forte perméabilité, failles, fractures, conduits karstiques...) susceptibles de jouer un rôle de drains préférentiels

6.3.2.3. Cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa doit *a minima* faire apparaître, 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.

6.4. Inondation des points bas topographiques

6.4.1. Le phénomène et ses mécanismes

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, voire dépasser temporairement ou durablement le niveau topographique.

Dans le premier 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.

Dans le deuxième cas, ce sont les parcelles même situées dans ces points bas, ainsi que les infrastructures ou bâtiments qui y ont été implantés, qui se retrouvent ennoyés de manière transitoire ou permanente.



Photographie 8 : zone humide due à la remontée de la nappe phréatique avec incidence minière

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

Un facteur aggravant, dans les grands bassins miniers où des aquifères d'extension régionale surincombent les anciens travaux, est la mise en communication des eaux du réservoir minier et de ces aquifères.

Quelles qu'en soient les causes ou interactions possibles, ce sont les zones basses (comme les fonds de vallée) qui sont les plus sensibles à la manifestation de ces inondations. Les zones d'anciens affaissements miniers,

constituant souvent des dépressions topographiques fermées, peuvent être également concernées par ces inondations.

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.

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 dans l'étude d'aléa la potentialité de défaillance des stations de relevage, qui pourrait conduire à la manifestation d'inondations.

6.4.2. Qualification de l'aléa « inondation des points bas topographiques »

6.4.2.1. 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.

Les classes d'intensité sont 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 détaillées seraient réalisées à cette occasion.

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.

Tableau 20 : inondation des points bas topographiques : classes d'intensité

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. Parcelles impraticables saisonnièrement	1 à 3
Élevée	Tout ouvrage en sous-sol affecté. Présence de plan d'eau libre intermittent ou permanent	< 1

6.4.2.2. Qualification de la prédisposition

Les facteurs de prédisposition à cet aléa sont les suivants :

Présence de points bas naturels de la topographie, éventuellement influencés par les affaissements miniers ;
Présence de terrains perméables en surface qui ne freinent pas les remontées saisonnières de nappe et augmentent le débit à drainer éventuellement ;
De manière inverse, mais <i>a posteriori</i> , existence de terrains peu perméables dans ces points bas empêchant l'évacuation des eaux.

6.4.2.3. Cartographie de l'aléa

La cartographie de l'aléa doit *a minima* faire apparaître, à l'échelle appropriée :

- la position des sources anciennes susceptibles d'être réactivées ;
- l'emprise des zones à risque d'apparition de nouvelles émergences ;
- le contour des zones potentiellement inondables ;
- les courbes isovaleurs de la profondeur de la nappe en hautes eaux, en distinguant les zones de profondeur en fonction des classes d'intensité retenues pour cet aléa.

6.5. Modification du régime des cours d'eau

6.5.1. Le phénomène et ses mécanismes

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.

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.

6.5.1.1. Accroissement du débit des cours d'eau

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'estompent progressivement dans la mémoire collective. Dans ces conditions, il arrive que :

- le lit mineur initial du cours d'eau soit aménagé voire canalisé sous la pression de l'activité humaine ;
- 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 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.

Cet accroissement découle de l'une ou l'autre des causes suivantes, voire de leur combinaison :

- 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.

6.5.1.2. Diminution du débit d'étiage

À 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'alimentation en eau pour divers usages.

Cette situation peut aussi conduire à :

- l'assèchement de points d'eau creusés dans la nappe alluviale, voire l'assèchement du cours d'eau lui-même ;
- une détérioration de la qualité de l'eau et la mise en danger d'écosystèmes aquatiques.

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, ayant 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 entraînant l'écoulement d'une partie de la nappe drainée antérieurement par le cours d'eau vers un autre bassin versant ;
- la fin de l'alimentation du cours d'eau concerné par le rejet en surface de pompages d'exhaure.

6.5.2. Qualification de l'aléa « modification du régime des cours d'eau »

6.5.2.1. Qualification de l'intensité

Dans la configuration d'accroissement du débit des cours d'eau, 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 distinguons deux classes en fonction du préjudice apporté à l'occupation des sols et des dangers pour les biens.

Tableau 21 : modification du régime des cours d'eau (accroissement du débit) : classes d'intensité

Classe d'intensité	Description	Valeur
Modérée	Le cours d'eau ne sort qu'occasionnellement de son lit mineur	-
Élevée	Le lit majeur est régulièrement inondé	-

Il importe surtout de déterminer si l'augmentation escomptée du débit de crue liée aux anciens travaux miniers est susceptible de contribuer de manière négligeable ou *a contrario* sensible au développement d'inondations par rapport à une situation vierge de travaux miniers.

Dans la configuration de diminution du débit d'étiage, le paramètre d'intensité retenu est le débit du cours d'eau à l'étiage, associé à sa durée. 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.

Tableau 22 : modification du régime des cours d'eau (diminution du débit d'étiage) : classes d'intensité

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%

6.5.2.2. Qualification de la prédisposition

Les facteurs de prédisposition à cet aléa, dans la configuration d'accroissement du débit des cours d'eau, sont les suivants :

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)
Modification de la topographie du lit majeur sous l'effet d'affaissements miniers passés ou à venir
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)
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

Dans la configuration de diminution du débit d'étiage, 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.

6.5.2.3. Cartographie de l'aléa

La cartographie doit inclure le réseau hydrographique, notamment les tronçons de rivière dont les crues et les étiages seront affectés par les conséquences des travaux miniers. Pour les augmentations de débit, on s'efforcera de donner une représentation des zones potentiellement inondables en nuanciant les contours par la notion de prédisposition.

6.6. Inondations brutales

6.6.1. Le phénomène et ses mécanismes

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 destructeur.

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 les zones aval sont occupées par l'activité humaine.

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

La situation la plus fréquente est celle d'un réservoir minier 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 débouffrage 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.

Enfin dans le cas d'une ancienne mine 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.

6.6.2. Qualification de l'aléa

6.6.2.1. Qualification de l'intensité

Le phénomène se manifeste par une lame d'eau s'écoulant avec une certaine vitesse pendant une durée variable. À 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 est élevée.

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.

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.

Tableau 23 : inondation brutale : classes d'intensité

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
Élevée à très élevée	Flux d'eau dévastateur	> 50 cm

6.6.2.2. 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 :

Impossibilité de surveiller et d'entretenir les bouchons d'obturation
Impossibilité ou absence de surveillance du niveau d'eau dans les travaux miniers
Risques d'instabilité des travaux miniers pouvant entraîner un effondrement en masse
Possibilité d'alimentation intempestive du réservoir minier par un karst en crue
Présence de terrains calcaires pouvant contenir des conduits karstiques colmatés, susceptibles de communiquer avec les travaux miniers

6.6.2.3. Cartographie de l'aléa

Pour cartographier cet aléa, on s'attachera à identifier tous les émissaires (orifices de galeries, de puits, points bas d'une digue naturelle ou artificielle, terril sur vallon...) 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.

7

LES ALÉAS LIÉS AUX ÉMISSIONS DE GAZ EN LIEN AVEC L'EXPLOITATION MINIÈRE

L'évaluation détaillée de l'aléa gaz de mine est l'objet d'un guide méthodologique établi en 2016 par l'Ineris. Nous n'en établissons ici qu'une synthèse très succincte et recommandons au lecteur de consulter cet ouvrage pour plus de précision.

7.1. Le phénomène et ses mécanismes

Le phénomène redouté correspond à la remontée en surface de gaz en lien avec l'exploitation minière. Ce phénomène est susceptible de présenter des dangers, principalement pour les personnes et, plus exceptionnellement, pour les biens ou l'environnement. Il s'agit des dangers d'inflammation, d'explosion, d'asphyxie et d'intoxication.

Les gaz peuvent être d'origines endogène (au sein du gisement avant l'exploitation minière, principalement le méthane et ses homologues supérieurs, et le dioxyde de carbone) ou exogène (au sein de l'environnement extérieur perturbé pendant et après l'exploitation minière). Les plus fréquemment rencontrés dans un contexte post-minier sont le monoxyde de carbone, le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène).

Les anciennes mines souterraines sont à même de réunir trois éléments principaux, nécessaires pour l'apparition du phénomène redouté :

- la présence de vides résiduels constituant un réservoir souterrain plus ou moins confiné et connecté. Ces vides peuvent être directement d'origine minière ou apparus dans les terrains encaissants, suite à l'influence d'une exploitation ;

- la présence de gaz dangereux ou d'atmosphères appauvries en oxygène ;
- la possibilité de production et/ou d'accumulation de ces gaz en quantité significative et de migration, à des teneurs dangereuses, vers la surface.

Les anciennes exploitations souterraines engendrent en effet trois modifications du milieu :

- la création de vides résiduels provenant des travaux d'exploitation et des ouvrages d'infrastructures minières (galeries, puits...). En fonction de l'importance et du type d'exploitation, le volume des vides résiduels peut être plus ou moins important ;
- la dégradation des terrains de recouvrement au-dessus des anciennes exploitations minières, qui induit l'augmentation de leur fracturation, et/ou de leur porosité et facilite ainsi la migration des fluides (eau et gaz). Le gaz peut provenir des travaux miniers. Il peut, dans certaines conditions géologiques particulières, être généré dans les terrains de recouvrement fracturés par l'exploitation minière ;
- le changement des conditions hydrogéologiques postérieurement à l'exploitation minière souterraine, qui se concrétise dans la plupart des cas par un rabattement de la (des) nappe(s) aquifère(s). Ceci facilite la migration de gaz au sein des vides post miniers et dans les terrains de recouvrement.

Ces modifications favorisent directement le dégagement, la production, l'accumulation et la circulation de gaz au sein des massifs rocheux.

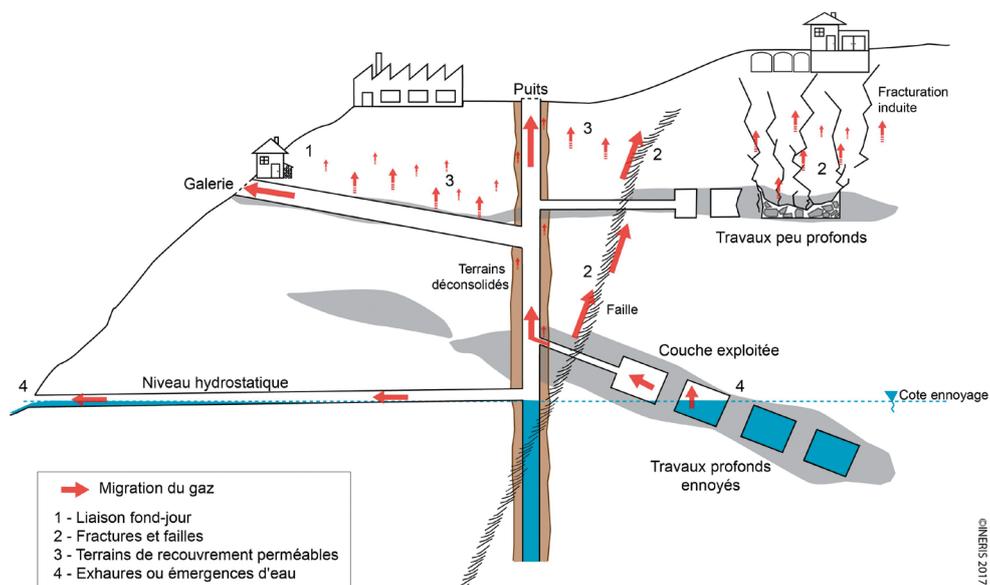


Figure 8 : principales voies de migration de gaz en lien avec l'exploitation minière

7.2. Émission de gaz : qualification de l'aléa

7.2.1. Qualification de l'intensité

L'intensité s'exprime par la conjonction :

- de l'aptitude du réservoir minier à produire ou à contenir des gaz dangereux (en termes de composition et de quantité) ;
- de l'importance potentielle du flux de ces gaz vers la surface.

Les dangers vis-à-vis des biens ou infrastructures n'existent que lorsque le gaz de mine est inflammable, car son accumulation peut conduire à une inflammation ou une explosion. Cependant, les personnes étant également exposées dans un tel scénario, il est considéré que l'intensité du phénomène ne se traduit qu'en termes de dangerosité sur les personnes.

Les classes d'intensité, issues du guide méthodologique de 2016⁴, sont les suivantes :

Tableau 24 : émission de gaz en lien avec l'exploitation minière : classes d'intensité

Classes d'intensité	Caractéristiques de l'émission de gaz au niveau des vides miniers
Limitée	Émission contenant : - soit des gaz inflammables, à des teneurs inférieures à la Limite Inférieure d'Explosibilité (LIE) ; - soit des gaz asphyxiants ou toxiques, à des teneurs dépassant les Teneurs Limites de Référence (TLR) mais ne pouvant entraîner qu'un effet faible et réversible.
Modérée	Émission faible à moyenne ⁵ contenant : - soit des gaz inflammables, à des teneurs supérieures ou égales à la LIE ; - soit des gaz asphyxiants ou toxiques, à des teneurs pouvant entraîner un effet irréversible ; ou : Émission faible contenant des gaz asphyxiants ou toxiques, à des teneurs pouvant entraîner un effet léthal.
Élevée	Émission importante ⁵ contenant des gaz : - soit inflammables, à des teneurs supérieures ou égales à la LIE ; - soit asphyxiants ou toxiques, à des teneurs pouvant entraîner un effet irréversible. Émission moyenne à importante contenant des gaz asphyxiants ou toxiques, à des teneurs pouvant entraîner un effet léthal.

4 - Nous recommandons au lecteur de consulter le guide méthodologique de l'Ineris pour plus de précision sur l'évaluation de l'intensité et sur les valeurs limites (TLR, LIE).

5 - Pour plus de précision sur la qualification d'émission faible, moyenne et importante, nous recommandons au lecteur de consulter le guide méthodologique de l'Ineris [6].

7.2.2. Qualification de la prédisposition

La prédisposition d'un site post-minier à ce qu'il puisse s'y produire des émissions de gaz en surface s'exprime par les propriétés du milieu environnant de ce site à permettre (ou au contraire à limiter) la migration vers la surface de gaz présents au sein d'anciens travaux miniers et des terrains encaissants.

L'évaluation de la prédisposition doit considérer les deux voies principales de migration de gaz vers la surface, qui sont :

- la migration de gaz à travers les terrains de recouvrement, incluant les discontinuités éventuelles de ces terrains ;
- la migration par les ouvrages débouchant au jour.

La migration de gaz peut s'opérer sous forme dissoute dans l'eau. Elle est alors à considérer dans le volet relatif aux ouvrages débouchant au jour, car, dans la plupart des cas, le dégazage des eaux minières ne se manifeste qu'en liaison avec des émergences par les ouvrages miniers.

Relativement aux *terrains de recouvrement*, les principaux facteurs à prendre en compte, liés à la résistance aéraulique (résistance à l'écoulement des gaz) sont les suivants :

- l'épaisseur des terrains de recouvrement : toutes choses égales par ailleurs, plus elle est importante et plus elle constitue une résistance à l'écoulement des gaz vers la surface ;
- l'influence de l'exploitation minière, ayant pu déstructurer et augmenter la porosité et/ou la fracturation des terrains de recouvrement, et ainsi faciliter l'écoulement des gaz ;
- l'existence de formations géologiques particulières pouvant augmenter la résistance aéraulique (couches à très faible perméabilité, nappes perchées, etc.) ;
- *a contrario*, l'existence de formations géologiques ou de discontinuités très perméables, pouvant constituer des drains préférentiels pour le gaz ;
- les instabilités géomécaniques au sein des terrains de recouvrement, pouvant faciliter l'écoulement gazeux.

Les *ouvrages débouchant au jour* reliant les vieux travaux miniers à la surface constituent des points singuliers par lesquels une migration de gaz de mine peut être potentiellement facilitée, même s'ils ont été traités et fermés après l'arrêt de l'exploitation.

Dans ce cas également, c'est la résistance aéraulique de l'ouvrage qui constitue l'élément déterminant pour la qualification de sa prédisposition à la migration de gaz de mine. Il convient toutefois de tenir compte de l'instabilité potentielle de ces ouvrages, qui peut avoir une incidence sur l'émission de gaz en surface (débouillage du remblai, effondrement...).

La typologie de l'ouvrage, le volume de vide en son sein, le mode et la pérennité du remblayage et/ou de la fermeture sont des critères importants. La conjonction de plusieurs critères augmentant ou limitant la prédisposition conduit à ce que chaque ouvrage soit l'objet d'une analyse particulière.

7.3. Émission de gaz : cartographie de l'aléa

Dans le cas de *migration par les terrains de recouvrement*, le périmètre des différentes zones d'aléa au droit des anciens travaux miniers est défini tout d'abord par une projection verticale des limites géométriques des travaux concernés.

Dans un deuxième temps, il est pris en compte l'influence de l'exploitation en fonction de la typologie de mouvements de terrains qui se sont produits ou peuvent se produire. Cette influence dite « géomécanique » peut modifier latéralement les caractéristiques aérauliques des terrains de recouvrement et les rendre plus perméables, donc plus propices à permettre une migration de gaz.

Dans le cas de migration par les *ouvrages débouchant au jour*, il convient de tenir compte de la zone d'influence de l'ouvrage. Celle-ci doit intégrer :

- les éventuelles connexions à d'autres ouvrages en surface ou sub-surface ;
- l'existence de défauts d'étanchéité au droit du dispositif de fermeture d'un ouvrage ;
- l'état de fracturation des terrains environnant l'ouvrage ;
- la marge d'influence liée à un potentiel mouvement de terrain si un tel aléa est pertinent.

8

DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- [1] Collectif, INERIS, 2006. *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide Méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz.* INERIS-DRS-06-51198/R01
- [2] GEODERIS, 2012. *Guide pratique pour l'homogénéisation des études détaillées des aléas miniers Volet « effondrement localisé ».* GEODERIS N2012/O10DE
- [3] GEODERIS, 2015. *Bassin houiller lorrain. Évaluation de la prédisposition de présence de crevasses.* GEODERIS E2015/O62DE
- [4] INERIS, 2010. *Note d'information sur la nature des mouvements de terrains susceptibles de se développer à l'aplomb des anciennes exploitations menées par chambres et piliers dans le bassin houiller de Provence.* INERIS DRS-10-116224-09341A
- [5] INERIS, 2015. *Retour d'expérience sur les effondrements localisés miniers.* INERIS DRS-15-149489-10509A, <https://www.ineris.fr/fr/retour-dexperience-sur-les-effondrements-localises-miniers>
- [6] INERIS, 2016. *Évaluation de l'aléa « Gaz de mine ». Guide méthodologique.* INERIS-DRS-15-149493-10366B, <https://www.ineris.fr/fr/evaluation-de-lalea-gaz-de-mine-guide-methodologique>
- [7] INERIS, Cerema, GEODERIS, 2017. *Guide de gestion du risque minier post-exploitation.* INERIS-DRS-17-164640-01814A, <https://www.ineris.fr/fr/guide-de-gestion-du-risque-minier-post-exploitation>

9

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- [8] ARCAMONE J., 1980. *Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle*. Mémoire de thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, École des Mines de Nancy.
- [9] BRGM, 1980. *Fiches signalétiques de digues à stériles concernant quelques exploitations minières françaises*. BRGM n° 80 SGN 433 GEG
- [10] BRGM, 2008. *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa « Pollution des sols et des eaux »*. BRGM/RP-55143-FR
- [11] CHAUVIN R., LODEL R., PHILIPPE J. L., 1986. « Combustion spontanée du charbon ». *Revue de la Société de l'industrie minière, Mines et carrières*, p. 71-77.
- [12] CSTB, 2004. *Bassin minier nord-lorrain. Étude des conditions de constructibilité dans le bassin sidérurgique et ferrifère nord-lorrain*. Non référencé.
- [13] CSTB, 2011. *Guide de dispositions constructives pour le bâti neuf situé en zone d'aléa de fontis miniers*. Référencé 26029541
- [14] DE LA GOUPILLIERE H, 1920. *Cours d'exploitation des Mines*. 5 volumes. Paris. Éditions Dunod.
- [15] FINE J., 1993. *Le soutènement des galeries minières*. Éditions Armines.
- [16] FLAGEOLLET J.C., 1989. *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Collection Géographie. Éditions Masson.
- [17] GEODERIS, 2015. *Note relative à la constructibilité dans les zones d'aléa « effondrement localisé » de niveau faible*. RAPPORT N2015/015DE - 15NAT23010
- [18] INERIS, 1996. *Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risques de mouvements de terrain*. SSE-JTr-CDi/CS-95-21EP37/R01
- [19] INERIS, 1997. *Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Traitement des puits, galeries et descenderies abandonnés*. INERIS-SSE-CDi/CS-97-22EP46/R04
- [20] INERIS, 2001. *Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines*. INERIS-DRS-01-25750/R01
- [21] INERIS, 2005. *Évaluation des aléas liés aux feux souterrains dans les anciennes exploitations de charbon*. INERIS - DRS - 05 - 55108/R01
- [22] INERIS, 2005. *Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM Aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens. Partie 2 : « Typologie des événements redoutés au droit d'exploitations pentées et/ou filoniennes »*. INERIS-DRS-05-55102/R02
- [23] INERIS, 2009. *Annexe technique au guide d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Évaluation de l'aléa « effondrement localisé »*. INERIS DRS-09-103953-12226A
- [24] ISRM, 2008. *Mine closure and post-mining management. International state-of-the-art*. Non référencé.
- [25] JEGER C., 1976. « Étude des conditions de naissance des combustions spontanées dans les houillères françaises ». *Revue de la Société de l'industrie minière, Mines et carrières*, p. 116-140.
- [26] KAMBRI S., 2015. *Étude des crevasses minières du bassin ferrière lorrain : évaluation des critères de prédisposition d'apparition et analyse d'intensité*. Mémoire de Master. Université de Lorraine, École nationale supérieure des Mines de Nancy.
- [27] KRATSCH, H., 1983. *Mining subsidence Engineering*. Berlin, Heidelberg. Éditions Springer-Verlag.
- [28] LCPC, 2000. *Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*. Collection « Environnement. Les risques naturels ». Paris. Éditions du Laboratoire central des ponts et chaussées.
- [29] LCPC, 2004. *Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux*. Collection « Environnement. Les risques naturels ». Paris. Éditions du Laboratoire central des ponts et chaussées.
- [30] LCPC, INERIS, MATE, 2002. *Guide technique d'évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*. Collection « Environnement. Les risques naturels ». Paris. Éditions du Laboratoire central des ponts et chaussées.
- [31] LIN S., WHITTAKER B.N., REDDISH D.J., 1992. *Application of asymmetrical influence functions for subsidence prediction of gently inclined seam extractions*. Éditions Elsevier.
- [32] MATE, METL, 1999. *Plans de prévention des risques naturels (PPRN). Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique*. Paris. Éditions La documentation française.
- [33] MICHALSKI E.R., OUVRY J.F., WOJTKOWIAK F., 1997. « Aspects hydrauliques des ouvrages de retenue des résidus industriels fins ». *Mines et carrières*, numéro

spécial Dignes & Terrils, novembre. Éditions de la Société de l'industrie minérale.

- [34] PAQUETTE Y., HANTZ D., 1997. « Terrils et versés minières. Conception, surveillance, réhabilitation. » *Mines et carrières*, numéro spécial Dignes & Terrils, novembre. Éditions de la Société de l'industrie minérale.
- [35] PAQUETTE Y., 1997. « La combustion des remblais houillers et crassiers sidérurgiques. » *Mines et carrières*, numéro spécial Dignes & Terrils, novembre. Éditions de la Société de l'industrie minérale.
- [36] PAQUETTE Y., LAVERSANNE J., 2003. *Guide du détenteur de terrils et autres dépôts miniers issus de l'activité charbonnière (versés, bassins de décantation, dépôts de cendres)*. Éditions de la Société de l'industrie minérale.
- [37] PIGUET J.P., WOJTKOWIAK F., 2000. « Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps. » *Mines et carrières* Volume 82, juin 2000, p. 36-47. Éditions de la Société de l'industrie minérale.
- [38] PROUST A., 1964. « Étude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais ». *Revue de l'Industrie Minérale*, juin-juillet 1964.
- [39] STRACHER G., PRAKASH A. et al. *Coal and peat fires: a global perspective*. Volumes 1 (2010), 2 (2012), 3 (2014) et 4 (2015), Éditions Elsevier.

La connaissance des aléas liés aux travaux miniers a largement été développée ces dernières années sur le territoire métropolitain. Les recherches effectuées pour appréhender les risques sur les zones d'emprise d'anciennes exploitations minières se traduisent, pour la grande majorité des phénomènes redoutés qui peuvent se produire sur ces zones, par la réalisation d'une « étude d'aléa ». Le présent guide constitue la trame et les lignes directrices pour cette réalisation.

Dans le cadre de la gestion du risque que les anciens travaux miniers peuvent générer, d'une part, et de l'aménagement durable de ces territoires, d'autre part, l'étude des aléas, et les cartes qui lui sont associées, constituent une étape essentielle.

Il s'agit de délimiter les zones où des aléas existent et d'en évaluer le niveau, afin de déterminer le risque pour les biens existants et les possibilités de construction ou d'aménagement pour le développement du territoire.

Cette étape technique clé permet aux services instructeurs d'élaborer les procédures de gestion du risque minier post-exploitation, aux collectivités de mieux connaître et de s'adapter aux phénomènes redoutés et aux aménageurs de mieux appréhender les conditions de constructibilité.

Le lecteur trouvera dans ce guide des informations sur le phénomène d'origine minière auquel il peut être confronté, des retours d'expérience qui en ont été établis, ainsi que des indications sur les paramètres concourant à évaluer, hiérarchiser et cartographier l'aléa.

Knowledge of hazards associated with mining works has largely been developed in recent years in metropolitan France. The research carried out to apprehend risks on the surface influenced by old mining operations is realised through a "hazard study", for the vast majority of the dreaded phenomena which can occur.

This handbook provides the framework and guidelines for this achievement.

In the framework of the risk management that these old mining works can generate, on the one hand, and the sustainable development of these territories, on the other hand, the study of the hazards, and associated maps, constitutes an essential step.

The objective is to map the zones where hazards exist and to evaluate their level, in order to determine the risk for existing stakes and the possibilities of construction or development in terms of land planning.

This key technical step allows the instructor services to develop post-mining risk management procedures, allowing local authorities to better know and adapt to the dreaded phenomena and land planners to better understand the conditions of constructibility.

This handbook provides information on post-mining phenomena, the feedback that has been established and indications on the parameters to be considered to evaluate and map the hazard.