

Programme EAT-DRS-03

Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier

F. POULARD – R. SALMON

*Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques
Direction des Risques du Sol et du Sous-sol*

24 décembre 2002

Programme EAT-DRS-03

Proposition d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier

24 DECEMBRE 2002

Ce document comporte 62 pages (hors couverture et annexes).

	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	F. POULARD et R. SALMON	C. DIDIER	F. WOJTKOWIAK	C. TAUZIEDE
Qualité	Ingénieurs à l'Unité Modélisation et Evaluation des Risques Géotechniques à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Responsable Adjoint de l'unité Modélisation et Evaluation des risques Géotechniques à la Direction des risques du Sol et du Sous-sol	Directeur Délégué des Risques du Sol et du Sous-sol à Nancy	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa				

PERSONNES AYANT PARTICIPÉ A CETTE ETUDE

Rédaction : Romuald SALMON, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS.

Myriam MERAD, doctorante à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS.

Frédéric POULARD, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS.

Elaboration de la méthode :

Samy KOUNIALI, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS ;

Laurent CAUVIN, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS ;

Thierry DELAUNAY, ingénieur AUXIRBAT intervenant pour l'INERIS ;

Myriam MERAD, doctorante à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS ;

Jean-Pierre JOSIEN, Directeur de GEODERIS ;

Jack-Pierre PIGUET, Professeur de l'Ecole des Mines de Nancy ;

Gérard VOUILLE, Professeur de l'Ecole des Mines de Paris ;

Edouard TINCELIN, Professeur d'exploitation minière à l'Ecole des Mines de Paris ;

Francis WOJTKOWIAK, Directeur délégué de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS à Nancy.

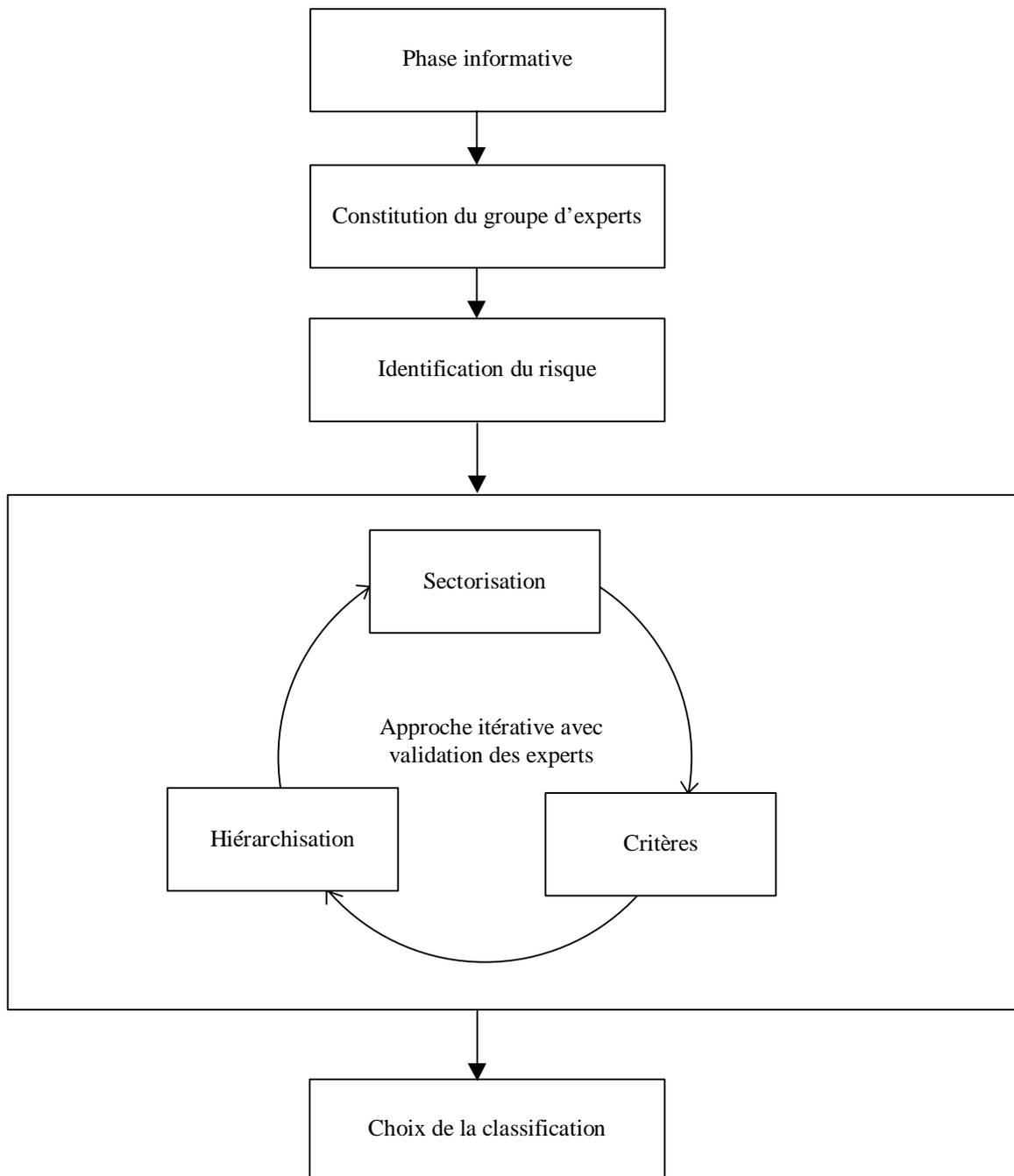
TABLE DES MATIERES

1. RESUME	4
2. OBJET ET CONTEXTE.....	5
3. MÉTHODE D'ANALYSE ET DE HIÉRARCHISATION DES RISQUES RÉSIDUELS LIÉS À L'EXPLOITATION D'UN ANCIEN BASSIN MINIER.....	6
3.1 PHASE INFORMATIVE	6
3.2 CONSTITUTION DU GROUPE D'EXPERTS.....	7
3.3 IDENTIFICATION DES RISQUES	8
3.3.1 <i>Risques géotechniques</i>	8
3.4 DÉFINITION D'UNE SECTORISATION VIS-À-VIS DU RISQUE.....	15
3.5 CRITÈRES	15
3.5.1 <i>Identification des critères</i>	15
3.5.2 <i>Pondération des critères</i>	18
3.5.3 <i>Renseignement des critères</i>	19
3.6 CALCULS	19
3.7 CHOIX DE LA CLASSIFICATION	19
4. APPLICATION DE LA MÉTHODE AU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN	20
4.1 CONTEXTE DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN – PHASE INFORMATIVE	20
4.1.1 <i>La Lorraine minière</i>	21
4.1.2 <i>Le bassin ferrifère lorrain</i>	22
4.1.3 <i>Instabilités de surface connues et rétro-analyses</i>	29
4.2 CONSTITUTION DU GROUPE D'EXPERTS.....	31
4.3 IDENTIFICATION DU RISQUE	32
4.4 DÉFINITION D'UNE SECTORISATION VIS-À-VIS DU RISQUE.....	34
4.5 LES CRITÈRES.....	35
4.5.1 <i>Identification et définition des critères</i>	35
4.5.2 <i>Pondération des critères</i>	42
4.5.3 <i>Renseignements et calculs des critères</i>	43
4.6 CHOIX DE LA CLASSIFICATION	47
4.6.1 <i>Introduction</i>	47
4.6.2 <i>Hiérarchisation des « zones à surveiller »</i>	48
4.6.3 <i>Hiérarchisation des zones d'aléa</i>	49
4.6.4 <i>Mise en œuvre des différentes hiérarchisations</i>	50
4.6.5 <i>Exemple de résultat</i>	52
5. CONCLUSION	54
6. BIBLIOGRAPHIE.....	55
7. LISTE DES FIGURES ET ANNEXES	62
8. GLOSSAIRE	57

1. RESUME

Les affaissements miniers survenus ces dernières années dans le bassin ferrifère lorrain ont nécessité l'élaboration d'une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. Répondant à une exigence de clarté et d'adaptabilité issue des enjeux importants du bassin ferrifère, cette méthode est présentée dans un premier temps puis elle est appliquée au bassin ferrifère lorrain.

La méthode globale d'analyse et de hiérarchisation des risques miniers résiduels se décompose en 7 phases schématisées ci-dessous.



2. OBJET ET CONTÊTE

Le programme de recherche de l'INERIS pour le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (EAT-DRS-03) s'inscrit dans la démarche d'analyse globale et de gestion durable des risques et des conséquences à long terme liés à la présence d'exploitations minières arrêtées ou abandonnées. Il comporte quatre objectifs dont le **quatrième** consiste à améliorer les connaissances dans le domaine des méthodes d'évaluation et de hiérarchisation des risques miniers résiduels et mettre au point une méthode opérationnelle d'évaluation et de gestion globale de ces types de risque. Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de ce quatrième objectif. Il constitue une contribution de l'INERIS au programme du GISOS.

Les affaissements miniers survenus ces dernières années dans le bassin ferrifère lorrain (Auboué 1996, Moutiers 1997, Moyeuve-Grande 1998, Roncourt 1999), longtemps après l'arrêt définitif des travaux d'extraction, ont conduit à une prise de conscience de la gravité des problèmes liés à la phase après-mine. Cette prise de conscience a entraîné un besoin crucial de recherche et de développement, dans les différentes disciplines concernées (géotechnique, géologie, hydrogéologie, analyse et gestion du risque, chimie des eaux, etc.) pour prévoir et prévenir les phénomènes affectant les mines arrêtées ou abandonnées. La complexité des problèmes nécessite donc une approche pluridisciplinaire à laquelle souscrit la méthode proposée dans le cadre du présent rapport.

S'appuyant sur son expérience en matière de méthodes d'évaluation des risques liés aux cavités souterraines, l'INERIS a établi une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. Cette méthode a été développée et appliquée dans le cadre de la hiérarchisation des risques géotechniques liés au bassin ferrifère lorrain.

L'étude des risques d'un bassin minier soulève deux problématiques principales qui ont nécessité d'élaborer une méthode d'analyse nouvelle :

- la première problématique tient à ce que l'évaluation, la hiérarchisation et la cartographie portent sur un site très étendu (pour l'exemple, la superficie du bassin ferrifère lorrain est de l'ordre de 1500 km²) tout en conservant un niveau de précision adapté à sa lecture et à son utilisation en terme de gestion de risque ;
- la seconde problématique tient à la quantité importante d'informations qu'un tel projet oblige à traiter. La méthode mise au point doit tirer parti de cette quantité d'informations tout en garantissant la multiplicité des disciplines concernées.

Concrètement, la méthode proposée répond à une exigence de clarté et d'adaptabilité.

L'exigence de clarté implique une méthode explicite et une formalisation des expertises. Elle correspond à une demande de la société moderne et s'impose compte tenu de l'importance des enjeux (présents et futurs) et de l'étendue des études.

L'exigence d'adaptabilité en découle : les études concernées sont susceptibles de durer plusieurs années pendant lesquelles la connaissance augmente. La méthode doit pouvoir intégrer de nouveaux critères d'adaptabilité du risque et s'adapter aux acteurs de sa réalisation (ajout de compétences, transmission de compétences...).

Un glossaire en fin de rapport propose des définitions pour les termes employés en matière d'analyse du risque souterrain.

3. MÉTHODE D'ANALYSE ET DE HIÉRARCHISATION DES RISQUES RÉSIDUELS LIÉS À L'EXPLOITATION D'UN ANCIEN BASSIN MINIER

3.1 PHASE INFORMATIVE

La phase informative a pour objet de faire état du contexte de l'étude en regroupant l'ensemble des informations disponibles sur le bassin minier étudié. Parmi les sources possibles d'information, on peut citer :

- les archives ;
- les plans (de surface, d'exploitation, etc.) ;
- les rapports d'expertise ;
- les différents recueils sur les « incidents » et « accidents » ayant eu lieu sur le bassin.

Cette phase s'appuie également sur des visites de site, quand ceci est possible, afin de vérifier et de valider les informations recueillies.

Les informations recueillies ont pour objectif :

- de définir le cadre formel de lancement de l'étude de risque où sont précisés l'objet, les finalités et les attentes en terme de rendu d'étude ;
- d'identifier les « acteurs » impliqués directement ou indirectement dans l'étude de risque afin d'être exhaustif sur les sources d'information ;
- de décrire le contexte du bassin minier des points de vue :
 - géographique (périmètre de l'étude, topographie, utilisation de la surface actuelle ou future...);
 - géologique (géologie du gisement, nature du recouvrement...);
 - hydrologique et hydrogéologique ;
 - de la méthode d'exploitation (présence, volume et géométrie des vides résiduels...);
 - géotechnique (caractéristiques géomécaniques et comportement des matériaux du site, sollicitations...);
- de recenser les désordres observés afin de définir les conditions favorables à l'apparition d'un événement et de proposer des indicateurs permettant d'apprécier l'occurrence de celui-ci pour une zone donnée. Cette phase permet également de porter à la connaissance des acteurs identifiés la nature des événements redoutés et de les sensibiliser à la problématique à traiter ;
- d'identifier les sources d'incertitude et leur quantification quand ceci est possible.

La phase informative constitue l'une des phases essentielles de l'étude, souvent la plus longue compte tenu de la quantité importante d'informations à traiter et de la dispersion des « sources » d'information.

L'objectif de la phase informative réside enfin dans l'évaluation des enjeux en termes d'aménagement du territoire et économiques afin de définir la précision de l'étude (en termes d'échelle et de niveau d'explicitation de l'expertise).

3.2 CONSTITUTION DU GROUPE D'EXPERTS

La méthode présentée ici s'articule largement autour d'un groupe d'experts, généralement réunis au sein d'un comité et qui contribue largement, à tous les niveaux de la méthode, à son déroulement efficace.

Nous distinguons ici *l'expert* du domaine du *spécialiste* de ce même domaine. Alors que le spécialiste maîtrise parfaitement la théorie régissant son domaine et qu'il en connaît parfaitement un grand nombre d'outils et de techniques, l'expert, à travers son expérience, en a acquis une parfaite maîtrise pratique.

A ce titre, l'expert est d'un apport certain aussi bien pour l'identification des risques et des mécanismes qui les régissent, qu'à leur évaluation voire à leur quantification.

A contrario, l'accessibilité et la transmission des compétences sont généralement plus difficiles pour un expert que pour un spécialiste. Alors que le spécialiste se sert de connaissances plus théoriques voire académiques, l'expert, de par son expérience du domaine et de son application sur le terrain, n'a plus véritablement besoin de formaliser ses raisonnements. Il ne le fait donc pas spontanément.

Ce travail de formalisation voire de modélisation des raisonnements des experts dépend largement de l'animateur du comité d'expert, spécialiste en la matière. Différentes techniques existent parmi lesquelles nous pouvons citer la confrontation de différents raisonnements d'experts réunis en comité.

Le débat d'experts, même antagonistes, permet ainsi de dégager les formalismes de base qui régissent les raisonnements de base de chaque expert. Dans la plupart des cas, un consensus se dégage.

Par ailleurs, il est indispensable que le comité d'experts couvre de manière exhaustive l'ensemble des disciplines concernées par le problème étudiée. Il est donc souvent indispensable de réunir, au sein du même comité d'experts, plusieurs disciplines, compte tenu de la complexité des phénomènes qui induisent le risque.

A titre d'exemple, il a été nécessaire de réunir au sein du comité d'experts « mines de fer de Lorraine » des experts géotechniciens, des hydrogéologues, des spécialistes du bâti, des géographes et des aménageurs.

Généralement, un tel comité d'experts pluridisciplinaire est donc évolutif. De nouvelles compétences sont intégrées en son sein au fur et à mesure de la progression de l'étude et de l'accroissement de la connaissance des phénomènes.

Signalons enfin le rôle primordial du comité d'experts dans l'identification des critères qui régissent l'analyse, l'évaluation et la hiérarchisation du risque.

Avec l'aide de l'animateur du comité d'experts, ce dernier élabore en fait une famille cohérente, c'est-à-dire exhaustive et non redondante de critères ainsi que leurs méthodes de renseignement.

3.3 IDENTIFICATION DES RISQUES

L'INERIS a élaboré un guide méthodologique abordant les différents problèmes qui doivent être pris en compte lors de la constitution d'un dossier d'arrêt de travaux miniers souterrains pour le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (INERIS-DRS-01-25750/R01 d'avril 2001). Ce guide recense, de manière aussi exhaustive que possible, les problèmes environnementaux et de sécurité qui peuvent se poser lors de l'arrêt et la fermeture d'exploitations minières souterraines.

La présente étude des risques résiduels d'un ancien bassin minier est tout naturellement issue de ce guide méthodologique. Les différents risques associés à la présence d'un bassin minier seront succinctement présentés. Une description plus détaillée est fournie dans le rapport précédemment cité.

3.3.1 Risques géotechniques

3.3.1.1 Risques liés à la stabilité des terrains de surface à l'aplomb de travaux souterrains

3.3.1.1.1 L'affaissement

a) Mécanisme et phénomène

Les éventuels phénomènes d'instabilité susceptibles d'affecter les terrains de surface à l'aplomb des travaux souterrains prennent naissance au sein des travaux souterrains (Piguet et Wojtkowiak, 2001). Ils se manifestent par la dislocation et la chute du toit ou des parements des cavités. Les terrains s'effondrent en blocs de tailles et de formes variables qui s'entassent aléatoirement en laissant entre eux des vides résiduels. Une fois effondrés, les terrains occupent, de ce fait, un volume plus important que celui qu'ils occupaient dans leur état naturel initial : c'est le phénomène de foisonnement.

Lorsque le foisonnement est insuffisant pour combler le vide exploité, les terrains sus-jacents viennent s'appuyer sur les terrains foudroyés en gardant leur continuité. Ils se tassent progressivement en compactant la partie foudroyée.

Le tassement progressif des terrains constituant le recouvrement se manifeste en surface par un abaissement de la surface qui se poursuit jusqu'à l'établissement d'un nouvel état d'équilibre stable dans le temps.

On parle d'**affaissement minier**, au sens large, lorsque le réajustement de la surface se fait de façon **souple et progressive**, en formant une dépression topographique, **sans rupture** cassante importante, avec une allure de **cuvette** (*Figure 1*). Généralement, ce type de manifestation ne concerne que les exploitations situées à grande profondeur et présentant des extensions horizontales importantes.

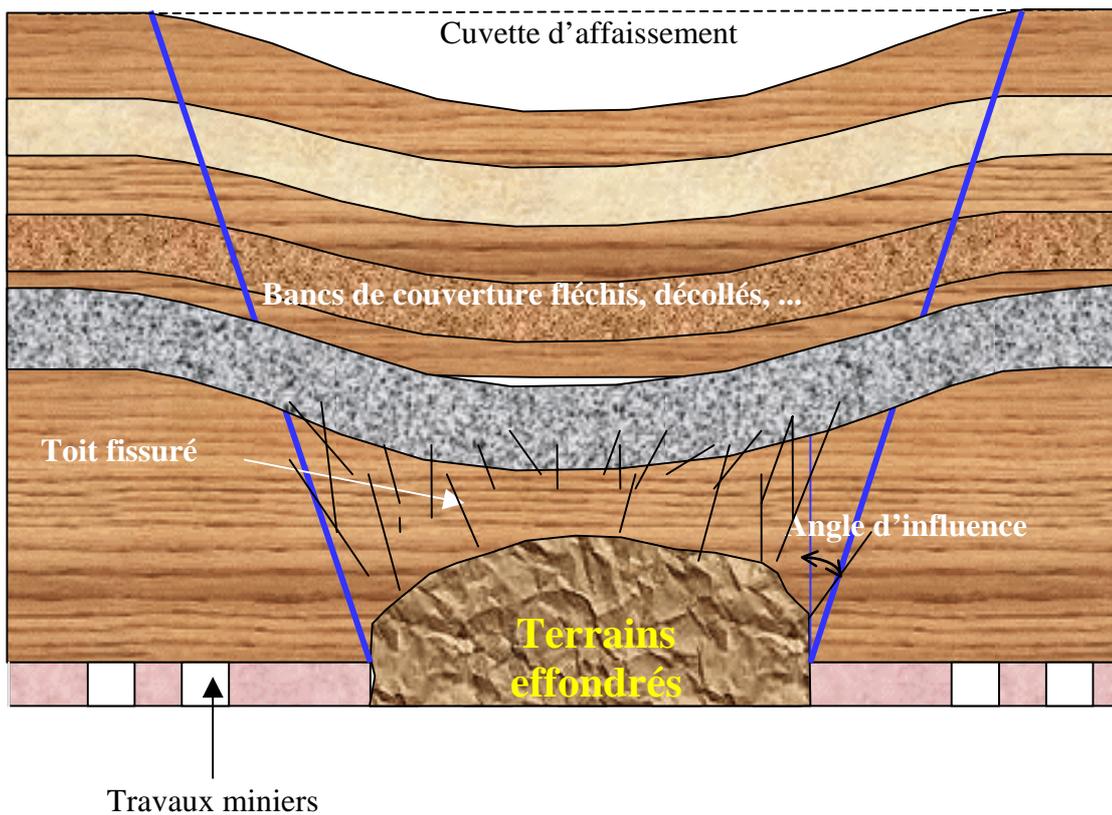


Figure 1 : Formation d'une cuvette d'affaissement au-dessus de travaux miniers souterrains.

b) Conséquence des affaissements miniers sur l'environnement

Généralement, les conséquences les plus dommageables sont celles qui affectent la stabilité des bâtiments et infrastructures de surface. En terme de dégradation du bâti, ce ne sont pas tant les affaissements à proprement parler (déplacements verticaux) que les déformations du sol (déplacements horizontaux, flexions...) qui sont les plus à craindre. Les dommages consécutifs aux déformations du sol sont en relation avec :

- la longueur des ouvrages qui les subissent (les bâtiments longs sont les plus sensibles) ;
- leur position par rapport à la cuvette (ceux qui sont proches du point d'inflexion de la courbe d'affaissement sont les plus vulnérables) ;
- la nature du sol et des fondations ;
- les tolérances des constructions (présence de joints de dilatation, déformabilité des matériaux...).

Si elles peuvent s'avérer importantes durant la phase d'exploitation, les déformations induites durant la phase post-exploitation sont en général très limitées. Les conséquences induites sur la stabilité des terrains et des infrastructures de surface sont donc, dans la plupart des cas, négligeables, voire nulles.

3.3.1.1.2 L'effondrement

a) Mécanismes et phénomènes

Par opposition au phénomène d'affaissement, on parle d'**effondrement** lorsque l'abaissement de la surface se fait de manière **discontinue** dans le **temps** (événement rapide et brutal) et/ou dans l'**espace** (formation de fractures, de figures d'arrachement, de cratères...).

Les effondrements se caractérisent par un mouvement gravitaire à composante essentiellement verticale qui peut atteindre une amplitude sensiblement égale à la hauteur de la cavité sous-jacente ou de l'ouverture de la couche exploitée. Ce sont des phénomènes très spécifiques qui ne peuvent affecter que les mines souterraines exploitées par une technique permettant la persistance de vides souterrains.

On différencie classiquement différents types d'effondrement en fonction de l'ampleur du phénomène, du contexte géologique, hydrogéologique et d'exploitation.

Le fontis

On appelle **fontis**, une instabilité localisée qui s'initie par l'éboulement du toit d'une cavité souterraine d'assez faible extension et située à faible profondeur. Le phénomène, qui ne peut se stabiliser dans la configuration d'une cloche stable par effet voûte, finit par déboucher brusquement en surface en créant un "entonnoir" dont le diamètre peut varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classiquement observé en surface.

Les fontis se développent préférentiellement dans des zones où le toit présente de larges portées non soutenues (carrefours de galerie, piliers ruinés, chambres vides ou seulement partiellement remblayées). La présence d'un recouvrement peu épais constitué de matériaux peu cohérents et faiblement résistants (ex : sable, marnes ...) facilite la propagation de l'instabilité vers la surface et donc l'apparition du fontis.

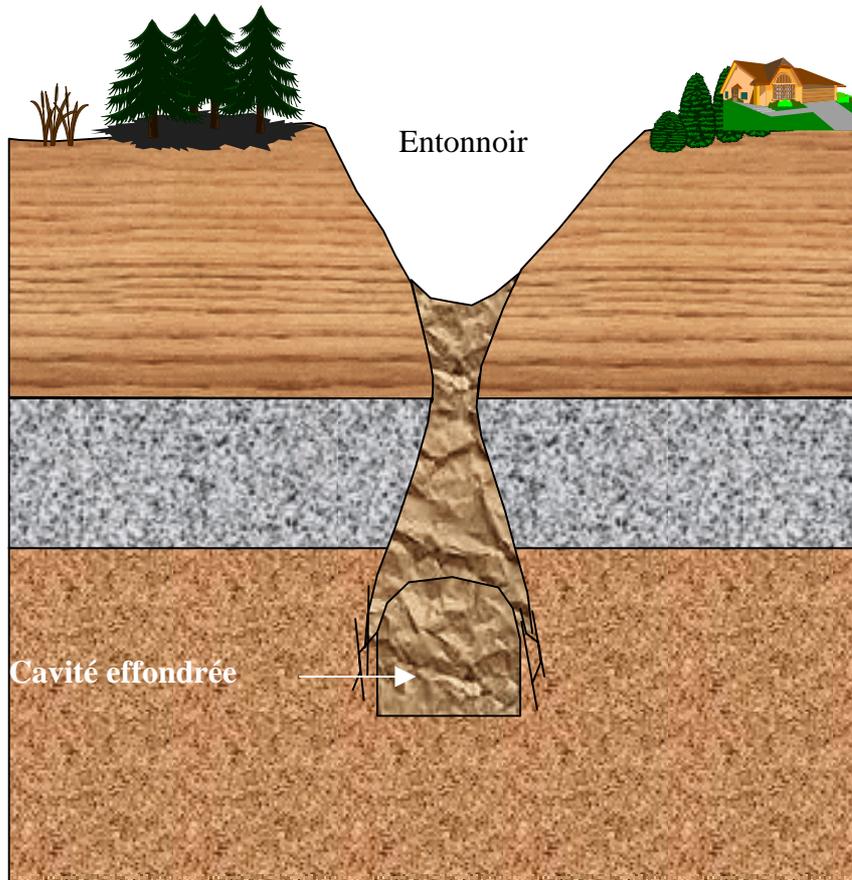


Figure 2 : Formation d'un fontis au-dessus d'une cavité minière effondrée.

L'effondrement en masse

L'effondrement en masse caractérise une rupture franche des terrains de surface résultant de la ruine des travaux sous-jacents sur une surface importante. Les mécanismes susceptibles d'initier ce type de phénomène diffèrent suivant le type d'exploitation et la nature du massif environnant (rupture du toit de surface ou d'un pilier-couronne ; rupture d'un parement dans une exploitation filonienne en dressant ; rupture du toit dans le cas d'exploitation par chambres vides ou par piliers abandonnés lorsque ces derniers sont à l'état de ruine).

On parle parfois d'effondrement "localisé" lorsque cette rupture n'affecte qu'une zone d'extension très limitée au fond et donc en surface, et d'effondrement "généralisé" lorsque l'effondrement affecte une vaste surface.

Contrairement aux fontis, les effondrements peuvent, dans certains cas, survenir au surplomb d'exploitations assez profondes (jusqu'à 200 mètres).

b) Conséquences sur l'environnement

Beaucoup moins fréquents que les affaissements, les effondrements peuvent présenter des conséquences plus graves. Ils peuvent, en effet, engendrer la destruction de bâtiments ou d'infrastructures (voire exceptionnellement la perte de vies humaines) lorsqu'ils se

développent dans des zones sensibles ou urbanisées, ce qui, heureusement, n'est que rarement le cas.

Les conséquences au jour d'un entonnoir de fontis (phénomène généralement brutal) sont souvent limitées à une extension relativement faible (quelques mètres à quelques dizaines de mètres au maximum). Elles peuvent néanmoins s'avérer graves si elles se localisent sous une construction ou une infrastructure sensible.

Les manifestations au jour des effondrements en masse sont, pour leur part, très variables. Parfois limitées à des cratères guère plus importants qu'un entonnoir de fontis (effondrement localisé), ils peuvent également affecter des zones étendues de plusieurs hectares ou dizaines d'hectares (effondrement généralisé).

Les phénomènes peuvent être soit brutaux (ou spontanés) soit progressifs. Les effondrements spontanés sont les plus destructeurs. Ils sont accompagnés d'une importante libération d'énergie qui se manifeste notamment sous la forme d'ondes sismiques. Outre l'éboulement des travaux souterrains et la descente brutale des terrains de surface (susceptible de détruire les ouvrages et infrastructures au jour), l'effet de souffle d'air déplacé par le volume effondré (souvent plusieurs milliers de m³) peut être dévastateur. Lors de l'effondrement de la mine de fer de Rochonvilliers (1919), certains ouvriers au fond furent ainsi projetés à plus de 70 mètres. Des matériaux peuvent également être projetés des puits et galeries non obturés, mettant ainsi en danger les habitations environnantes.

Fort heureusement, ce type de phénomène n'est que très exceptionnel car il nécessite la combinaison de facteurs de sites spécifiques (présence de petits piliers élancés, couche résistante dans le recouvrement...). Dans de nombreux cas, la ruine des vides souterrains se fait pas étapes successives et n'induit qu'un abaissement progressif de la surface. Ceci n'empêche toutefois pas l'apparition de fractures ou de figures d'arrachement au niveau du sol susceptibles d'engendrer d'importantes dégradations aux bâtiments ou infrastructures situées en surface.

3.3.1.2 Risques liés à la stabilité des flancs d'exploitation à ciel ouvert

Plusieurs paramètres physiques ou d'exploitation sont susceptibles de jouer un rôle prépondérant sur la stabilité des flancs de fosse d'une exploitation à ciel ouvert. Parmi les principaux, on peut citer :

- les discontinuités géologiques (joints de stratification, failles, diaclases...) ;
- la nature du massif rocheux (caractéristiques physiques des matériaux, variations latérales de faciès, présence d'eau...) ;
- la géométrie des flancs de fosse (pente, hauteur de talus...) ;
- les sollicitations pouvant s'exercer sur les fronts de taille (charges, vibrations...).

Les combinaisons variées de ces différents facteurs peuvent engendrer de nombreuses manifestations d'instabilité qui sont généralement classées au sein de grandes catégories d'instabilité de pente. L'identification des différents types d'instabilité susceptibles d'affecter une exploitation est une étape fondamentale de l'analyse. Elle permet en effet de retenir les méthodes de mise en sécurité les plus adaptées à la configuration étudiée.

On divise les différents types d'instabilité en deux groupes principaux :

- les ruptures se développant traditionnellement dans les massifs rocheux fracturés. Les figures d'instabilité les plus caractéristiques sont alors les chutes de pierres ou de blocs, les ruptures de surplombs, les glissements plans ou dièdres, les glissements bilinéaires... ;
- les ruptures affectant les fronts constitués de matériaux plus tendres dont le comportement mécanique se rapproche plus de celui d'un sol. Les ruptures caractéristiques sont alors les glissements suivant une surface cylindrique ou les phénomènes d'érosion régressive.

3.3.1.3 Risques liés à la présence d'anciens ouvrages miniers débouchant au jour

Les puits, descenderies ou galeries d'accès abandonnés, encore ouverts ou simplement recouverts, présentent des risques évidents pour les populations et les activités humaines se situant dans leur zone d'influence directe. Les ouvrages remblayés de manière non satisfaisante par les anciens peuvent également, dans certaines configurations spécifiques, subir une remobilisation brutale des remblais susceptible d'affecter la stabilité de la surface. Pour faciliter l'identification des différents scénarios de rupture susceptibles d'affecter un ancien orifice minier, une analyse systématique des risques qui résultent de leur présence est menée ci-dessous.

3.3.1.3.1 Intrusions accidentelles ou forcées

Une chute accidentelle dans une ancienne descenderie fortement pentée, un plan incliné, une cheminée et, à plus forte raison, dans un puits non remblayé, peut entraîner des blessures graves et parfois même la mort de la personne. Outre le risque de chute, la présence de gaz nocifs dans des endroits très confinés peut entraîner l'asphyxie ou l'intoxication de l'intrus. Les noyades sont également parfois à craindre lorsque le puits ou les galeries susvisées sont remplis d'eau. Enfin, il faut noter que les visites de galeries inconnues peuvent présenter d'autres risques : se perdre dans les anciens travaux, déboucher sur un puits ou un bure ouvert, chutes de pierre ou de bloc du toit des galeries, risque d'asphyxie.

3.3.1.3.2 Affaissements

Les orifices miniers peuvent parfois engendrer une remobilisation souple de la surface des remblai ou, dans le cas d'un recouvrement peu cohérent, de la zone qui les environne.

De nombreux puits par exemple ont été intégralement remblayés sans que leur tête n'ait été convenablement mise en sécurité. Un tassement différé de la colonne de remblai conduit alors à une remobilisation lente et progressive de la surface qui peut, si elle atteint des proportions suffisantes, endommager certaines des structures présentes dans la zone d'influence. Plusieurs causes sont susceptibles d'être à l'origine de ces tassements différentiels (NCB, 1982) :

- une surcharge de la surface à l'aplomb ou aux environs de la tête du puits (stockage de matériau exploité, passage d'un engin lourd, construction de structures...);
- une remobilisation des terrains encaissants résultant d'une reprise d'affaissement affectant les anciens travaux miniers environnants ;
- certaines vibrations engendrées par des explosions ou tirs de mine proches de l'orifice ou par une circulation routière trop intense ;

- une perte de stabilité due à l'influence de l'eau (déjaugage de la base de la colonne de remblai lors de la remontée de la nappe ou saturation des remblais et mise en charge de la colonne résultant d'arrivées d'eau de la surface).

3.3.1.3.3 Effondrements

Moins fréquents que les affaissements, les effondrements peuvent présenter des conséquences plus graves lorsqu'ils interviennent dans des zones sensibles. Les effondrements de puits ou de descenderies se matérialisent généralement par l'apparition soudaine de fontis dont le diamètre varie classiquement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Dans une configuration exceptionnelle (présence de terrains bouillants proches de la surface), un cas particulier a mis en évidence un entonnoir d'effondrement dont le diamètre avoisinait les 100 mètres (Poirot, 1991).

L'effondrement de la surface qui entoure un orifice minier peut résulter :

- du débouillage de la colonne de remblai (remobilisation brutale et dynamique des remblais qui descendent brusquement et s'engouffrent dans les accrochages du puits et les anciens travaux, générant ainsi un effondrement de la surface) ;
- de la rupture de la fermeture de l'orifice. Certains anciens puits ou galeries ont, en effet, été obturés d'une manière artisanale ne présentant ainsi aucune garantie de pérennité (platelages de bois...) ;
- de la rupture du revêtement du puits ou de la galerie (fatigue du revêtement et/ou augmentation de la poussée des terrains encaissants) ;
- de la rupture des terrains environnants (propagation jusqu'en surface de fontis initiés au toit d'une galerie peu profonde...).

3.3.1.3.4 Risques liés à la présence de gaz

Certains vides miniers présentent des concentrations élevées en gaz nocifs ou explosibles. Outre les risques liés à l'inflammabilité du grisou (CH_4) dans les anciens ouvrages des mines de charbon ou à la périphérie de ceux-ci, on notera les dangers d'asphyxie pour les personnes qui pénètrent dans des cavités dont l'atmosphère présente un déficit en oxygène (du fait d'une accumulation de CH_4 ou CO_2) et les risques d'intoxication qu'elles encourent si elles inhalent des gaz comme CO ou H_2S à des teneurs trop élevées.

Les risques principaux apparaissent lorsque les gaz toxiques ou inflammables qui s'étaient accumulés dans des poches souterraines, migrent vers la surface et viennent s'accumuler dans des vides non ventilés (culs-de-sac de galerie, caves d'habitation, réseaux d'égout).

3.3.1.3.5 Risques liés à la présence d'eau

L'arrêt des exploitations minières peut engendrer certains problèmes de qualité des eaux et de régime hydraulique. Compte tenu des volumes respectifs, la part prise par les anciens travaux, en terme d'altération de la qualité des eaux, est nettement supérieure à celle imputable aux puits ou galeries.

On notera néanmoins que l'utilisation de puits abandonnés comme décharge sauvage peut suffire à rendre une eau impropre à la consommation lorsque des déchets toxiques sont situés dans la zone d'écoulement. On veillera donc, pour remblayer les anciens ouvrages, à utiliser des matériaux ne présentant aucune nocivité et contenant des teneurs faibles en minéraux oxydables.

Certains puits passent au travers de nappes aquifères utilisées pour l'alimentation en eau des populations. Dans ce cas, il est nécessaire d'isoler ces niveaux exploitables des anciens travaux afin de leur éviter de se souiller au contact du matériau exploité ou de se mélanger à des eaux de mauvaise qualité provenant d'autres aquifères.

Enfin, certains anciens orifices peuvent servir de circuits privilégiés pour les remontées des eaux. Ils facilitent ainsi parfois les résurgences dans des zones urbanisées mal adaptées à des déversements d'eau.

Ces résurgences ne se produisent pas toutes forcément lorsque le niveau de l'eau atteint la cote de ces ouvrages ; elles peuvent, dans certains cas, survenir lorsque le niveau de l'eau atteint une cote supérieure et que la pression devient alors suffisamment importante pour faire se rompre un bouchon soit naturel, soit artificiel (mur ou remblais situés dans une ancienne galerie non répertoriée par exemple).

Dans ce cas, aux inconvénients précédemment cités, s'ajoutent les risques pour la sécurité des biens et des personnes liés à l'apparition brutale d'un flux d'eau non contrôlé.

3.4 DÉFINITION D'UNE SECTORISATION VIS-À-VIS DU RISQUE

La sectorisation, généralement spatiale pour l'analyse et la hiérarchisation des risques résiduels liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier, est utilisée afin de réduire la complexité du problème. Elle permet la définition d'un zonage à *comportement homogène* vis-à-vis d'un ou de plusieurs critères régissant le risque.

La définition d'une sectorisation est donc directement dépendante des différents critères définies plus loin ainsi que de leurs méthodes de renseignement et inversement. La mise au point d'une telle sectorisation passe donc nécessairement par une approche itérative, menée en parallèle avec la mise au point des critères.

Ainsi, à titre d'exemple, nous avons défini des zones dites « homogènes » pour l'analyse et la hiérarchisation des zones à risque du bassin ferrifère lorrain (cf. annexe). Il s'agit de zones ayant des caractéristiques géologiques, géotechniques et d'exploitation similaires vis-à-vis des critères régissant l'éventualité d'un effondrement d'une zone d'exploitation au fond.

3.5 CRITÈRES

Le choix d'une famille de critères de hiérarchisation du risque suit un processus séquentiel décrit ci-après.

3.5.1 Identification des critères

1. *Identification des paramètres impliqués dans l'explication du risque d'affaissement minier.* Les paramètres issus de la phase d'identification des risques (chapitre 2.3) peuvent ne pas avoir la même importance dans l'explication du risque.

Pour cette raison, nous proposons de pointer, pour chaque caractéristique, selon le modèle de matrice présentée figure 3, la case où elle intervient dans l'explication du risque :

- l'intensité d'un phénomène ;
- la probabilité d'occurrence ou la prédisposition ;
- l'importance des enjeux ;
- la vulnérabilité des enjeux.

Cette étape permet aux experts de débattre sur la manière de renseigner les caractéristiques, sur la place de chaque caractéristique dans l'explication du risque et donc sur la pondération, ainsi que sur l'éventualité de séparer ces caractéristiques par phénomène envisagé (ceci implique l'utilisation de familles de critères différentes selon le phénomène attendu en surface).

Risque		Aléa		Domage	
		<i>Intensité</i>	<i>Probabilité d'occurrence ou Prédisposition</i>	<i>Importance des enjeux</i>	<i>Vulnérabilité des enjeux</i>
Renseignement du risque					
Caractéristiques		O			
		O	O		

O : Paramètre qui intervient dans l'explication de la composante du risque pointée.

Figure 3. Matrice Caractéristique/ Risque

2. *Identification des paramètres renseignables compte tenu de l'état de la connaissance et des données disponibles.* Il s'agit de préciser, de manière concrète, la façon dont les paramètres peuvent être renseignés. Ainsi, de l'ensemble des paramètres intervenant dans l'explication du risque, on sélectionne l'ensemble des paramètres renseignables, pour lequel il est nécessaire de préciser le mode de renseignement (sous forme de formule, de manière descriptive, sous forme de mesure, etc.) et la source de renseignement (littérature, plan, etc.).
3. *Constitution d'une famille de critères de hiérarchisation du risque* (figure 4). Les paramètres identifiés ont pour objet de décrire le risque sous ses multiples facettes, et vont servir à (i) découper le bassin de risque étudié en autant de zones que nécessaire (ensemble de zones homogènes), (ii) évaluer le risque sur chaque zone, (iii) comparer les zones entre elles. Pour s'assurer de la pertinence de la famille de critères sélectionnée, trois exigences logiques sont à satisfaire :
 - exigence d'exhaustivité ;
 - exigence de cohésion (le critère doit exprimer l'aspect du risque pour lequel il est défini) ;
 - exigence de non-redondance.

Le choix des paramètres, qui serviront à la définition de zones dites homogènes, suit un processus itératif qui s'affinera au cours de la sélection de la famille de critères de hiérarchisation. Notons que le découpage en zones homogènes doit rester dans la limite de l'étendue de l'événement étudié. Ainsi, une segmentation trop fine pourrait nuire à l'évaluation du risque (exemple : une zone homogène limitée à un pilier).

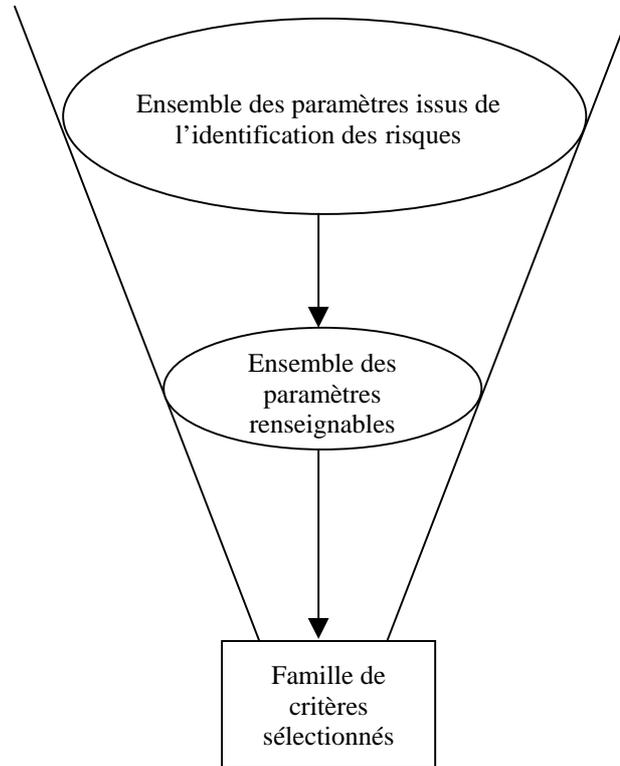


Figure 4. Sélection d'une famille de critères pour la hiérarchisation du risque

Le processus de passage d'une liste de paramètres agissant sur la définition du risque d'effondrement minier, et le choix d'une famille de critères est assez complexe. Ce processus est influencé par plusieurs paramètres (figure 5) tels que : le niveau de détail recherché, le niveau de détail des données disponibles, l'échelle de l'étude, le niveau de connaissance actuel.

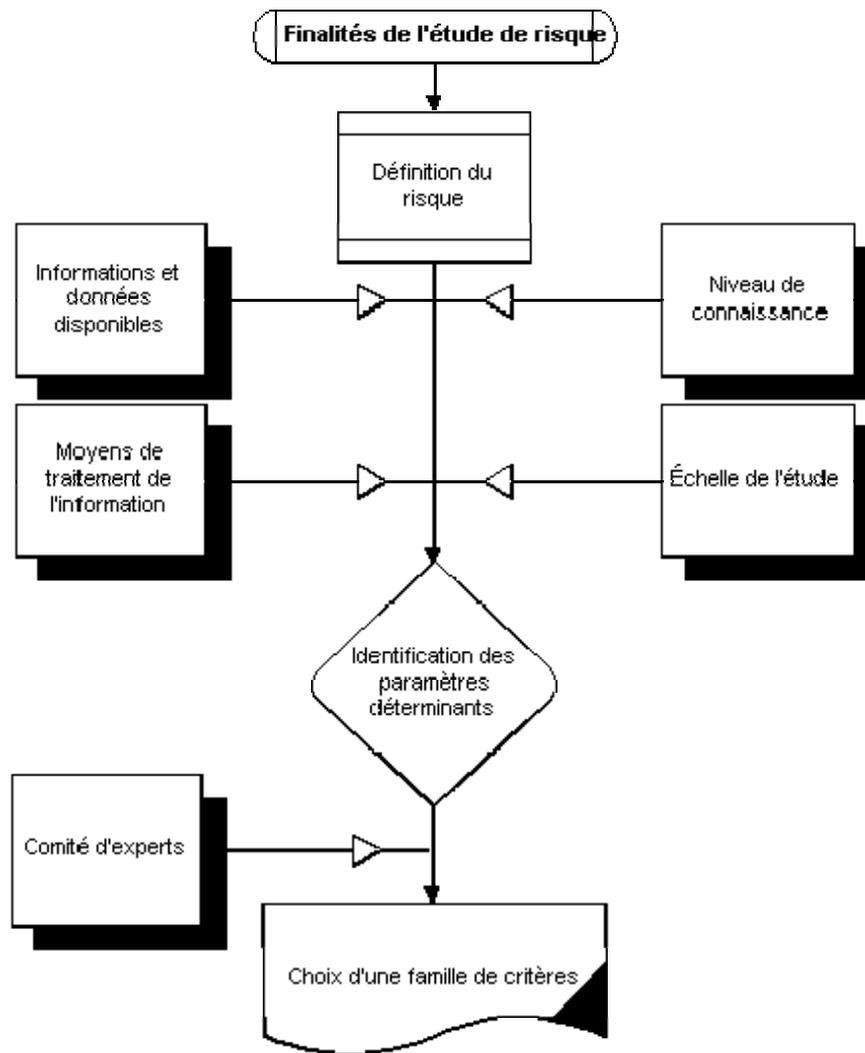


Figure 5. Processus de choix de la famille de critères

La mise en évidence d'une famille de critères de natures différentes souligne l'approche « multicritère » de la méthode. La procédure d'affectation d'une zone à une classe de risque nécessite une « agrégation » des informations, opération qui peut s'avérer complexe lorsque le nombre de critères est élevé.

Nous avons opté pour la méthode d'aide multicritère à la décision ELECTRE TRI (annexe 1) afin d'agrèger les performances d'une zone à risque et de l'affecter à l'une des classes de risque prédéfinies.

3.5.2 Pondération des critères

Chaque critère de la famille de critères sélectionnée joue un certain rôle dans l'explication du risque : ceci est renseigné à travers la notion de « poids ».

La détermination des poids peut être entreprise selon différentes méthodes. A titre d'exemple, on peut citer les méthodes du type Simos révisée (annexe 2).

Cette méthode dite « des cartes » facilite la communication avec les experts et consiste à associer à chaque critère une carte. Chaque expert est alors invité :

- à ordonner les critères du moins important au plus important avec la possibilité d'ex aequo ;
- à insérer des cartes blanches afin d'indiquer l'importance entre les critères de rangs successifs ;
- à indiquer un rapport entre le critère le plus important et le critère le moins important.

Les avantages de la méthode révisée de Simos sont d'éviter que des critères soient éliminés en leur attribuant un poids nul et de prendre en compte différentes pondérations données par des intervenants en fonction de leurs intérêts et de leurs domaines de compétence respectifs.

Quelle que soit la méthode de pondération retenue, cette phase doit être entreprise en deux temps : individuellement (expert) et collectivement (comité d'experts). Les entretiens individuels permettent à chaque expert d'imposer une vision de la problématique fortement orientée par leur spécialité et leur expérience personnelle. Quant à la partie effectuée en présence du comité, elle a non seulement pour effet de faire *partager* les expériences des différents acteurs, mais aussi de *valider* les représentations individuelles et d'arriver, éventuellement à une représentation globale qui emporterait la majorité.

3.5.3 Renseignement des critères

Une attention particulière doit être portée sur la manière de renseigner les critères, c'est-à-dire la procédure d'évaluation des critères pour chaque secteur. Il convient d'établir une notice explicative qui permet l'évaluation des critères de façon objective et explicite.

3.6 CALCULS

Comme pour tout modèle, il convient de s'assurer de la pertinence du modèle établi. Pour chaque zone à risque, il convient d'effectuer des analyses de sensibilité en faisant varier les incertitudes et les poids. Ce type d'analyse a pour objet de cerner les domaines de validité des conclusions concernant l'affectation des zones aux classes de risque.

Les conclusions de la hiérarchisation du risque représentent une base de concertation et de réflexion soumises à un comité d'experts dont le rôle est de valider ou de remettre en question la classification des zones. Des analyses statistiques et les rétro-analyses menées en phase informative viennent compléter cette démarche de contrôle.

3.7 CHOIX DE LA CLASSIFICATION

Les résultats d'une étude de risque varient selon la manière d'envisager, voire de formuler, le problème. Elle peut avoir pour objectifs de :

- chercher la meilleure zone possible parmi un ensemble de zones (ex : choix d'implantation d'un projet d'aménagement) ;
- établir un ordre sur l'ensemble des zones (ex : aide à la planification de travaux de mise en sécurité) ;
- affecter des zones dans des classes définies a priori (ex : cartes d'aléa ou de risque) ;
- aider à formuler et décrire un problème sans le résoudre.

La méthode proposée s'appuie sur l'identification de critères et la comparaison de zones renseignées sur l'intégralité de ces critères. Sa dernière phase correspond au choix de la classification et de l'affichage attendus. A ce jour, nous avons essentiellement employé cette méthode à des fins cartographiques d'affichage de classes de risque ou d'aléa (voir partie 4 : application de la méthode au bassin ferrifère lorrain).

Le choix de la classification est une action concertée entre les acteurs identifiés de l'étude. Il s'appuie sur les objectifs et les moyens de gestion disponibles.

4. APPLICATION DE LA MÉTHODE AU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

Les travaux de recherche menés par l'INERIS dans le cadre du thème 4 du programme de recherche EAT-DRS-03 depuis 1999, ont permis de développer une méthode d'analyse et de hiérarchisation des risques liés à l'exploitation d'un ancien bassin minier. Nous avons appliqué cette méthode afin d'analyser et de hiérarchiser les zones à risque d'effondrement au-dessus des exploitations partielles des anciennes mines de fer de Lorraine.

Compte tenu de l'urgence de la demande et des contextes politique, médiatique et sociétale, l'analyse du cas concret posé par des mines de fer de Lorraine et les réflexions sur les méthodes ont été menées simultanément. Ainsi l'application présentée dans les pages suivantes n'a pas suivi exactement la méthode formalisée dans les paragraphes précédents, néanmoins le lecteur pourra facilement y retrouver les étapes principales.

Le présent document est fondé sur des rétro-analyses d'accidents et de résultats empiriques ainsi que sur un état actuel des connaissances et des recherches dans les nombreux domaines concernés (géologie, géotechnique, rhéologie, géochimie, réglementation, technologie et informatique). Il ne constitue donc pas, de fait, une référence méthodologique unique et figée. En effet, il reste bien évidemment ouvert à toutes évolutions et modifications consécutives à l'acquisition de nouveaux résultats théoriques et/ou expérimentaux à venir.

4.1 CONTEXTE DU BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN – PHASE INFORMATIVE

Ce chapitre illustre le contenu de la phase informative décrite au chapitre 3.1. Sans être exhaustif sur les informations disponibles relatives au bassin ferrifère lorrain, ce chapitre indique l'étendue des sources d'information à recueillir.

4.1.1 La Lorraine minière

DOMAINE MINIER (FER, SEL, CHARBON) EN LORRAINE

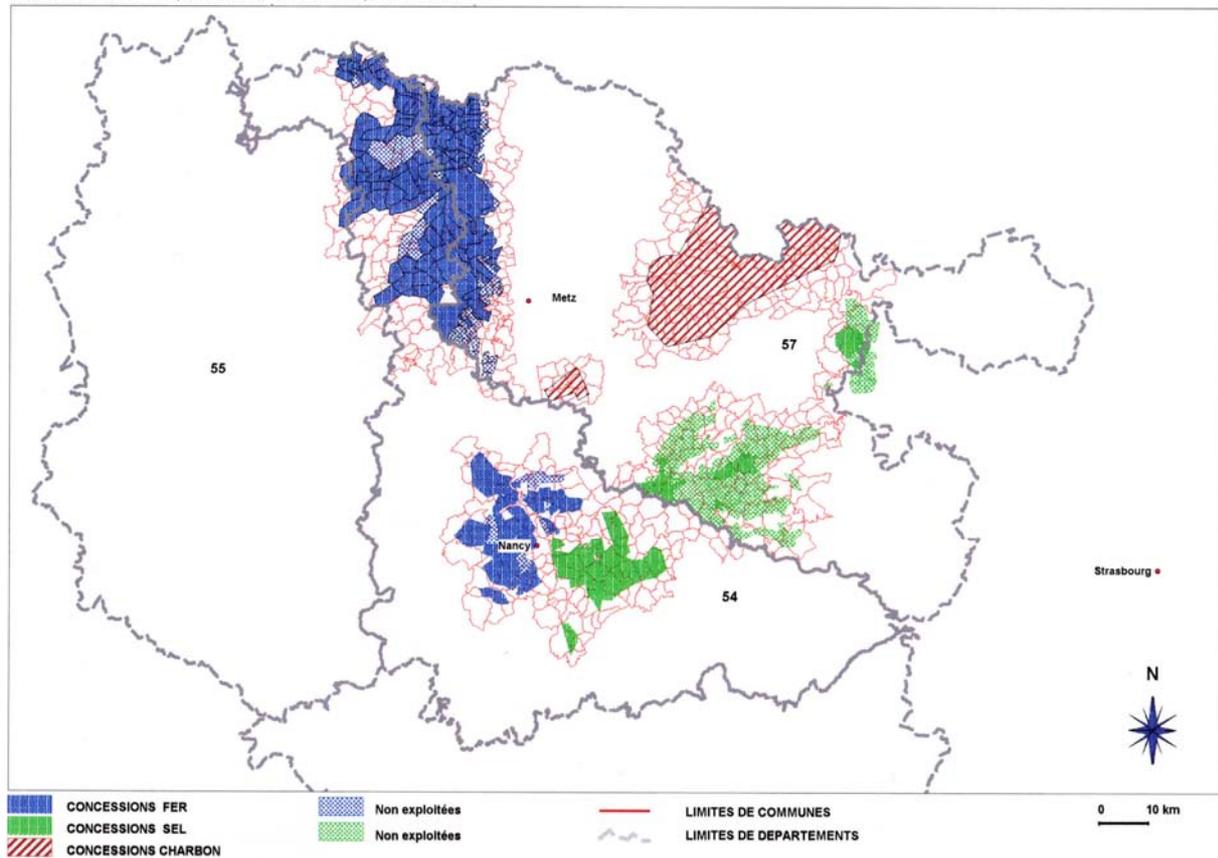


Figure 6 : Carte des exploitations minières de Lorraine.

La Lorraine a été l'une des plus importantes régions minières françaises (figure 6).

Des ressources stratégiques comme le sel, le fer et le charbon y ont été et sont encore exploitées pour le sel et le charbon.

Pour chacune de ces ressources, un peu plus d'un siècle d'exploitation industrielle a profondément marqué l'économie, la sociologie et le paysage de cette région.

4.1.2 Le bassin ferrifère lorrain

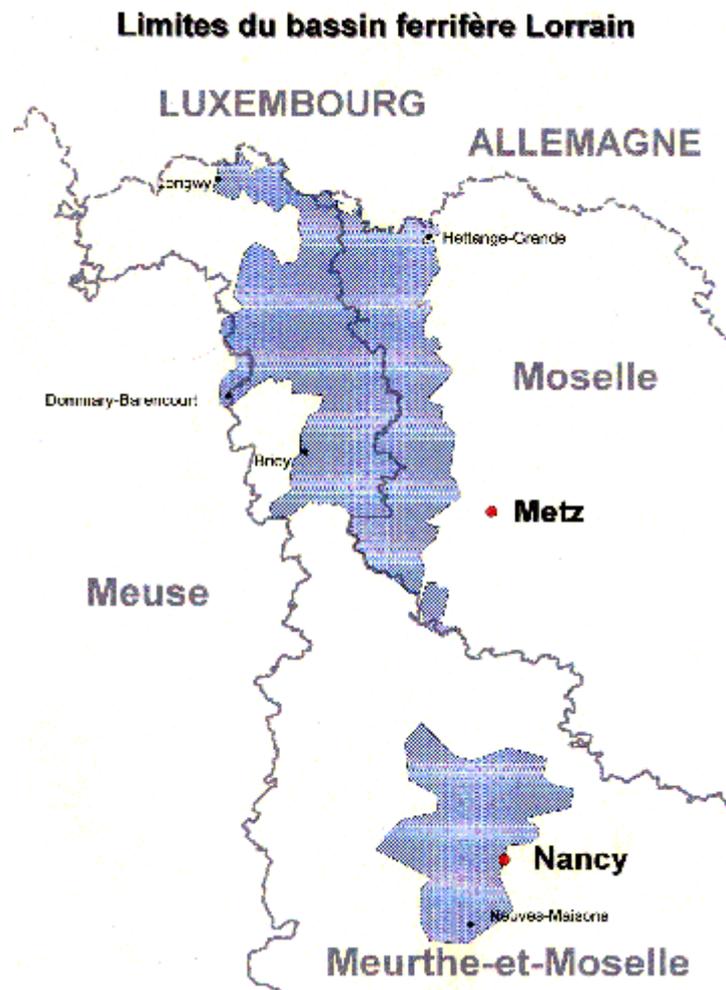


Figure 7 : Limites du bassin ferrifère lorrain.

Le bassin ferrifère s'étend sur 120 km de long, entre la frontière luxembourgeoise au Nord et Neuves-Maisons au Sud de Nancy, et sur 30 km de large entre Hettange-Grande à l'Est et Dommary Barancourt à l'Ouest.

Il est divisé en deux parties principales (figure 7) :

- le bassin de Briey-Longwy au Nord, couvrant 1300 km² ;
- le bassin de Nancy au Sud, couvrant 380 km².

4.1.2.1 Coupe Sud-Ouest / Nord-Est du bassin ferrifère lorrain

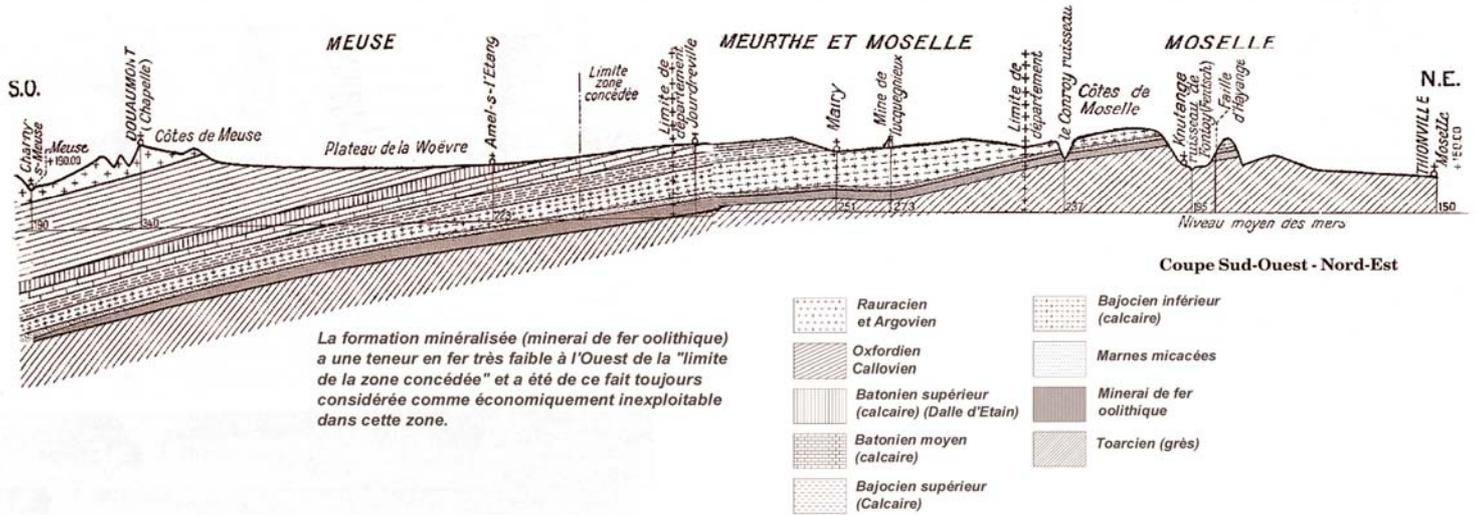


Figure 8 : Coupe sud-ouest / nord-est du bassin ferrifère lorrain

Le gisement de fer affleure au Nord dans les vallées de la Chiers et de l'Alzette, et à l'Est dans les vallées de la Fensch et de l'Orne. Il s'enfonce avec un pendage de l'ordre de 3 % vers l'Ouest. La mine d'Amermont-Dommary située à l'Ouest près de Dommary-Barancourt était la plus profonde car exploitée à une profondeur de 260 m.

4.1.2.2 Coupe de la formation ferrifère

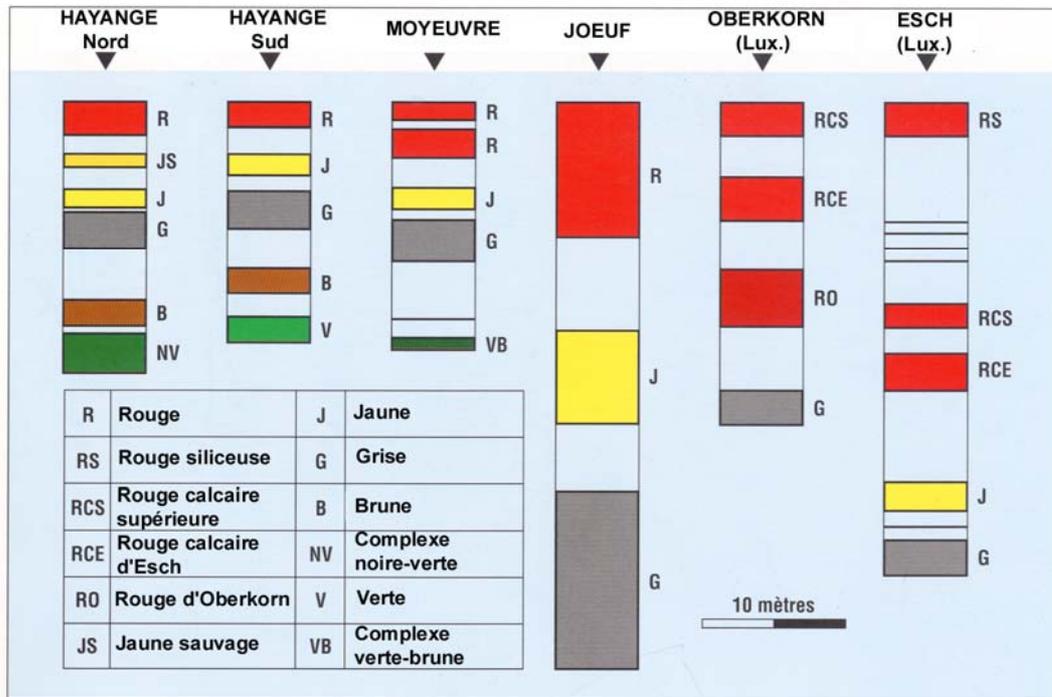


Figure 9 : Coupes du gisement ferrifère en plusieurs sites du bassin.

Le gisement de fer d'âge aalénien a une épaisseur variant de quelques mètres seulement à près d'une soixantaine de mètres. Il est composé d'une alternance d'horizons plus riches en fer (30 à 35 %) appelés couches et d'horizons moins riches appelés intercalaires.

On retrouve, sur l'ensemble du gisement, les différentes couches désignées par une couleur mais avec des teneurs et des épaisseurs très variables. Selon les mines, une ou plusieurs couches (jusqu'à 6) ont été exploitées au même endroit (figure 9).

4.1.2.3 Production du minerai de fer lorrain

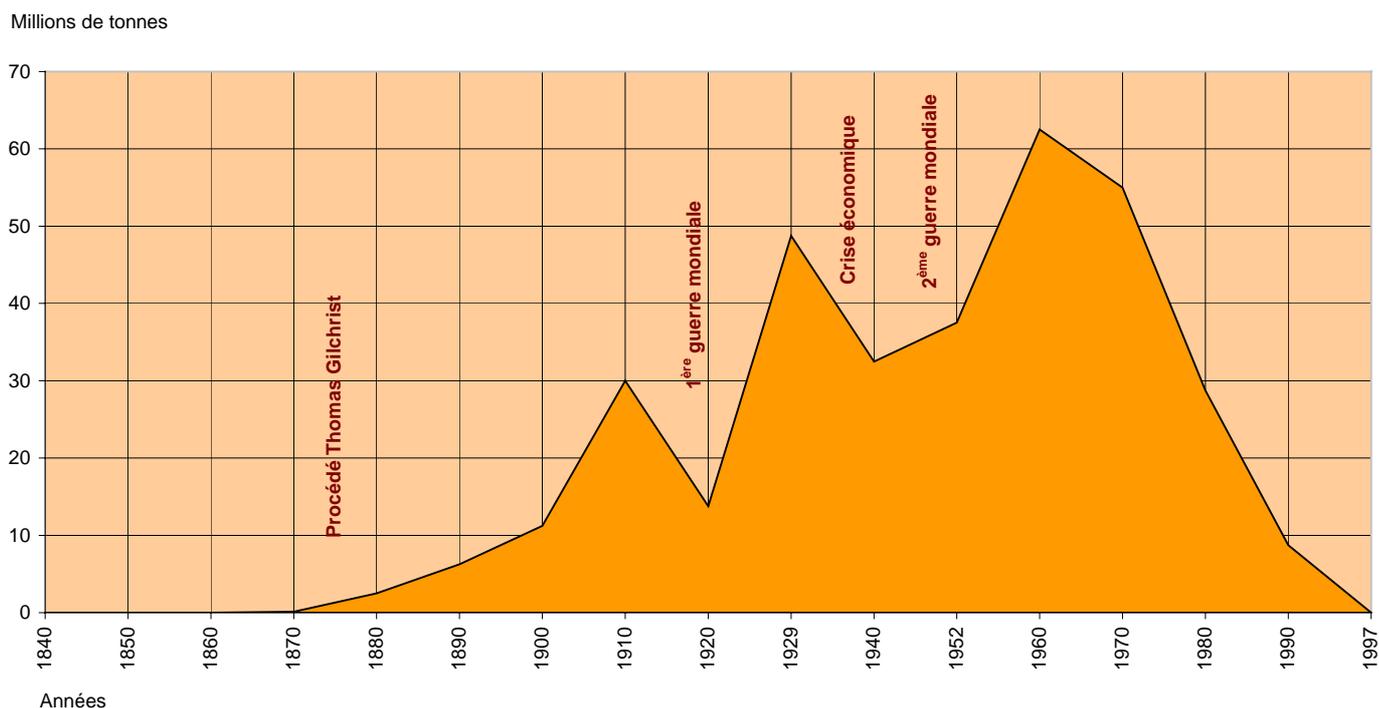


Figure 10 : Production de minerai de fer lorrain appelé minette lorraine

Du gisement lorrain, ont été extraites plus de 3 milliards de tonnes de minerai (figure 10). Si des vestiges attestent d'une exploitation dès le haut Moyen-Age, l'exploitation industrielle ne commence qu'après l'invention, en 1877, du procédé Thomas Gilchrist qui permet de déphosphorer la minette lorraine.

La production annuelle augmente alors malgré les chutes de production et de productivité liées aux événements mondiaux pour atteindre un maximum de près de 63 millions de tonnes en 1960. La production baisse ensuite du fait de la concurrence des minerais riches importés et de l'évolution de la sidérurgie. La dernière mine, des Terres Rouges, exploitée par l'ARBED, a arrêté sa production en juillet 1997.

4.1.2.4 Schémas des premières exploitations (XIX^{ème} siècle)

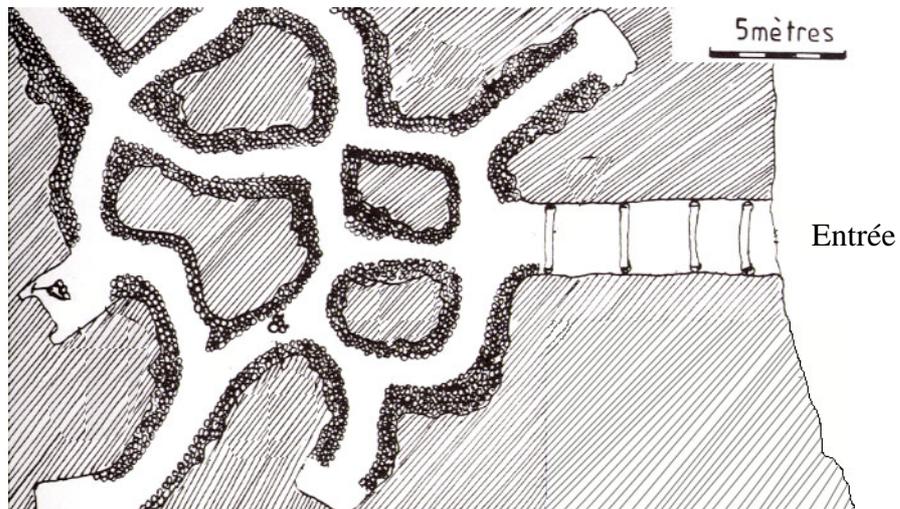


Figure 11 : Schéma d'une ancienne exploitation

Les premières exploitations étaient menées à partir de l'affleurement de la couche en s'enfonçant progressivement et en laissant des piliers de soutien, de forme et de taille très diverses. Les galeries sont partiellement remblayées avec des blocs de stérile empilés pour soutenir le toit.

Ces travaux miniers sont généralement mal connus du fait de leur caractère artisanal et de leur ancienneté.

4.1.2.5 Exploitation par dépilage

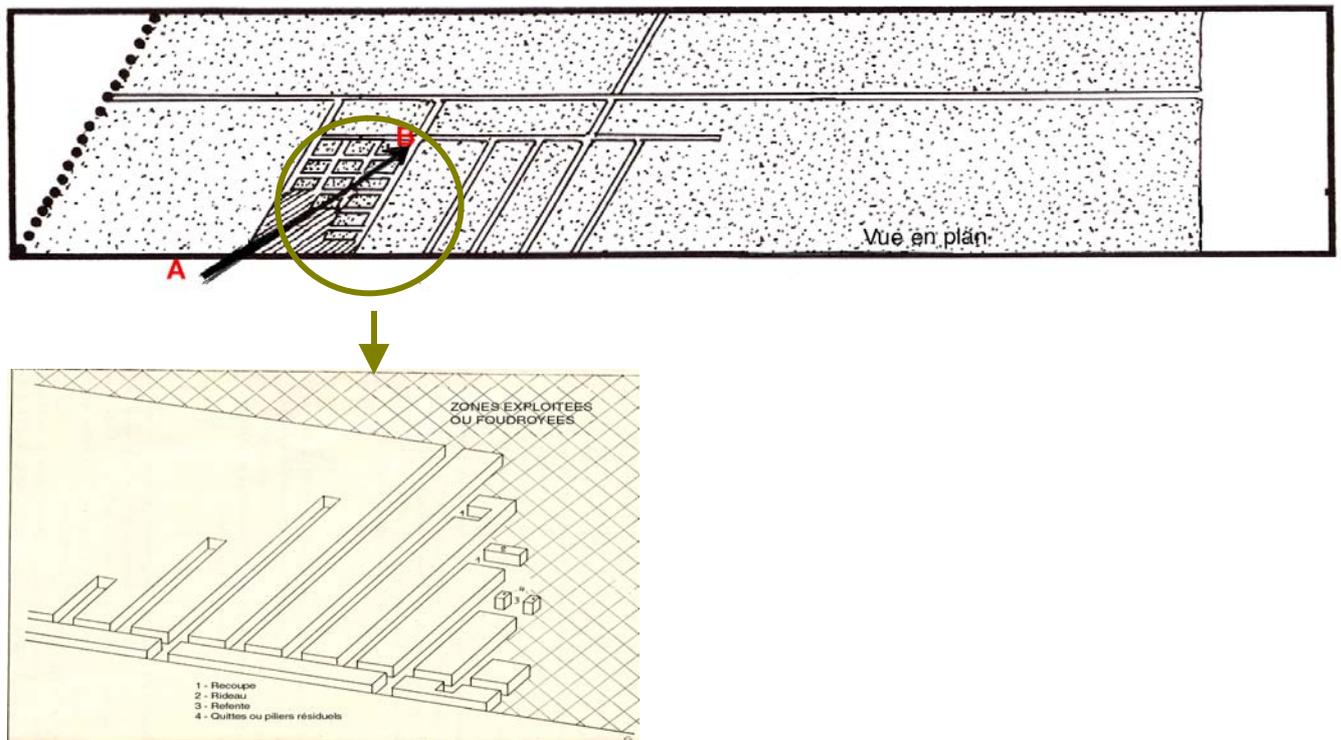


Figure 12 : Schéma d'exploitation par dépilage

Après la première guerre mondiale, les méthodes d'exploitation modernes peuvent être classées en 2 catégories selon qu'elles laissent ou non subsister des vides souterrains importants.

Les exploitations par dépilage intégral consistent à découper le gisement en panneaux, à partir des voies d'infrastructure. Dans les panneaux sont tracées des chambres, de l'ordre de 5 m de large, découpant des piliers longs de 15 à 20 m.

Ces piliers sont repris dans l'opération de dépilage pour ne laisser subsister que des "quilles". Ces piliers résiduels sont finalement abattus à l'explosif (torpillage) pour faire effondrer le toit immédiat de la couche.

La hauteur des terrains foudroyés au toit est de l'ordre de 2 fois l'ouverture de la couche exploitée. Au-dessus, les terrains fléchissent et viennent s'appuyer progressivement sur le foudroyage. L'affaissement remonte jusqu'en surface où apparaît une cuvette dont la surface est plus importante que celle du panneau dépilé au fond.

Dans les cinq ans qui suivent l'arrêt de l'exploitation à l'aplomb de la zone considérée, les terrains seront naturellement compactés et on n'observe plus d'affaissement en surface discernable des mouvements d'origine naturelle de la surface du sol.

4.1.2.6 Exploitations par chambres et piliers

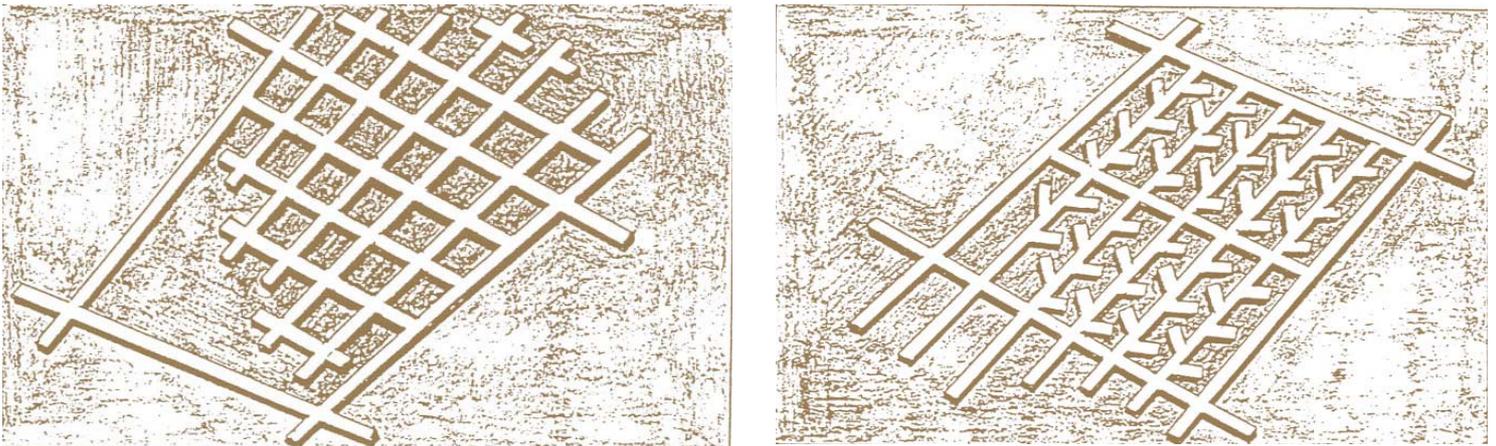


Figure 13 : Exploitation par chambres et piliers carrés (à gauche) et en épis (à droite)

Les méthodes d'exploitation par chambres et piliers abandonnés laissent subsister des vides souterrains après l'arrêt de l'exploitation. Les panneaux sont découpés par des chambres de largeur comprise entre 4 et 7 m. Les piliers sont de forme variable (carrée, rectangulaire, trapézoïdale). Leur hauteur, égale à l'ouverture de la couche exploitée, est comprise entre 3 et 7 m (exceptionnellement 8 m) et leur largeur varie de 10 à 25 m (exceptionnellement 5 m dans les anciennes exploitations proches de la surface).

Dans le cas d'élargissement, les galeries peuvent atteindre 8 m de large et les largeurs de pilier sont réduites.

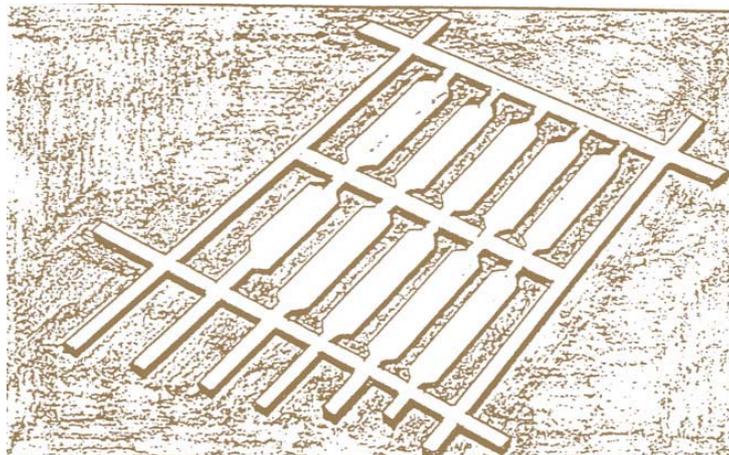


Figure 14 : Exploitation par élargissage

Les exploitations les plus anciennes se caractérisent par des piliers irréguliers dont certaines dimensions peuvent être très faibles alors que les exploitations plus récentes montrent des découpages plus réguliers.

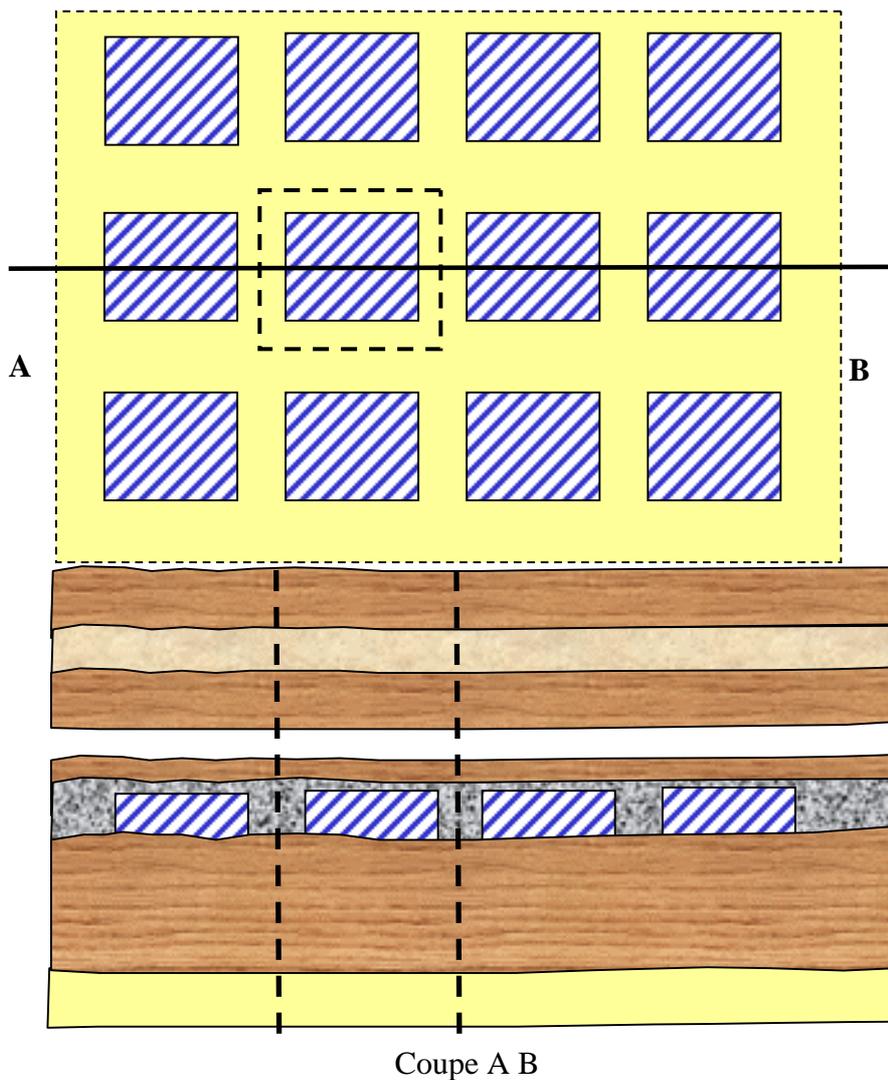


Figure 15 : Schéma d'exploitation par chambres et piliers abandonnés

Les exploitations par chambres et piliers abandonnés ont été effectuées principalement dans les zones où il fallait éviter les affaissements du fait de l'occupation de la surface (elles consistent alors les stots de protection des villages, routes, voies ferrées, ...)

Les piliers supportent l'ensemble du recouvrement jusqu'au jour. La sollicitation dans les piliers est d'autant plus forte que la profondeur des travaux est grande et que le taux de défrètement est important. Le taux de défrètement est le rapport de la surface exploitée sur la surface totale.

4.1.3 Instabilités de surface connues et rétro-analyses

4.1.3.1 Fontis

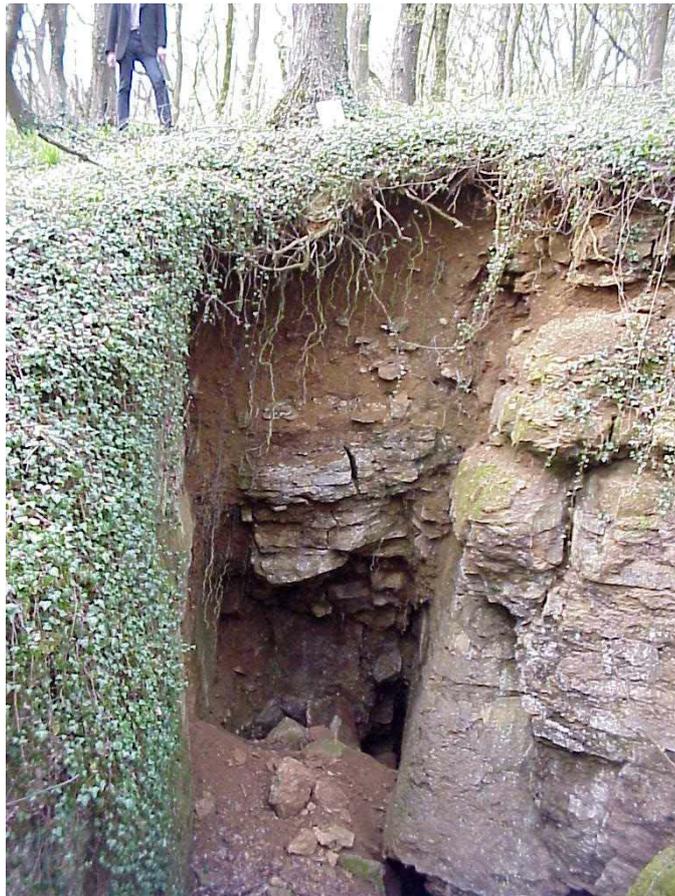


Figure 16 : Fontis à Hayange. Source GEODERIS (2000)

Ce phénomène a affecté récemment les communes de Moyeuvre-Grande (cité Curel) et d'Hussigny-Godbrange (abords de la route de la décharge), en Moselle.

4.1.3.2 Affaissement et effondrement

Les affaissements et effondrements qui ont affecté le bassin ferrifère lorrain sont recensés dans le tableau 1. Leur rétro-analyse a fait l'objet d'études approfondies (Al Heib/ Kouniali, 2001, « Prévision des conséquences des affaissements miniers dans les mines de fer de Lorraine. Evaluation du type d'effondrement sur 21 zones hiérarchisées du bassin ferrifère lorrain » et Al Heib), 2002, « Prévision des conséquences des affaissements miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Etude méthodologique pour la prévision de la cuvette d'affaissement ».

N°	Concession	Site / Mine	Type de phénomène
1	Joeuf	Joeuf	Affaissement après dépilage
2	De Wendel (156)	Moyeuvre	Affaissement après dépilage
3	Moutiers	Moutiers	Affaissement dû au dépilage en 2e couche (grise)
4	Joudreville	Joudreville	Affaissement après dépilage
5	Hettange-Grande	Hettange-Grande	Affaissement après dépilage
6	François	Pierreuse	Affaissement dû au dépilage en deuxième couche (Brune)
7	Montrouge	CD15	Affaissement dû au dépilage en première et deuxième couches
8	Auboué - Moineville	Cité de Gorcy	Affaissement dû au dépilage en deuxième couche (grise)
9	Piennes	Piennes	Affaissement après dépilage
10	Saint-Pierremont	Saint-Pierremont	Affaissement après dépilage
11	Droitaumont	Jarny	Affaissement
12	Aumetz	Errouville	Affaissement
13	Auboué - Moineville	Cité de Coinville	Affaissement
14	Auboué - Moineville	Rue de Metz	Affaissement
15	Auboué - Moineville	Moutiers haut	Affaissement
16	Roncourt	Cité St-Joseph	Affaissement
17	Sainte-Marie aux Chênes	Ida	Effondrement brutal
18	Rochonvillers	Rochonvillers	Effondrement brutal

Tableau 1 : 18 cas d'affaissement et d'effondrement dans le bassin ferrifère lorrain

Les rétro-analyses menées sur ces cas d'affaissement ou d'effondrement ont permis d'identifier les mécanismes et les risques « mouvements de terrain » dans le bassin ferrifère lorrain. Les résultats des rétro-analyses sont utilisés pour le renseignement des critères présentés plus loin.

4.2 CONSTITUTION DU GROUPE D'EXPERTS

Dans le contexte des mines de fer de Lorraine, la constitution du groupe d'experts, créée dans l'urgence, ne suit pas fidèlement la démarche détaillée précédemment. C'est grâce à ce premier « groupe test » que des réflexions ont été menées pour aboutir à la méthode retenue aujourd'hui.

A titre indicatif, la composition du collège d'experts consulté pour les mines de fer est rappelée ci-après :

1. M. JOSIEN, Directeur de GEODERIS ;
2. M. PIGUET, Professeur de l'Ecole des Mines de Nancy ;
3. M. VOUILLE, Professeur de l'Ecole des Mines de Paris ;
4. M. TINCELIN, Professeur d'exploitation minière à l'Ecole des Mines de Paris ;
5. M. WOJTKOWIAK, Directeur délégué de la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol de l'INERIS, basé à Nancy.

4.3 IDENTIFICATION DU RISQUE

La méthode de hiérarchisation a été appliquée dans le seul cadre du risque lié aux « mouvements de terrain ».

Ce risque en surface est d'autant plus fort que :

- la stabilité de l'édifice minier est susceptible d'être mise en défaut (prédisposition à la rupture « au fond ») ;
- les effets en surface d'une éventuelle rupture de l'édifice minier seront importants (conséquences de l'instabilité).

Au vu du contexte (géologique, géotechnique, hydrogéologique, configurations d'exploitation...), trois types de phénomène ont été considérés dans ces études :

1. la rupture du toit des vides miniers situés à faible profondeur se répercutant en surface sous forme de **fontis**. L'analyse des conditions d'apparition de fontis demande une connaissance géotechnique précise des terrains de recouvrement et nécessite une analyse particulière pour chaque zone, ce qui sort du champ d'application de la présente hiérarchisation. Dans le cadre du bassin ferrifère lorrain, les zones susceptibles de présenter un risque lié à la remontée de **fontis** en surface ont donc simplement été identifiées sans faire l'objet d'une hiérarchisation entre elles. Le critère unique de sélection des zones susceptibles de présenter un risque de fontis est la profondeur du vide minier. Le comité d'experts, ne disposant que de très peu de retours d'expérience sur les remontés de fontis pour le bassin ferrifère, s'est appuyé sur les cas de fontis recensés dans les mines de charbon. Les zones exploitées (galeries, traçages ou dépilages) à moins de 50 m de profondeur ont donc été sélectionnées ;
2. les **éboulements de fronts de mines à ciel ouvert** sont situés dans les zones exploitées à ciel ouvert. La localisation de ces zones correspond approximativement à une bande de cent mètres axée sur la ligne de crête du front. En raison de leur spécificité, ces zones de front n'ont pas été incluses dans la hiérarchisation des zones présentant un risque « mouvements de terrain » ;
3. l'effondrement des édifices miniers se répercutant en surface par un **affaissement**. La sélection des zones susceptibles de présenter un risque d'affaissement s'appuie sur des analyses statistiques et les retours d'expérience sur des affaissements survenus dans le bassin ferrifère lorrain. Le comité d'experts a établi qu'une zone est prédisposée à une instabilité au fond dès lors qu'elle vérifie la condition suivante :
 - dans le cas d'une exploitation en monocouche, la sollicitation qui s'exerce sur les piliers est supérieure à 7,5 MPa (la procédure de calcul de cette sollicitation est présentée en annexe 3.1) ;
 - dans le cas d'une exploitation en multicouche, la sollicitation est supérieure à 7,5 MPa dans l'une des couches exploitées, ou l'épaisseur de l'un des intercalaires est inférieure à 7 m ;

Bien que certaines zones sont prédisposées à un affaissement au fond, les éventuelles conséquences en surface peuvent être très faibles. Le comité d'experts a décidé que les conséquences en surface sont négligeables dès lors que l'amplitude des affaissements est inférieure à 10 cm et les déformations inférieures à 10^{-4} (0,1 mm/m). Les zones prédisposées à un affaissement mais dont les conséquences sont négligeables sont conservées pour mémoire mais ne sont pas affichées cartographiquement.

Enfin, ont été également écartées de la hiérarchisation les zones pour lesquelles la prédisposition à l'affaissement est vérifiée mais pour lesquelles une sous-criticité est avérée (rapport largeur zone exploitée / profondeur minimale inférieur à 0,4 ou 0,2). (voir partie procédures opérationnelles §2.1.2).

4. **les effondrements généralisés** se caractérisent par une descente des terrains en surface marquée par des crevasses d'ouverture parfois métrique au jour. Les conséquences des affaissements en terme de déformation du sol peuvent être importantes à terme. Toutefois, leur évolution lente permet de mieux gérer leurs conséquences et facilite la maîtrise des risques vis-à-vis de la sécurité des personnes. Le caractère brutal et dynamique d'un **effondrement généralisé** implique des dommages beaucoup plus importants aux bâtiments et ouvrages d'infrastructure en surface. Compte tenu des spécificités de ce phénomène, les zones susceptibles de présenter un risque d'effondrement ont été identifiées à l'aide de critères établis grâce aux rétro-analyses menées sur des cas d'effondrement survenus dans le bassin ferrifère (Al Heib, Kouniali, 2001). Deux conditions *nécessaires* à l'occurrence d'un effondrement brutal ont ainsi pu être mises en évidence :

- une condition traduisant *la géologie du recouvrement*, qualifiée par la présence dans le recouvrement d'un banc épais et résistant, sans lequel le mécanisme physique à l'origine des effondrements brutaux devient impossible ;
- une condition liée à *la géométrie de l'exploitation*, qualifiée, entre autres, par les paramètres suivants : taux de défrètement, ouverture exploitée, sollicitation s'exerçant sur les piliers, dimensions et forme des piliers, extension horizontale de l'exploitation ...

L'aléa effondrement brutal peut alors être écarté si l'une ou l'autre de ces deux conditions n'est pas vérifiée.

Toutes les valeurs limites définies ci-dessus résultent d'analyses statistiques et de retours d'expérience sur des effondrements survenus dans le bassin ferrifère lorrain. Elles ont été discutées et approuvées en comité d'experts.

La figure 17 résume la démarche énoncée précédente.

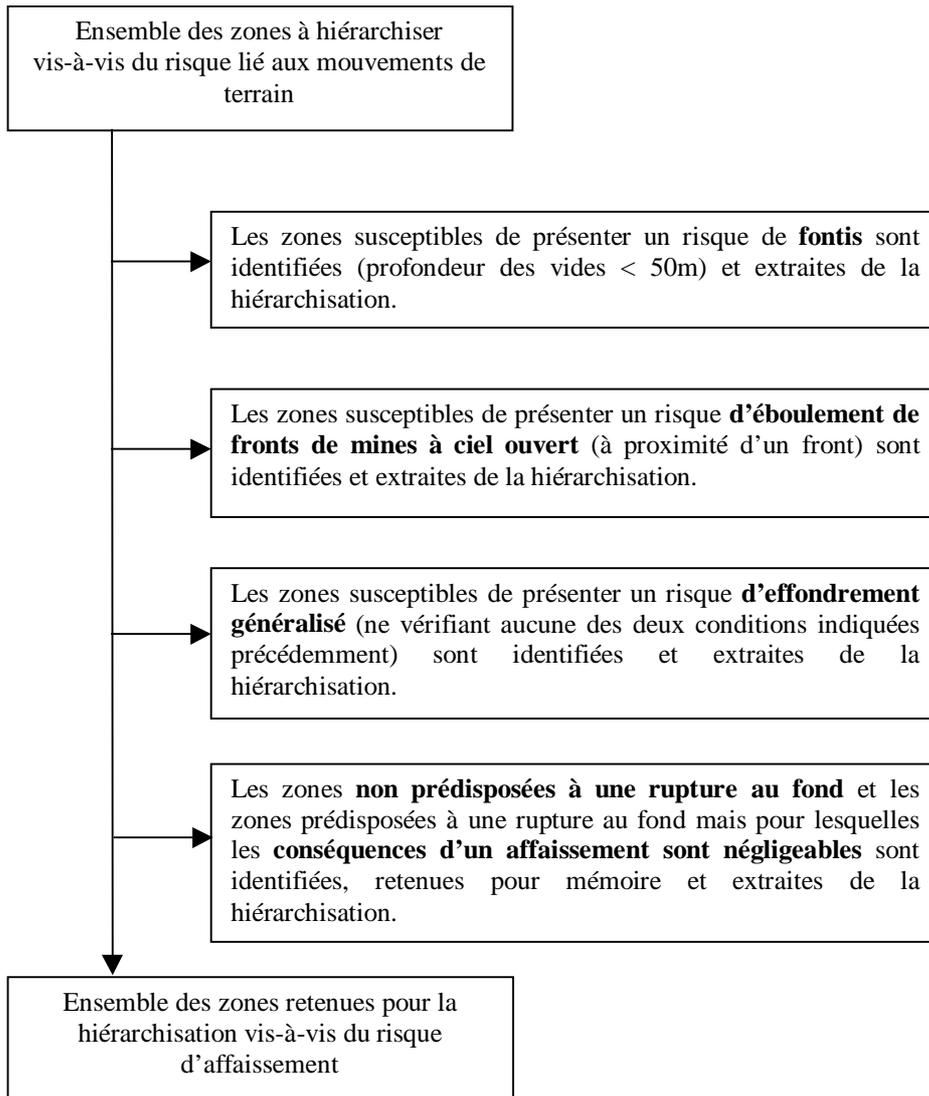


Figure 17 : Procédure de sélection des zones à hiérarchiser

4.4 DÉFINITION D'UNE SECTORISATION VIS-À-VIS DU RISQUE

Dans le cadre de la hiérarchisation des zones à risque dans le bassin ferrifère lorrain, la sectorisation du bassin minier a consisté à définir des zones homogènes selon la procédure détaillée en annexe 3 et à ne retenir, parmi celles-ci, que celles susceptibles de présenter un risque d'affaissement (c'est-à-dire vérifiant les critères énoncés précédemment). Une zone homogène est une zone dont les paramètres qui la caractérisent varient suffisamment peu pour les mécanismes de rupture et les éventuelles conséquences en surface demeurent semblables au sein de la zone. L'homogénéité d'une zone est validée par le comité d'experts.

4.5 LES CRITÈRES

4.5.1 Identification et définition des critères

Un ensemble de critères, qui doit permettre de décrire le mieux possible le risque sur les différentes zones d'affaissement, a été défini par le groupe d'experts. Ainsi 14 critères ont été retenus :

- la sollicitation totale ;
- la présence de failles ;
- la superposition des piliers ;
- la taille et la régularité des piliers ;
- la sensibilité à l'ennoyage ;
- la profondeur ;
- l'amplitude maximale attendue de l'affaissement ;
- la déformation attendue ;
- l'étendue de la zone vulnérable ;
- la vulnérabilité du bâti ;
- la vulnérabilité des routes ;
- la vulnérabilité des voies ferrées ;
- la vulnérabilité des ouvrages d'art ;
- la vulnérabilité des réseaux divers.

Parmi ces critères, certains caractérisent la prédisposition d'une zone à une instabilité au fond (sollicitation, faille, superposition des piliers, taille et régularité des piliers, sensibilité à l'ennoyage), d'autres caractérisent l'intensité de l'affaissement en surface (la profondeur, l'amplitude et la déformation attendues) et les derniers la vulnérabilité de la zone (étendue de la zone vulnérable...).

4.5.1.1 Critères relatifs à la prédisposition de ruine de l'ouvrage minier

La sollicitation totale

Les instabilités recherchées sont, dans cette étude, celles qui vont se traduire par des mouvements de surface importants. Le processus de dégradation peut s'amorcer par des instabilités locales dans les chambres (chute de toit, rupture d'intercalaire, poinçonnement dans le mur). Ces instabilités locales ont des conséquences néfastes sur l'état de contrainte dans les piliers. Cependant, pour que le processus se traduise par un affaissement en surface, il faut que le phénomène de rupture atteigne les piliers eux-mêmes et ceci sur une surface suffisante pour que l'affaissement remonte jusqu'au jour. Sur une zone de piliers, les sollicitations sont variables d'un point à un autre en fonction de la position du pilier par rapport au bord ferme, de la position à l'intérieur du pilier (contrainte horizontale de confinement) ou de la fracturation. En moyenne, la contrainte verticale dans les piliers sur la zone (σ_p) peut être obtenue par le modèle simple de « l'aire tributaire » : le poids du recouvrement est supporté par les piliers.

Cette contrainte verticale peut être augmentée par la présence d'exploitations dans l'environnement de la zone étudiée. Ainsi, en bordure d'un défilage, le foudroyage des terrains provoque une détente au-dessus de la zone foudroyée mais une augmentation de la contrainte verticale sur le bord. Si la zone défilée est supérieure à la surface critique (largeur égale à la profondeur), la majoration de la sollicitation est de l'ordre de 20 %. Si la largeur de la bande défilée est largement inférieure à la profondeur (« îlot »), l'affaissement des terrains est incomplet. Il faut alors tenir compte du poids des terrains au-dessus de la zone foudroyée dans le calcul du coefficient de surcharge. Un critère de « sollicitation totale » σ_t a été adopté pour tenir compte de ce phénomène.

Remarques :

Pour évaluer la stabilité des zones à étudier, il faut comparer les valeurs de σ_t calculées dans chaque cas aux valeurs de résistance en compression des minerais sollicités. Si de plus, cette valeur de σ_t est nettement supérieure à la résistance en compression des marnes du toit et du mur, on ne peut exclure une instabilité au fond.

Des essais mécaniques ont été réalisés durant les trente dernières années par le Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-Sol (CGES) de l'Ecole des Mines de Paris.

Ces essais mécaniques ont permis d'évaluer plus particulièrement :

- la résistance instantanée en compression monoaxiale évaluée en bar et appelée R_c ;
- la résistance en compression monoaxiale dite ultime évaluée en bar et appelée R_u .

Si l'évaluation de la première est directe, celle de la seconde nécessite une justification.

En effet, la résistance instantanée ne permet pas de définir la stabilité à long terme des exploitations minières, car on constate qu'une sollicitation inférieure à R_c maintenue sur un échantillon provoque le fluage de cet échantillon et sa rupture au bout d'un temps d'autant plus court que la sollicitation appliquée est proche de R_c . Il convient donc de déterminer une résistance ultime R_u qui est la borne supérieure de la contrainte de compression simple que la roche peut supporter sans rupture pendant un temps infini. L'expérimentation ne permet pas d'accéder directement à cette caractéristique du fait même de sa définition puisque les expériences ont toujours une durée limitée.

Nous avons vu, à partir des essais, que les résistances ultimes définies par la limite élastique déterminée sur échantillons peuvent descendre en dessous de 10 MPa pour des piliers anciens. Pour fixer une valeur de résistance limite dans notre analyse, nous avons effectué une rétroanalyse de l'effondrement de Moutiers de février 1940 (sollicitation imposée au pilier comprise entre 9,6 et 10,3 MPa, c'est-à-dire des valeurs proches de R_u) et effondrement de mai 1997 (sollicitation imposée aux piliers comprise entre 7,5 et 8 MPa, nettement inférieure à celle de 1940). Diverses causes (vieillesse, influence de la marne au mur, influence de l'eau) peuvent être à l'origine de cette perte de résistance.

La valeur de 7,5 MPa a donc été choisie par le comité d'experts comme valeur de résistance telle que toute structure soumise à une sollicitation supérieure sera considérée comme susceptible de rupture.

Présence de failles

Il s'agit d'un critère qui rend compte de la présence d'accidents géologiques susceptibles d'exercer des majorations de la sollicitation sur les piliers de la zone. Il n'est pas possible de quantifier ce critère, il a donc été gardé comme critère qualitatif.

Superposition des piliers

Il s'agit de rendre compte du facteur aggravant que constitue la mauvaise superposition des piliers dans le cas d'intercalaires « minces ».

Dans le cas d'exploitations multicouches, la sollicitation ne suffit plus à caractériser le risque d'instabilité de la zone. En effet, s'il n'y a pas une superposition parfaite des piliers dans les deux couches, des contraintes de cisaillement se développent dans l'intercalaire et les piliers (figure 18).

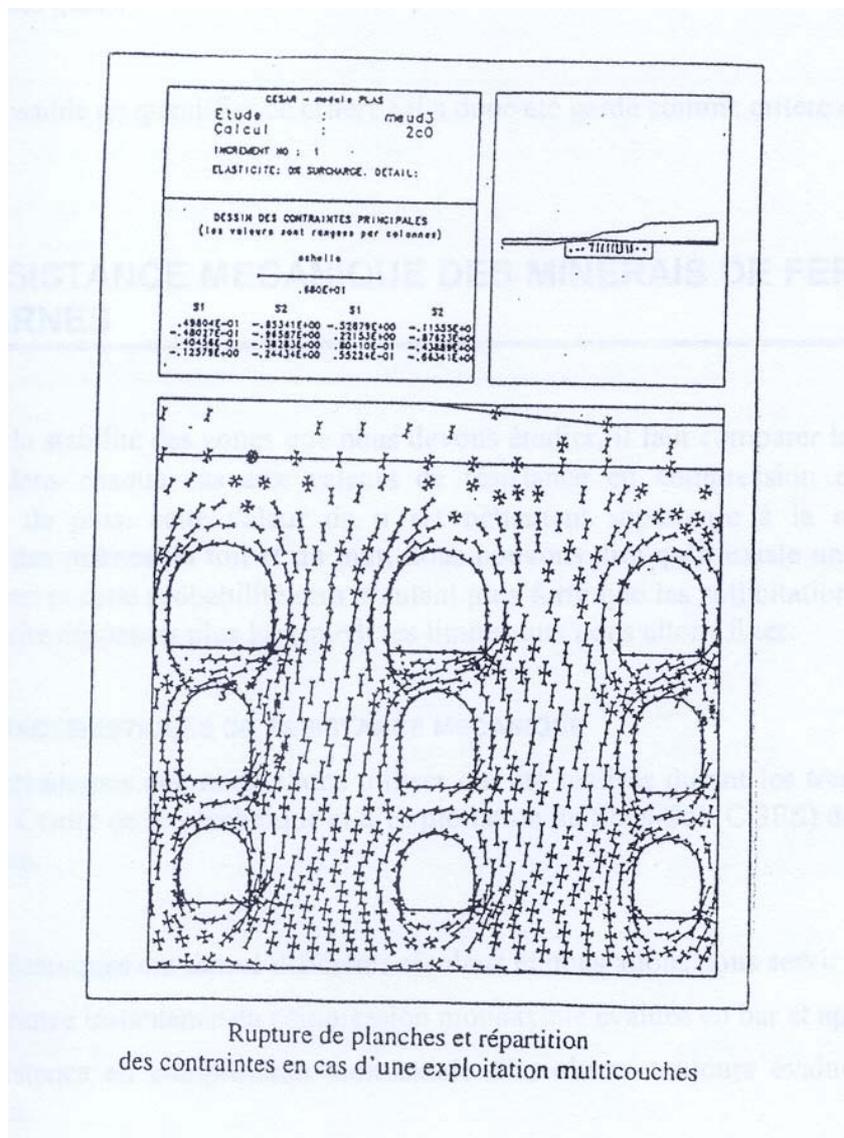


Figure 18 : Répartition des contraintes dans une exploitation multicouches.

L'importance de ces contraintes va dépendre :

- de l'épaisseur de l'intercalaire : l'expérience des mines de fer montre qu'il y a peu de risques d'instabilité si l'intercalaire a une épaisseur supérieure à 7 m. Ce seuil est retenu comme valeur à partir de laquelle la prédisposition de rupture d'intercalaires devient négligeable. Cette valeur de 7 m a été déterminée par retour d'expérience et expertise des différentes ruptures d'intercalaires survenues dans le bassin ferrifère lorrain. Une fois encore cette valeur a été longuement discutée puis approuvée par le collège d'experts. Il faut également tenir compte de la lithologie de cet intercalaire, en particulier de la nature des marnes qui le compose (sensibilité à l'eau) ;
- du décalage entre les piliers des deux couches : il ne peut être apprécié qu'à partir de l'examen des plans.

Il n'est pas possible de quantifier ce critère (superposition des piliers) : il a donc été gardé comme critère qualitatif.

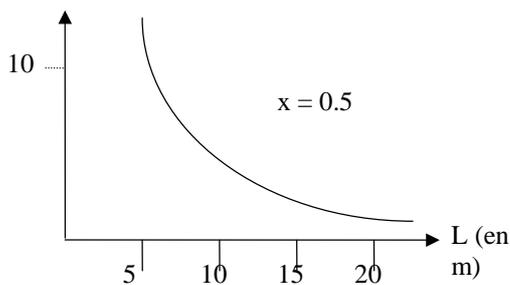
Taille et régularité des piliers

Pour un même niveau de sollicitation sur une zone, la stabilité est d'autant meilleure que l'exploitation de la zone est effectuée selon un maillage régulier et où subsistent des piliers larges.

En effet, en cas de maillage irrégulier, les piliers les plus petits sont l'amorce potentielle d'une dégradation locale à partir de laquelle les sollicitations vont se reporter sur les piliers adjacents entamant ainsi un processus de dégradation plus général.

Par ailleurs, plus les dimensions des piliers sont petites, plus ces piliers sont sensibles à une irrégularité de traçage ou à une dégradation des parois en fonction du temps et plus la sollicitation moyenne dans le pilier va varier.

Variation de la sollicitation en %



La figure ci-contre montre que pour un écart (x) de 0,5 m sur la largeur du pilier, la variation engendrée sur la sollicitation moyenne est de 2,5 % pour un pilier de 20 m mais de 10 % pour un pilier de 5 m.

Pour l'estimation de ce critère une approche quantitative a été retenue.

Sensibilité à l'ennoyage

Les effets potentiels de l'ennoyage sur la stabilité de la structure ont également été pris en compte. Les structures les plus sensibles à l'eau sont, a priori, celles dont les épontes sont constituées d'épaisse couches de marnes, elles-mêmes sensibles à l'eau.

Afin de se placer du côté de la sécurité, et bien que la sensibilité à l'eau des marnes soit très variable d'un point à un autre du gisement, ce critère a été fondé sur leur seule présence, faute de données plus précises.

Ce critère ne rend compte que de l'altération des caractéristiques mécaniques de certaines roches comme les marnes du gisement ferrifère lorrain. Il ne tient pas compte du fait que, lorsque l'ennoyage de la mine a progressé et que l'édifice souterrain se trouve largement au-dessous du niveau de la nappe, les sollicitations effectives sont réduites du fait de la poussée d'Archimède qui s'exerce sur les terrains de recouvrement (déjaugage). En réalité, le rôle de l'eau est bien plus complexe car, si elle tend à réduire la contrainte verticale, elle diminue d'autant la contrainte horizontale et réduit par la même occasion son rôle bénéfique de confinement au sein du pilier. Pour se placer du côté de la sécurité, le niveau de sollicitation a été gardé égal à celui calculé sans présence d'eau.

La sensibilité à l'ennoyage est un critère qualitatif.

Profondeur

Comme indiqué précédemment, le critère profondeur est employé pour qualifier l'intensité de l'affaissement. Plus une exploitation est proche de la surface, plus les effets en surface d'un désordre au fond seront importants.

Plus une exploitation est profonde plus les sollicitations sur les piliers sont importantes et donc la prédisposition de rupture de l'édifice est, elle aussi, accrue. Cependant, cet effet de la profondeur qualifie la prédisposition à la rupture. Cet effet est intégré dans le critère de sollicitation.

Amplitude et déformation maximales de l'affaissement attendu

Il s'agit de critères quantitatifs exprimés en mètres.

Les conséquences de l'affaissement au droit d'une exploitation partielle sur les ouvrages de surface sont directement liées à la géométrie de la cuvette d'affaissement, elle-même caractérisée par les paramètres suivants :

- l'amplitude maximale de l'affaissement (A_m) ;
- la déformation maximale (ε_{max}) de la zone affaissée ;
- l'angle limite de la zone d'influence de l'exploitation (γ) ;
- la pente maximale de la cuvette d'affaissement (P_{max}).

Ces paramètres sont propres à chaque bassin minier, voire à chaque site. Ils dépendent de la nature et de la structure des terrains de recouvrement.

En effet, toute exploitation minière souterraine modifie l'équilibre des terrains autour de la zone d'extraction. Les couches situées au-dessus du panneau exploité ou du secteur effondré se rompent, provoquant le fléchissement et la déconsolidation des terrains stratifiés surincombants. Les déplacements ainsi induits au sein du massif se propagent et finissent par se transmettre en surface avec l'apparition d'une dépression appelée cuvette d'affaissement (figure 19 ; Pigué et Wojtkowiak, 2001).

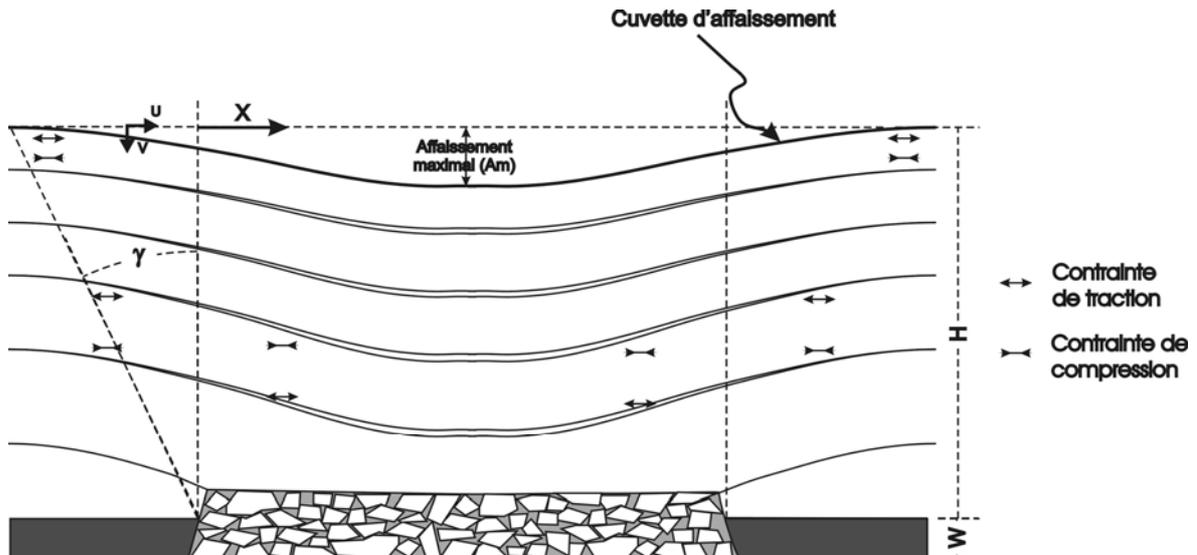


Figure 19 : Exemple de cuvette d'affaissement (w : ouverture de la couche ; A_m : affaissement maximal)

Le déplacement vertical mesuré au centre de la cuvette ne peut excéder une valeur appelée affaissement maximal et notée A_m . Cette valeur dépend notamment de l'ouverture w des travaux souterrains, de la nature du traitement des vides (persistance de vides, foudroyage, remblayage...) ainsi que de l'épaisseur et de la nature des terrains de recouvrement.

Le mouvement des terrains de surface se décompose classiquement en un déplacement vertical des points du sol, appelé *affaissement* (A) proprement dit, et un *mouvement* dans le plan horizontal, appelé *déplacement horizontal*.

La *déformation* de la surface résulte du fait que deux points voisins subissent des mouvements différents, ce qui induit des variations différentielles de la distance au sol entre ces deux points. Ainsi, une variation positive correspond à une *extension* et une variation négative correspond à un raccourcissement ou une *compression*. L'affaissement diffère lui aussi d'un point à un autre, ce qui génère un déplacement différentiel appelé *pente* dont la variation est appelée *courbure*.

La figure 20 montre les formes théoriques des courbes correspondant à chacun des termes ainsi définis. On remarque que les courbes de déformation et de courbure sont très semblables ; il en est de même des courbes de pente et de déplacement.

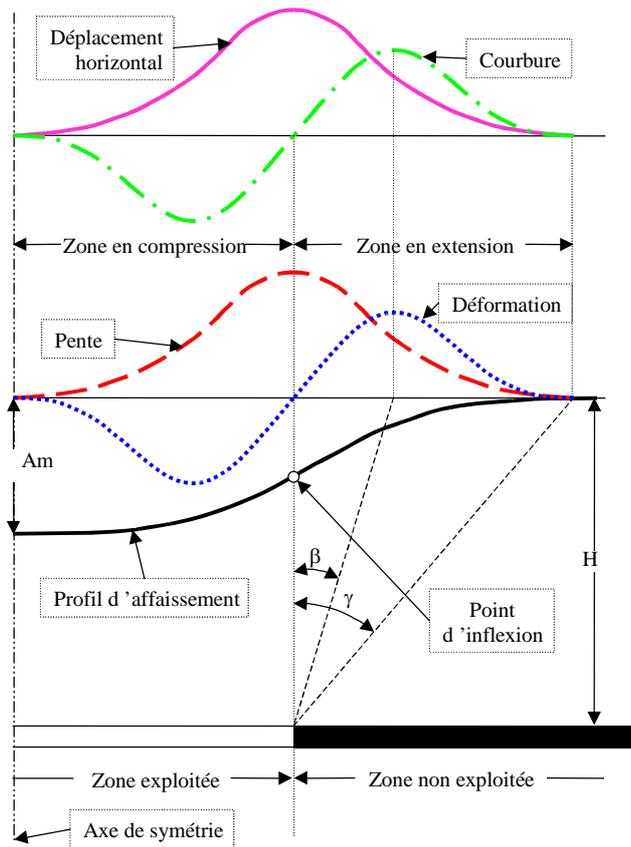


Figure 20 : Les différentes composantes des mouvements de surface engendrés par une exploitation horizontale suivant une coupe transversale

La détermination de tous ces paramètres et critères résulte d'une rétro-analyse des affaissements clairement identifiés et répertoriés dans le bassin ferrifère lorrain.

Etendue de la « zone vulnérable »

Toutes choses égales par ailleurs, le risque est d'autant plus grand que la superficie de la « zone vulnérable » est importante. La détermination de cette étendue nécessite notamment la détermination de l'angle d'influence (γ) (voir figure précédente). Celle-ci a été obtenue par rétro-analyse de cas d'affaissements recensés dans le bassin.

Les résultats de la rétro-analyse sont résumés ci-après. L'angle d'influence a été déterminé à partir du bord de l'exploitation et jusqu'à une valeur d'affaissement très faible (< 1 cm) considérée comme nulle, compte tenu de la précision de la mesure. On a distingué trois situations :

- **cas des exploitations bordées par une zone vierge (V) ou un pilier barrière suffisamment large** (largeur supérieure à 0,2 fois la profondeur). Au total, trois cas correspondent à cette configuration : l'angle d'influence varie entre 0 et 10° avec une valeur moyenne égale à 6° ;
- **cas des exploitations bordées par une zone de traçage (T)**. On dispose de 6 cas. L'angle d'influence varie entre 6° et 29° . Les angles d'influence augmentent avec le taux de défrèvement des zones environnantes. La valeur moyenne est de 16° ;

- **cas où l'exploitation est bordée par un dépilage sur une surface très importante.**
L'angle d'influence est compris entre 23 et 40°, à l'exception d'un cas (Roncourt) pour lequel l'angle est supérieur à 45°. L'angle moyen est de 30°. Les angles importants s'expliquent par la reprise d'affaissement des zones de dépilage sous-critiques.

Rappelons que l'angle d'influence proposé par Tincelin (Drouard et Templier, 1968) est compris entre 15° à 20°.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs des angles d'influence suivant les trois configurations :

	Vierge	Traçage	Dépilage
Moyenne	6°	16°	30°
Valeurs extrêmes	[0°-10°]	[6°-29°]	[23°-40°]

Tableau 2 : Angles d'influence dans le bassin ferrifère lorrain

Vulnérabilité du bâti

Il s'agit d'un critère qualitatif prenant en compte la sensibilité des différents types de bâtiments aux effets d'un affaissement mais aussi la densité de population (dans une approche d'évaluation du risque sur les personnes).

Vulnérabilité des routes, vulnérabilité des voies ferrées, vulnérabilité des ouvrages d'art et vulnérabilité des réseaux divers

Il s'agit de critères qualitatifs ou booléens semblables au critère précédent mais concernant les infrastructures autres que les bâtiments.

Remarque :

Le terme « vulnérabilité » est à prendre dans son acception la plus large, c'est-à-dire incluant la notion de sensibilité de l'ouvrage aux phénomènes physiques et celle d'enjeu (personnes, biens, activités... susceptibles d'être affectés).

4.5.2 Pondération des critères

L'identification des risques et l'analyse des mécanismes susceptibles de provoquer un risque lié à un affaissement a permis au comité d'experts de trier et pondérer les critères précédents selon leur importance relative sur le niveau de risque. Dans le contexte des mines de fer de Lorraine, une rupture au fond peut se produire par l'un des trois phénomènes suivants (voire leur conjugaison) :

- ruine des piliers par surcharge (solicitation trop importante) ;
- rupture d'intercalaire, altération du toit et/ou du mur au cours du temps ou suite à l'ennoyage en cas de présence de bancs marneux sensibles à l'eau ;
- rupture du recouvrement.

La mauvaise superposition des piliers, la présence de failles ainsi que la taille réduite et l'irrégularité des piliers sont des facteurs aggravants.

Etant donné que l'objectif majeur de cette hiérarchisation est de garantir la sécurité publique (protection civile) compte tenu de l'occupation actuelle ou future des zones en question, il a été décidé d'affecter un poids plus important aux critères d'intensité (et plus particulièrement la déformation) et de vulnérabilité.

Le tableau ci-dessous donne les pondérations retenues.

Critères	zones à surveiller sous le bâti	zones à surveiller sous les infrastructures
Critères de prédisposition		
<i>sollicitation totale</i>	5	5
<i>présence de faille</i>	1	1
<i>superposition des piliers</i>	1	1
<i>taille et régularité des piliers</i>	1	1
<i>sensibilité à l'ennoyage</i>	5	5
Critères d'intensité		
<i>profondeur</i>	1	1
<i>affaissement maximum attendu</i>	1	1
<i>déformation (1.5*Am/Hmin)</i>	20	20
Critères de vulnérabilité		
<i>étendue de la zone</i>	1	4
<i>vulnérabilité du bâti</i>	10	sans objet
<i>vulnérabilité des routes</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des voies ferrées</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des ouvrages d'art</i>	sans objet	4
<i>vulnérabilité des réseaux divers</i>	sans objet	2

Tableau 3 : Pondération des critères pour chaque calcul de hiérarchisation

4.5.3 Renseignements et calculs des critères

Sollicitation totale

La sollicitation totale (σ_t) d'une zone est la sollicitation calculée dans la couche exploitée. Dans le cas particulier où plusieurs couches sont exploitées, la sollicitation de la zone est la plus grande des sollicitations calculées pour chaque couche.

Le détail du calcul de la sollicitation est présenté en annexe 3 Il s'appuie sur les calculs intermédiaires de la profondeur (H), du taux de défruitement (τ), de la contrainte exercée par le poids des terrains de recouvrement (μ_v) et de la contrainte reprise par les piliers selon le modèle de l'aire tributaire (σ_p) (figure 21).

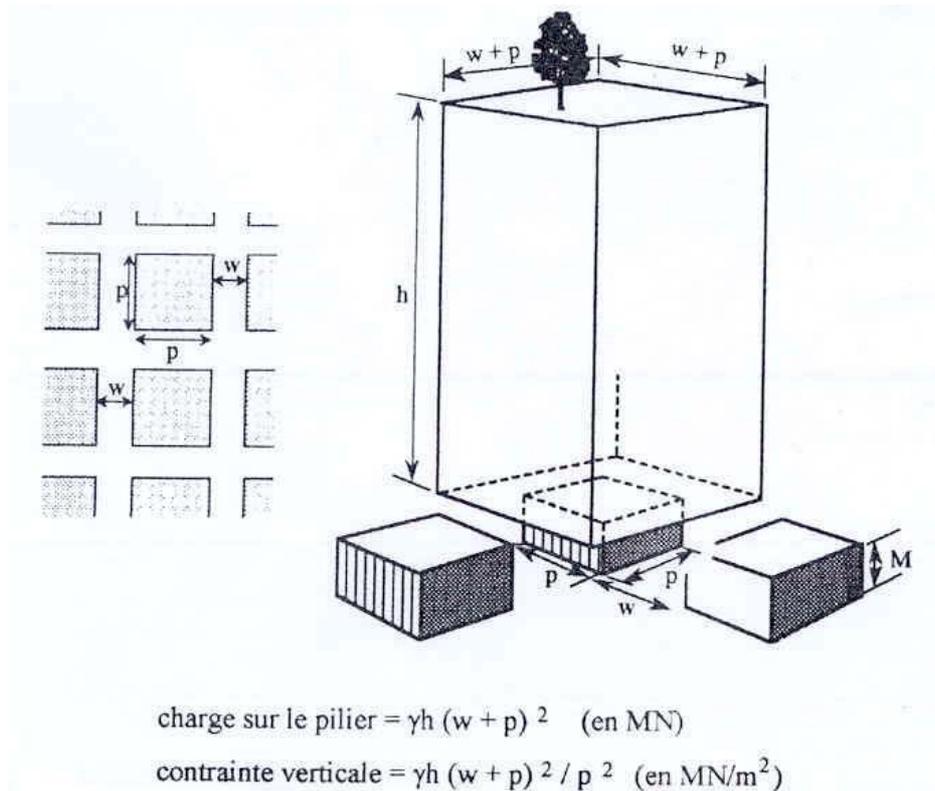


Figure 21 : Principe de l'aire tributaire

La sollicitation totale est calculée à partir de σ_p en tenant compte des éventuels phénomènes de surcharge due aux exploitations à proximité de la zone considérée.

Présence de failles

Ce critère peut prendre les 2 modalités suivantes (du moins aggravant au plus aggravant) :

- Absence de faille ;
- Présence de faille(s)

Superposition des piliers

Ce critère peut prendre les 3 modalités suivantes (du moins aggravant au plus aggravant) :

- une seule couche exploitée (pas d'effet aggravant) ;
- 2 couches avec piliers bien superposés (les piliers sont de mêmes dimensions dans les couches et ils se superposent) ou intercalaire épais (≥ 7 m) ;
- 2 couches avec piliers mal superposés (les piliers sont de dimensions différentes selon la couche ou ne se superposent pas) et intercalaire mince (< 7 m).

Taille et régularité des piliers

Dans le cas particulier où plusieurs couches sont exploitées au droit de la zone, ce critère représente la situation la plus défavorable parmi les couches.

Ce critère peut prendre les 3 modalités suivantes (du moins aggravant au plus aggravant) :

- présence de gros piliers (plus petite dimension > 15 m) ;
- présence de petits piliers (piliers < 15 m réguliers) ou exploitation par élargissement ;
- présence de petits piliers irréguliers.

Sensibilité à l’ennoyage

Pour les zones dont les travaux d’exploitation sont situés au-dessus de la cote maximale d’ennoyage, ce critère prend la modalité « peu sensible ».

Pour les zones susceptibles d’être partiellement ou intégralement ennoyées, ce critère prend les modalités suivantes :

Modalité	Couche exploitée
Peu sensible	Absence de bancs marneux (ce qui est généralement le cas pour les couches rouges et jaunes)
Sensible	Couche grise dont le mur est réputé marneux
Très sensible	Couche noire
	Exploitation multicouches avec un intercalaire rouge/grise dont l’épaisseur est inférieure à 7 m
Extrêmement sensible	Exploitation multicouche avec un intercalaire grise/noire dont l’épaisseur est inférieure à 7 m

Profondeur

Le critère de profondeur intervient dans le cadre de la qualification de l’intensité de l’affaissement. Pour une zone donnée, on retient la profondeur minimale exploitée.

Amplitude maximale de l’affaissement attendu

Dans le cas où plusieurs couches sont exploitées, l’amplitude maximale de l’affaissement attendu est la somme des amplitudes des affaissements induits par chaque couche exploitée.

La rétro-analyse des cas recensés d’affaissement dans le bassin ferrifère lorrain a permis d’établir une procédure d’évaluation de l’amplitude d’affaissement présentée en annexe 3.2.

Déformation maximale ϵ_{max} de l’affaissement attendu

La relation empirique communément employée est la suivante :

$$\epsilon_{max} = \alpha A_m/H_{min}, \text{ avec } \alpha \text{ constante.}$$

Cette relation a été vérifiée pour les affaissements recensés dans le bassin ferrifère lorrain en considérant une constante variant entre 0,75 et 1,5. La valeur moyenne de cette constante est égale à 1,06.

Par principe de sécurité nous avons retenu la valeur de 1,5.

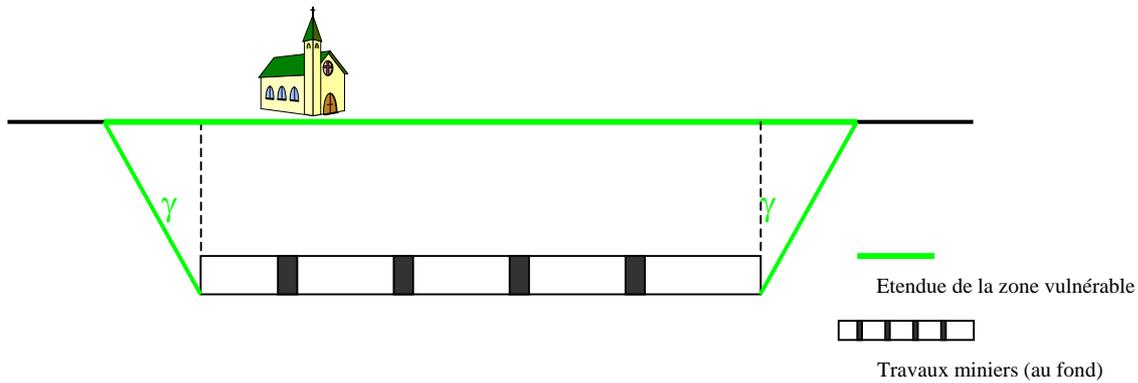
Donc :

$$\epsilon_{max} = 1,5 \times A_m/H_{min}$$

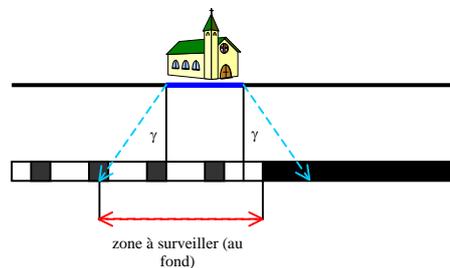
Etendue de la zone vulnérable

Le renseignement de ce critère dépend de l’objectif de l’étude.

Dans un objectif **d’aménagement durable du territoire**, l’étendue de la zone vulnérable correspond à l’étendue de la zone en surface influencée par les travaux souterrains.



Dans un objectif **de surveillance des zones**, l'étendue de la zone vulnérable correspond à l'étendue de la zone au fond qu'il convient de surveiller pour garantir la sécurité des biens et personnes en surface.



Dans les deux cas, le renseignement du critère « étendue de la zone vulnérable » nécessite le renseignement de l'angle d'influence γ .

La rétro-analyse a montré que γ prend les valeurs suivantes :

- pour un bord vierge ou faiblement tracé, l'angle d'influence est de **10°** ;
- pour un bord avec un traçage ou une exploitation par chambres et piliers, l'angle d'influence est de **20°** ;
- pour des zones bordées par des dépilages, l'angle d'influence est de **35°**.

Lorsque plusieurs couches sont exploitées, la plus grande des valeurs d'angle d'influence est retenue. Les modalités précises de renseignement de ce critère sont présentées en annexe 3.3.

Vulnérabilité des ouvrages de surface sensibles : bâti

Il s'agit d'un critère qualitatif qui peut prendre les 5 modalités suivantes :

- extrêmement vulnérable : ville ;
- très vulnérable : village avec bâtiments longs et immeubles ;
- vulnérable : maisons accolées ou contiguës dans une rue ;
- faiblement vulnérable : lotissements et maisons isolés ;
- très faiblement vulnérable : zones d'activité.

Vulnérabilité des ouvrages de surface sensibles : routes

Il s'agit d'un critère qualitatif qui peut prendre les 4 modalités suivantes :

- très vulnérable : autoroutes ;
- vulnérable : routes nationales ;
- peu vulnérable : routes départementales ;
- absence de route.

Vulnérabilité des ouvrages de surface sensibles : voies ferrées

Il s'agit d'un critère qualitatif qui peut prendre les 4 modalités suivantes :

- très vulnérable : lignes à grande vitesse ;
- vulnérable : lignes rapides ;
- peu vulnérable : autres lignes ;
- absence de voie ferrée.

Vulnérabilité des ouvrages de surface sensibles : ouvrages d'art

Il s'agit d'un critère booléen qui peut prendre les 2 modalités suivantes :

- présence d'ouvrages d'art ;
- absence d'ouvrage d'art.

Vulnérabilité des ouvrages de surface sensibles : réseaux divers

Il s'agit d'un critère qualitatif qui peut prendre les 4 modalités suivantes :

- très vulnérable : gazoducs divers ;
- vulnérable : réseaux d'eau ;
- peu vulnérable : réseaux EDF.
- absence de réseaux divers.

4.6 CHOIX DE LA CLASSIFICATION

4.6.1 Introduction

L'objectif de l'étude est d'obtenir deux classifications distinctes.

Une première classification concerne les zones d'affaissement comportant des ouvrages vulnérables en surface (bâti et/ou infrastructure) nommées, dès à présent, « zones à surveiller » qui sont surveillées dans un objectif de sécurité publique (protection civile) : garantir la sécurité des biens et des personnes.

Une seconde classification concerne les zones d'affaissement ne comportant pas d'ouvrages en surface, dites « zones d'aléa », et ne nécessitant donc pas de surveillance particulière, contrairement aux précédentes, puisqu'elles ne présentent pas actuellement d'enjeux en surface. L'objectif de cette deuxième classification est l'aménagement durablement le territoire.

4.6.2 Hiérarchisation des « zones à surveiller »

Compte tenu de la nature hétérogène des critères qui représentent les effets en surface provoqués par un affaissement sur le **bâti** d'une part, et sur **les ouvrages d'infrastructure** d'autre part, cette analyse multicritère a été menée sur ces deux types d'ouvrage séparément, aboutissant à deux classements distincts (voir tableau 4 plus en avant présentant les deux familles de critères associées).

Notons que les zones dites « à surveiller » sont celles qui peuvent influencer, lors de leur rupture, des bâtiments ou des infrastructures. Seules les zones ayant à leur aplomb, ou dans leur aire d'influence des bâtiments ou des infrastructures ont donc été étudiées.

Tous les critères présentés précédemment ont été employés. Rappelons cependant que l'étendue de la zone à surveiller est limitée dans son extension aux éléments en surface qu'il faut protéger (voir annexe 3.3).

La hiérarchisation des zones « à surveiller » (sous bâti et ouvrages d'infrastructure) a défini quatre classes identifiées et ordonnées vis-à-vis du risque. Cette définition a été réalisée en tenant compte des meilleures méthodes de surveillance disponibles à la date de réalisation des études (BAT : Best Available Technology).

- **Classe 1** : zones nécessitant l'application de méthodes de surveillance continue.

Surveillance continue du site : dispositif capable de déclencher une alarme avant que les effets ne se manifestent en surface.

- **Classe 2** : pour ces zones, des méthodes de surveillance périodique suffisent à assurer la sécurité des personnes et des biens. En cas d'apparition du moindre signe précurseur d'un désordre en surface, on passera d'une surveillance périodique à une surveillance continue.

Surveillance périodique du site : il s'agit du suivi du comportement du site au cours du temps. En cas d'évolution défavorable mise en évidence par l'auscultation, la surveillance continue peut être mise en place.

- **Classe 3** : zones pour lesquelles des mesures visant à préciser le risque doivent être prises. A la lumière de ces résultats, il sera décidé s'il convient de surveiller cette zone ou non si le risque n'existe plus (zone déjà effondrée par exemple).

Précision du risque : il s'agit de préciser le risque d'effondrement par une reconnaissance de l'édifice minier. Pour les sites ayant un fort taux de sollicitation, il faut déterminer s'ils ne sont pas déjà affaissés.

- **Classe 4** : pour ces zones, un nivellement de référence en surface suffira, compte tenu du faible niveau de risque.

Dans les mines de fer de Lorraine, compte tenu des délais courts pour les études, les méthodes suivantes ont été proposées :

- la mesure de bruits émis lors de la fracturation (ou la chute de blocs) par :
 - microsismique fixe ou déplaçable (station mobile) ;
 - hydrophone.

Cette technique peut être utilisée en surveillance avec alarme ;

- la déformation des terrains par extensométrie au toit des cavités ;

- dans le cas de travaux miniers restant accessibles (non inondés en particulier), il est possible d'effectuer une surveillance continue à partir de la mesure de déformation des terrains (convergence et expansion des piliers) ;
- la caractérisation globale du matériau (densité) par diagraphie afin d'analyser l'état de dégradation actuel des terrains ;
- la visualisation de l'état de la cavité (caméra, sonar).

D'autres techniques semblent intéressantes et mériteraient d'être développées ou adaptées au problème (programme de recherche) par exemple : des mesures de variations de contrainte, des mesures de l'évolution du matériau par tomographie sismique ou des reconnaissances de l'état d'une zone par méthode géophysique (sismique).

4.6.3 Hiérarchisation des zones d'aléa

Ces zones ne présentent pas de risque *stricto sensu*, étant donné qu'il n'y a pas, actuellement, d'enjeu vulnérable menacé en surface.

Elles posent en revanche un problème d'aménagement du territoire puisqu'une grande partie de ces zones est située en périphérie immédiate de zones urbaines et qu'elles intéressent fortement les collectivités territoriales en vue d'une urbanisation future.

Pour être sûre et durable, une éventuelle future occupation de ces zones ne devra se faire qu'à condition de préserver la sécurité des personnes.

Une analyse multicritère en vue de simuler le risque potentiel de l'ensemble des zones ne comportant pas d'ouvrages vulnérables a été mise en œuvre. Elle a été conduite à partir des mêmes critères renseignés précédemment : la prédisposition de ruine de l'ouvrage au fond, l'intensité du phénomène attendu en surface et la vulnérabilité de la surface.

Concrètement, chacune de ces zones est hiérarchisée en simulant les différents types d'occupation du sol tels que ceux pris en compte pour la hiérarchisation du risque (c'est-à-dire que l'on simule des constructions qui n'intègrent pas d'éventuelles dispositions constructives particulières vis-à-vis des travaux miniers). Il s'agit de villes, villages, bâtiments longs ou bâtiments contigus dans une rue, zones pavillonnaires et Zones d'Activités (ZA) ou Zones Industrielles. Ces types d'occupation du sol se distinguent à la fois par la sensibilité du bâti aux effets d'un affaissement et par la densité de population dans la zone.

Pour la hiérarchisation des zones d'aléa, la valeur du critère étendue de la zone vulnérable change. En effet l'étendue des zones d'aléa inclut l'ensemble de la surface du sol susceptible d'être influencée par l'effondrement au fond (annexe 3.3). Les effets potentiels d'un tel effondrement au fond affectent l'étendue de la zone d'affaissement ainsi que sa zone d'influence. Une même typologie d'occupation du sol adaptée doit y être proposée.

A partir de la hiérarchisation proposée ci-dessus, les zones sont réparties en 5 types d'aléas vis-à-vis de l'occupation possible de leur surface :

- **les zones d'aléa très fort** : zone pour lesquelles l'aléa effondrement brutal ne peut être écarté. Ce type d'événement, très particulier, a fait l'objet d'une analyse spécifique qui sort du cadre de ce rapport. Compte tenu de la brutalité et de la soudaineté d'un effondrement brutal, aucune préconisation d'occupation des sols ne peut être faite ;
- **les zones d'aléa fort** : zones pour lesquelles toute occupation du sol, même la moins vulnérable par rapport à un affaissement minier, nécessiterait la mise en place d'une surveillance équivalente à celles préconisées pour les classes de surveillance 1 et 2 ;

- **les zones d'aléa moyen** : zones pour lesquelles seules des constructions de type ZA ou pavillonnaires ne nécessitent pas de surveillance. Pour toute construction plus vulnérable de type immeuble, une telle surveillance deviendrait nécessaire ;
- **les zones d'aléa faible** : zones qui ne nécessitent pas de surveillance particulière, quelle que soit leur occupation du sol ;
- **les zones d'aléa « nul à négligeable »** : zones pour lesquelles la prédisposition à un effondrement au fond ne peut être négligée mais dont les éventuelles conséquences en terme d'affaissement et de déformation en surface sont très faibles (seuils fixés : $A_m < 10$ cm, déformation $< 0,1$ mm/m). Elles sont conservées pour mémoire mais ne sont pas affichées cartographiquement.

Rappelons que l'appartenance d'une zone aux classes d'aléa très fort (effondrement brutal en surface) et nul à négligeable (intensité de l'affaissement négligeable) découle de la vérification de conditions explicitées au chapitre 4.3. L'appartenance d'une zone à l'une des 3 autres classes intermédiaires s'appuie sur l'outil de hiérarchisation ELECTRE TRI.

La détermination « pratique », à partir des résultats ELECTRE, des typologies d'aléa Fort, Moyen, Faible est précisée dans l'annexe 3.4.

4.6.4 Mise en œuvre des différentes hiérarchisations

Compte tenu des différents objectifs de classification, il est nécessaire de séparer l'identification ainsi que les caractéristiques des zones en trois familles : les zones à l'aplomb de bâti, celles à l'aplomb d'infrastructures et les zones ne présentant pas d'ouvrages en surface.

Critères	Zones à surveiller sous bâti	Zones à surveiller sous infrastructures	Zones d'aléa (ne comportant pas d'ouvrage en surface)
Prédisposition d'une rupture au fond	Sollicitation totale Présence de failles Superposition des piliers Taille et régularité des piliers Sensibilité à l'ennoyage		
Intensité de l'affaissement en surface	Profondeur Amplitude maximale attendue de l'affaissement Déformation attendue		
Vulnérabilité	Etendue de la zone vulnérable (limitée aux éléments en surface à protéger)		Etendue de la zone vulnérable (surface au sol influencée par l'effondrement au fond)
	Vulnérabilité du bâti	Vulnérabilité des routes Vulnérabilité des voies ferrées Vulnérabilité des ouvrages d'art Vulnérabilité des réseaux divers	Vulnérabilité simulée du bâti

Tableau 4 : récapitulatif des critères à renseigner

Les deux hiérarchisations des zones à surveiller avec pour objectif la définition de moyens de surveillance garantissant la sécurité publique, d'une part, ainsi que la préconisation d'une typologie de surveillance des zones d'aléa, d'autre part, relèvent de la problématique du tri. En effet, on dispose de 4 classes de moyens de surveillance pour la première hiérarchisation et de 5 types de zones d'aléa pour la seconde. La procédure d'agrégation doit alors pouvoir préconiser pour chaque zone une classe de surveillance ou une classification en type d'aléa.

Les tableaux 5 et 6 ci-dessous montrent les valeurs codées de référence des critères qui bornent les classes de surveillance respectivement pour la hiérarchisation des zones à risque d'effondrement situées à l'aplomb du bâti et celles situées à l'aplomb d'infrastructures importantes. Il suffit de « comparer » chaque zone à surveiller à ces références pour déterminer la seule et unique classe de surveillance de la zone considérée.

Critères	Limite C ₁ – C ₂	Limite C ₂ – C ₃	Limite C ₃ – C ₄
Prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier :			
Sollicitation corrigée	140	100	85
Présence de faille	10	10	0
Superposition des piliers	40	10	10
Taille et régularité des piliers	20	10	10
Sensibilité à l'ennoyage	20	10	10
Intensité de l'affaissement :			
Profondeur	100	150	200
Affaissement maximum attendu	1,80	1,40	1,00
Déformation	15	12,3	10,5
Vulnérabilité de la surface :			
Vulnérabilité du bâti	30	20	20
Etendue de la zone vulnérable	35	20	10

Tableau 5 : Valeurs codées de référence pour la hiérarchisation des zones à risque d'effondrement situées à l'aplomb du bâti

Critères	Limite C ₁ – C ₂	Limite C ₂ – C ₃	Limite C ₃ – C ₄
Prédisposition à la rupture de l'ouvrage minier :			
Sollicitation corrigée	110	90	75
Présence de faille	10	10	0
Superposition des piliers	40	40	10
Taille et régularité des piliers	20	10	10
Sensibilité à l'ennoyage	40	30	20
Intensité de l'affaissement :			
Profondeur	150	175	200
Affaissement maximum attendu	1,50	1,25	1,00
Déformation 1.5*(Am/Hmin)	15	15	12,45
Vulnérabilité de la surface :			
Vulnérabilité des routes	50	30	20
SNCF	50	20	20
Ouvrage d'art	10	10	0
Réseaux	50	20	10
Etendue de la zone vulnérable	5	2.5	2,5

Tableau 6 : Valeurs codées de référence pour la hiérarchisation des zones à risque d'effondrement situées à l'aplomb d'infrastructures importantes

4.6.5 Exemple de résultat

La carte présentée en figure A est un extrait de la cartographie obtenue par la classification des zones à surveiller. La carte présentée en figure B est un extrait de la cartographie obtenue par la classification des zones d'aléa.

On notera que les couleurs des légende employées ne sont pas réglementaires. Elles ont été choisies pour illustrer le propos du présent rapport.

Sur l'extrait de la carte de classification des zones à surveiller (figure A), outre les limites de concessions et de communes, les 4 classes définies précédemment sont cartographiées :

- **Classe 1** : zones nécessitant l'application de méthodes de surveillance continue.
- **Classe 2** : pour ces zones, des méthodes de surveillance périodique suffisent à assurer la sécurité des personnes et des biens. En cas d'apparition du moindre signe précurseur d'un désordre en surface, on passera d'une surveillance périodique à une surveillance continue.
- **Classe 3** : zones pour lesquelles des mesures visant à préciser le risque doivent être prises. A la lumière de ces résultats, il sera décidé s'il convient de surveiller cette zone ou non si le risque n'existe plus (zone déjà effondrée par exemple).
- **Classe 4** : pour ces zones, un nivellement de référence en surface suffira, compte tenu du faible niveau de risque.

Sur l'extrait de la carte de classification des zones d'aléa (figure B), outre les limites de concessions et de communes, les 5 classes définies précédemment sont cartographiées :

- **les zones d'aléa très fort** : zone pour lesquelles l'aléa effondrement brutal ne peut être écarté ;
- **les zones d'aléa fort** : zones pour lesquelles toute occupation du sol, même la moins vulnérable par rapport à un affaissement minier, nécessiterait la mise en place d'une surveillance équivalente à celles préconisées pour les classes de surveillance 1 et 2 ;
- **les zones d'aléa moyen** : zones pour lesquelles seules des constructions de type ZA ou pavillonnaires ne nécessitent pas de surveillance. Pour toute construction plus vulnérable de type immeuble, une telle surveillance deviendrait nécessaire ;
- **les zones d'aléa faible** : zones qui ne nécessitent pas de surveillance particulière, quelle que soit leur occupation du sol ;
- **les zones d'aléa « nul à négligeable »** : zones pour lesquelles la prédisposition à un effondrement au fond ne peut être négligée mais dont les éventuelles conséquences en terme d'affaissement et de déformation en surface sont très faibles (seuils fixés : $A_m < 10$ cm, déformation $< 0,1$ mm/m).

5. CONCLUSION

Le programme de recherche de l'INERIS pour le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (EAT-DRS-03) s'inscrit dans la démarche d'analyse globale et de gestion durable des risques et des conséquences à long terme liés à la présence d'exploitations minières arrêtées ou abandonnées. Il comporte quatre objectifs dont le **quatrième** consiste à améliorer les connaissances dans le domaine des méthodes d'évaluation et de hiérarchisation des risques miniers résiduels et mettre au point une méthode opérationnelle d'évaluation et de gestion globale de ces types de risque. Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de ce quatrième objectif.

Les affaissements miniers survenus ces dernières années dans le bassin ferrifère lorrain (Auboué 1996, Moutiers 1997, Moyeuve-Grande 1998, Roncourt 1999), longtemps après l'arrêt définitif des travaux d'extraction, ont conduit à une prise de conscience de la gravité des problèmes liés à la phase post-abandon. Cette prise de conscience a entraîné un besoin crucial de recherche et de développement, dans les différentes disciplines concernées (géotechnique, géologie, hydrogéologie, analyse et gestion du risque, chimie des eaux, etc.) pour prévoir et prévenir les phénomènes affectant les mines arrêtées ou abandonnées. La complexité des problèmes nécessite donc une approche pluridisciplinaire à laquelle souscrit la méthode proposée dans le cadre du présent rapport.

La méthode proposée se décompose en 7 phases et est employée dans le cadre de la hiérarchisation des zones à risque d'affaissement dans la bassin ferrifère lorrain. Elle répond à des exigences de clarté et d'évolutivité induite par l'importance des enjeux du site d'étude.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Rapports INERIS :

Méthodologie d'introduction des données nouvelles relatives aux travaux d'exploitation dans le SIG – mines de fer de la DRIRE Lorraine, septembre 1999
Cauvin L. (INERIS-DRS-99-21922/R01).

Géoréférencement des plans d'exploitations minières, août 2001 L. Cauvin (INERIS-DRS-01-26144/R01).

Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines, avril 2001
Didier C. (INERIS-DRS-01-25750/R01).

Prévision des conséquences des affaissements miniers dans les mines de fer de Lorraine. Evaluation du type d'effondrement sur 21 zones hiérarchisées du bassin ferrifère lorrain, septembre 2001 M. Al Heib/S. Kouniali (INERIS-DRS-01-20710/R01).

Pévision des conséquences des affaissements miniers dans le bassin ferrifère lorrain. Etude méthodologique pour la prévision de la cuvette d'affaissement, mai 2002 Al Heib M. (INERIS-DRS-02-26146/RN02).

- Autres documents :

Aissoui K., 1999 : Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines a l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques, Thèse INPL.

Arcamone J., 1980 : Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale ou partielle. Thèse Docteur-Ingénieur, INPL – Ecole des Mines de Nancy.

Bubenicek L., 1961 : Recherches sur la constitution et la répartition des minerais de fer d'Aalénien de Lorraine. Sciences de la terre – Tome VIII NANCY 1961.

Kratzsch H., 1983 : Mining Subsidence Engineering, Springer-Verlag.

Dalstein G., 1994 : Les chantiers du fer – Edition Serpenoise Metz 1994.

Drouard J., Templier A., Septembre 1968, Affaissements de surface - Déformation des terrains. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'étude de Mécanique des roches ; 40 p.

Maury V., Octobre 1979 : Industrie Minérale : Effondrements spontanés. Synthèse d'observations et possibilité de mécanisme initiateur par mise en charge hydraulique.

Navet F. 1997 : Lorraine : les mines de fer – Edition Serpenoise Metz 1997.

NCB., 1975 : Subsidence engineer's Hand book. National Coal Board, London 111 p.

NCB, 1982 : The traitement of digaged shafts and adits. NCB library, 88 p.

Piguet J.P. et Wojtkowiak F., 2001 : Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : Mécanismes et évolution dans le temps. Mines et Carrières - Industrie Minérale.

Poirot R., 1992 : Puits abandonnés. Rapport INERIS pour Charbonnages de France. Référence INERIS-GAI-RSh/CS 71-3034/R01 rédigé par Poirot R., Tauziède C., R. Schwartzmann sous la direction de Josien J-P et daté de juillet 1992.

Proust A., 1964 : Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais. Revue de l'Industrie Minérale, Juin-Juillet 1964, 46 n° 6 et 7, 68.

Saxena N.C., Singh B., 1980 : Investigation into the safety of the railway line against ground movement due to extraction of thick seams in india, in proceeding of Symposium on Rock mechanics, université du Missouri. Pp 345-355.

Tincelin E., Avril 1995 : Industrie Minérale : Essais d'explication des grands effondrements spontanés survenus dans les mines de fer depuis le début du siècle. Conclusions pratique à en tirer pour l'exploitation.

Tincelin E., Daniau R., Sinou P., Leonet D., De Winter D., 1981 : Prévission des effondrements de surface à partir des mesures en souterrain. Revue Française de Géotechnique. N°14 BIS.

Tincelin E., Leonet D., De Winter D., 1981 : Dimensionnement des exploitations souterraines et stabilité de la surface. Revue Française de Géotechnique. N°14 BIS.

Tincelin E., Sinou P., 1962 : Industrie Minérale : Effondrements brutaux et généralisés. Coup de toit.

Varoquaux J.A., 1995 : Les mines de fer de France – Chambre syndicale des mines de fer 1995.

Wagner, Schumann, 1991 : Surface effects of total coal seam extraction by underground mining methods. J.S.Af. Inst. Main. Metall. Vol91 N.7, Juillet 1991 pp. 221-231.

7. GLOSSAIRE

Remarque : les chiffres entre parenthèses indiquent la source d'où est extraite la définition.

Affaissement : dépression topographique, sans rupture, dont la formation est la conséquence de la déformation et du fléchissement, souples et progressifs, des terrains sus-jacents à une exploitation souterraine. (1). Le terme subsidence est parfois employé. Il vient du terme anglophone qui englobe à la fois les phénomènes d'affaissement, de fontis et d'effondrement. Il est d'usage de distinguer les phases d'affaissements **initial** et **principal** (avant l'arrêt définitif des travaux d'extraction) et la phase d'affaissement **résiduel** qui ne représente que quelques % de l'amplitude de l'affaissement final et qui correspond à la part de l'affaissement observé après l'arrêt définitif des travaux d'extraction. ajouter reprise d'affaissement.

Aléa : phénomène de probabilité d'occurrence et d'intensité données (par extension de 5). Par exemple, aléa « mouvements de terrain ». Remarque : lorsque le phénomène n'est pas cyclique, on privilégiera la notion de prédisposition à celle de probabilité d'occurrence.

Aléa de référence :

- en présence d'événements historiques identifiés sur le site plus fort événement crédible (au moins centennal ou plus si danger humain, à l'exclusion des phénomènes exceptionnels d'occurrence géologique) reproductible sur le site à dire d'expert **sauf si** une analyse spécifique conduit à considérer comme vraisemblable un événement de plus grande ampleur ;
- en l'absence d'antécédents identifiés sur le site considéré, plus fort événement potentiel vraisemblable à échéance centennale ou plus en cas de danger humain ou bien plus fort événement historique, observé dans un secteur proche, présentant une configuration similaire au plan géologique, géomorphologique, hydrogéologique et structural (5).

Auscultation : observation in situ, usuellement par prise de mesures instrumentales, contribuant à établir un diagnostic de l'état d'un ouvrage ou d'une zone d'intérêt à un moment donné. Les informations interprétées peuvent être utilisées directement, faire l'objet d'un récolement avec d'autres données d'entrées ou servir de données d'entrées à un processus de diagnostic plus élaboré (modélisation numérique par exemple).

Bassin de risque : entité géographique soumise aux mêmes types de phénomènes (par extension de 5).

Classe : ensemble d'éléments ayant au moins une caractéristique commune (4).

Classe d'aléa : ensemble d'éléments qui partagent le même niveau d'aléa.

Conséquence : résultat d'un événement (2).

Coulée de boue : mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. (8)

Danger : état qui correspond aux préjudices potentiels d'un phénomène sur les personnes (par extension de 5). Contrairement au risque, le danger existe indépendamment de la présence humaine. Le danger d'écrasement, par exemple, est inhérent à une chute de blocs ou à un éboulement. Il est le même que les falaises soient situées en centre ville ou en pleine montagne.

Désordres : expression des effets directs et indirects d'un phénomène sur l'intégrité et le fonctionnement des milieux (par extension de 5). Les désordres sont caractérisés par différents indicateurs :

- physiques : désordres hydrauliques, géologiques, etc. ;
- socio-économiques : dysfonctionnements liés aux atteintes des services publics ;
- population : population isolée...

Dommmages : conséquences défavorables d'un phénomène sur les personnes, les biens et les activités (par extension de 5). On distingue les dommages directs (destruction matérielle, partielle ou totale, due à l'impact physique d'un phénomène naturel) et les dommages indirects (effets induits par certains dommages directs ou par la manifestation d'un phénomène sur les activités ou les échanges : interruption des activités, coupure des communications). Les dommages sont le croisement des enjeux et de leur vulnérabilité.

Eboulement (ou écroulement) : chute de masses rocheuses rapide, discontinue et brutale résultant de l'action de la pesanteur. (8). En ce qui concerne les éléments éboulés, on distingue les pierres (volume inférieur à 1 dm^3), les blocs (volume compris entre 1 dm^3 et 1 m^3), les gros blocs (volume supérieur à 1 m^3). Suivant le volume total éboulé, on distingue les chutes de pierres ou de blocs, d'un volume total inférieur à la centaine de m^3 , les éboulements en masse, d'un volume allant de quelques centaines de m^3 à quelques centaines de milliers de m^3 , et les éboulements en grande masse, d'un volume supérieur au million de m^3 .

Effondrement : abaissement brutal de la surface résultant d'un mouvement gravitaire. Il se produit de façon discontinue dans le temps et dans l'espace, voire, dans certains cas, de façon brutale et spontanée. L'effondrement se traduit par une rupture franche des terrains de surface et il résulte de la ruine ou rupture des ouvrages sous-jacents qui assuraient la tenue du massif (piliers, piliers couronne, planches...). On parle **d'effondrement localisé** lorsque cette rupture ne concerne qu'une zone d'extension limitée en surface et **d'effondrement en masse ou généralisé** lorsqu'il s'agit, au contraire, d'une rupture d'un nombre élevé de piliers. (1).

Enjeux : Personnes, biens, activités, moyens, infrastructures, patrimoines, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène (par extension de 5). Il peut s'agir par exemple d'une densité de population, d'un trafic autoroutier...

Evénement : phénomène identifié dans son contexte de temps et d'espace. Par exemple : le fontis est un phénomène. Le fontis survenu le 18 janvier 1995 dans le jardin de M. Durand est un événement.

Fontis : effondrement localisé qui s'initie par l'éboulement du toit d'une cavité souterraine et qui débouche au jour en créant un "entonnoir" dont le diamètre peut varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le terme de fontis désigne aussi bien le **mécanisme** de rupture que le phénomène (cratère observé en surface). (1).

Glissement de terrain : déplacement de vitesse variable mais généralement lent (quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture (surface de cisaillement) identifiable, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables. (8).

Hiérarchisation : Organisation d'éléments en une série croissante ou décroissante en fonction de leur importance ou de leur valeur (4).

Identification du risque : processus permettant de trouver, recenser et caractériser les éléments du risque (2).

Infrastructures : installations publiques (routes, ponts, rues, conduites d'eau, ports, etc.) servant à fournir des services essentiels qui accroissent la capacité de production de l'économie. (4).

Instabilité : traduit le changement manifeste d'intensité finie, d'états mécaniques ou de propriétés physico-chimique, avec le temps ou sous l'influence de petites perturbations extérieures.

Intensité : expression d'un phénomène, évaluée ou mesurée par ses paramètres physiques (5). Elle intervient dans l'évaluation de l'aléa. Par exemple, pour le phénomène « affaissement », il peut s'agir de l'amplitude verticale du mouvement ou de la déformation maximale. Pour le phénomène « effondrement ou glissement de terrain », il peut s'agir du volume de matériau remanié. Lorsqu'il n'est pas possible d'évaluer ces paramètres physiques, on peut alors recourir à des méthodes indirectes, basées sur l'importance de leurs conséquences potentielles en termes d'endommagement ou de dangerosité ou de l'importance des parades théoriquement nécessaires pour annuler le risque (6).

Mécanisme (de rupture) : processus au cours duquel la résistance d'un ou plusieurs élément(s) d'un système est atteinte et dépassée par la sollicitation qui s'y exerce (6). Dans le cadre des mouvements de terrain, il peut s'agir par exemple, de la rupture du toit, d'un pilier par flambage... Notons qu'un mécanisme ne mène pas nécessairement à une manifestation en surface (phénomène) (exemple : auto-comblement lors du mécanisme de fontis).

Phénomène : manifestation en surface résultant d'une instabilité effective (3). Dans le cadre des mouvements de terrain, il peut s'agir de l'affaissement, de l'effondrement localisé (fontis), de l'effondrement en masse ou généralisé, du tassement, du glissement...

Pondération : procédé permettant de donner à chaque élément une importance qui lui est propre, en lui affectant un coefficient (4).

Prévention : ensemble des dispositions visant à réduire les impacts d'un phénomène : connaissance des aléas, réglementation de l'occupation des sols, mesures actives ou passives de protection, information préventive, prévisions, alerte, plans de secours, etc. (5).

Probabilité d'occurrence : évaluation quantitative, en terme de fréquence ou de période de retour, de la survenance d'un phénomène pour une période de temps donnée (5). Dans le domaine des mouvements de terrain, on lui privilégie la notion de prédisposition. En effet, la plupart des mouvements de terrain n'étant pas des processus répétitifs, contrairement aux séismes et inondations, on est conduit à estimer qualitativement une probabilité de survenance d'un événement sur une période donnée sans référence à des grandeurs numériques.

Prévision : estimation de la date de survenance et des caractéristiques (intensité, localisation) d'un phénomène (par extension de 5). Dans le cadre des mouvements de terrain, compte tenu de l'approche qualitative inhérentes aux phénomènes non répétitifs, la prévision consiste à estimer la prédisposition d'un site vis-à-vis d'un phénomène d'intensité donnée pour une période de temps donnée.

Prédisposition : qualification d'un site à partir de l'évaluation et la pondération des paramètres favorables au déclenchement d'un mécanisme d'instabilité et à la survenance d'un phénomène pour une période de temps donnée (5).

Risque : exprime les dommages potentiels en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa. Combinaison des composantes d'un aléa (probabilité d'occurrence et intensité) par celles des enjeux et/ou de la vulnérabilité occasionés au cours d'une période donnée sur un site donné..

Risque naturel : dommages probables en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa naturel (par extension de 5).

Risque minier : dommages probables en vies humaines, en biens et en activités consécutives à la survenance d'un aléa lié à une exploitation minière (par extension de 5).

Rupture : traduit un état mécanique local (ou global) pour lequel la résistance d'un ou plusieurs élément(s) d'un système est atteinte et dépassée par la sollicitation qui s'y exerce.

Stabilité : traduit l'invariance d'états mécaniques ou de propriétés physico-chimique, avec le temps ou sous l'influence de petites perturbations extérieures.

Surveillance : système permettant le suivi, l'enregistrement et l'évaluation continu de l'évolution d'un mécanisme ou d'un phénomène, dans l'optique d'acquérir des informations permettant de prendre des mesures correctives adaptées (d'après 7). Processus d'auscultation continue, à l'échelle des phénomènes observés, visant à lancer des actions préventives dans les meilleurs délais possibles.

Tassement : abaissement (déplacement vertical) de la surface résultat de la consolidation des terrains. Cette consolidation peut être liée à une augmentation de contrainte liée à une surcharge ou à une modification de la teneur hydrique des terrains.

Taux de défrusement : coefficient adimensionnel défini par le rapport du volume exploité sur le volume total initial avant exploitation. (1).

Vulnérabilité : au sens strict, elle traduit le degré de perte ou d'endommagement des biens et des activités exposés à l'occurrence d'un phénomène d'une intensité donnée. Par exemple, elle est nulle pour les constructions soumises à un séisme d'intensité MSK inférieure à VI et proche de 100 % pour les bâtiments non parasismiques exposés à un séisme d'intensité XI ou XII. (5). Au sens le plus large, elle exprime le niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux (5). Elle s'élargit alors à d'autres composantes de la société (sociales, psychologiques, culturelles, etc.) et tente de mesurer sa capacité de réponse à des crises.

Zonage réglementaire : réglementation organisant la répartition d'un territoire en zones et fixant pour chacune d'elles le genre et les conditions de l'utilisation du sol (4).

Zonage de risque/d'aléa : terme général désignant la subdivision d'un domaine géographique (pays, région, etc.) en secteurs homogènes en regard à certains critères (niveau d'aléa, niveau de risque...) (7).

Zone : portion d'un territoire délimitée par des frontières, mais également par rapport à des caractéristiques particulières ou des fonctions précises (4). Dans le cadre des études pour le bassin ferrifère lorrain, on appelle « zone à surveiller », la zone exploitée au fond susceptible d'entraîner des dommages en surface. La « zone d'aléa » est, pour sa part, la zone en surface qui présente un aléa lié à la présence des travaux du fond. Enfin, la « zone à risque » est la portion de la zone d'aléa qui présente un enjeu.

Zone homogène : une zone est dite homogène lorsque ses propriétés sont constantes ou tout au moins varient de manière peu sensible dans toute la zone.

SOURCES :

- (1) Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines. Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. 2001.
- (2) Commission française « Terminologie de la gestion du risque » - CF/ISO/TMB WG N 42 – Association Française de Normalisation (AFNOR) – Mai 2000.
- (3) Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risques de mouvements de terrains. Ministère de l'Environnement. 1996
- (4) Le Grand Dictionnaire Terminologique – Office de la langue française – Edition SEMANTIX – http://www.granddictionnaire.com/fs_global_01.htm
- (5) Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). Guide général. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Ministère de l'équipement, des transports et du logement. 1997.
- (6) Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Collection Environnement. Les risques naturels. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, LCPC, INERIS . Juin 2002.
- (7) Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes – Nations Unies, département des affaires humanitaires, IDNDR, Genève, 1992.
- (8) Plans de Prévention des Risques Naturels (PPRN). Risques de mouvements de terrain. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. Ministère de l'équipement, des transports et du logement. 1999.

8. LISTE DES FIGURES ET ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Figure A	Hiérarchisation des zones à surveiller	1 A3
Figure B	Hiérarchisation des zones d'aléa affaissement	1 A3
Annexe 1	Aide multicritère à la décision. Méthode ELECTRE TRI	25 A4
Annexe 2	Méthode de SIMOS révisée	5 A4
Annexe 3	Procédure opérationnelles pour le renseignement des critères retenus dans le cadre de la hiérarchisation des risques liés aux affaissements dans le bassin ferrifère lorrain	30 A4