

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-05-55102/R02

22/12/2005

**Contribution au développement d'outils d'aide à
l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM
Aléa « mouvements de terrain » pour les
gisements pentés et filoniens**

**Partie 2 : Typologie des événements redoutés
au droit d'exploitations pentées et/ou
filoniennes**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM Aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens

Partie 2 : Typologie des événements redoutés au droit d'exploitations pentées et/ou filoniennes

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie

Direction de l'Action Régionale, de la Qualité et de la Sécurité Industrielle (DARQSI)

Autres personnes ayant participé à l'étude :

F. POULARD, ingénieur à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol.

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	C. LAMBERT	R. SALMON	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'exploitation du sous-sol à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE

1. DÉFINITION DES DÉSORDRES.....	11
1.1 Effondrement localisé.....	11
1.1.1 Effondrement par rupture d'une tête de veine de filon ou d'une veine pentée (rupture du pilier couronne).....	12
1.1.1.1 Définition et mécanismes de rupture	12
1.1.1.2 Conséquences en surface.....	14
1.1.2 Effondrement localisé par rupture de pilier(s) isolé(s).....	15
1.1.3 Effondrement localisé par éboulement d'une galerie ou du toit d'une chambre (fontis).....	16
1.1.4 Effondrement localisé lié au débouillage d'un chantier remblayé	17
1.1.5 Effondrement localisé par rupture ou débouillage d'ouvrage	19
1.2 Facteurs aggravants.....	19
1.3 Affaissement	20
1.3.1 Définition.....	20
1.3.2 Mécanismes de rupture	21
1.3.3 Géométrie de la cuvette d'affaissement.....	22
1.3.4 Conséquences en surface	25
1.4 Effondrement généralisé	26
1.4.1 Nature du phénomène et mécanisme de rupture	26
1.4.2 Critères de prédisposition	26
1.4.2.1 Rétroanalyse	26
1.4.2.2 Prédisposition à la rupture.....	27
2. EVALUATION DES ALÉAS	29
2.1 Effondrement localisé.....	29
2.1.1 Rupture de pilier couronne	29
2.1.2 Rupture de toit d'une chambre, d'une galerie isolée ou d'un pilier isolé ..	33
2.1.3 Effondrement localisé lié à un débouillage de remblai dans un chantier penté.....	38
2.1.4 Effondrement localisé par rupture d'ouvrage ou débouillage.....	39
2.1.5 Cartographie de l'aléa.....	39
2.2 Affaissement	40

2.2.1 Profil de la cuvette d'affaissement	41
2.2.1.1 Méthodes empiriques	41
2.2.1.2 Méthodes numériques	49
2.2.2 Affaissement maximal et déformations	54
2.2.2.1 Méthodes empiriques	54
2.2.2.2 Méthodes semi-empiriques	58
2.2.2.3 Méthodes numériques	59
3. APPLICATION AUX SITES DE LA BASE DE DONNÉES INERIS.....	61
4. CONCLUSION.....	63
5. RÉFÉRENCES	67
6. GLOSSAIRE.....	71
7. LISTE DES ANNEXES	77

SYNTHÈSE

Le travail présenté dans ce rapport est réalisé dans le cadre d'une convention, financée sur le Titre V du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. L'un des thèmes de cette convention est de développer un outil méthodologique d'évaluation de l'aléa « instabilité des terrains » adapté aux particularités des exploitations pentées et filoniennes pour des besoins spécifiques de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers.

On désigne sous la terminologie d'exploitations pentées ou filoniennes : les exploitations en couche (dressants) à plus de 45° de pendage, les exploitations en filon (lentilles ou amas peu épais) et les exploitations en amas épais ou de forme ovoïdique.

Le premier volet de cette étude correspondait au « bilan des connaissances ». Il a fait l'objet du rapport INERIS DRS-05-55102/R01 du 29 juillet 2005. Un inventaire visant à rassembler les données caractéristiques principales pour chacun des sites a été établi.

Le second volet « analyse des informations » est présenté dans le présent rapport. Il a pour but de définir une typologie d'événements redoutés en fonction des contextes des gisements et des méthodes d'exploitation.

Désordres observés

Les gisements pentés et filoniens, comme les gisements en plateaux, sont soumis à des éboulements au fond susceptibles d'affecter les terrains de surface. Ainsi, durant la période qui suit l'exploitation, traditionnellement appelée « après-mine », de nombreux désordres se sont développés, parfois dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement.

Les retours d'expérience de désordres au droit d'exploitations pentées ou filoniennes que nous avons étudié mettent en évidence des caractéristiques liées à des mécanismes de rupture et à des répartitions de contraintes en relation avec le pendage élevé du gisement :

- Effondrement localisé lié à une rupture du stot de protection (pilier couronne) lorsque l'exploitation s'est développée trop proche de la surface ;

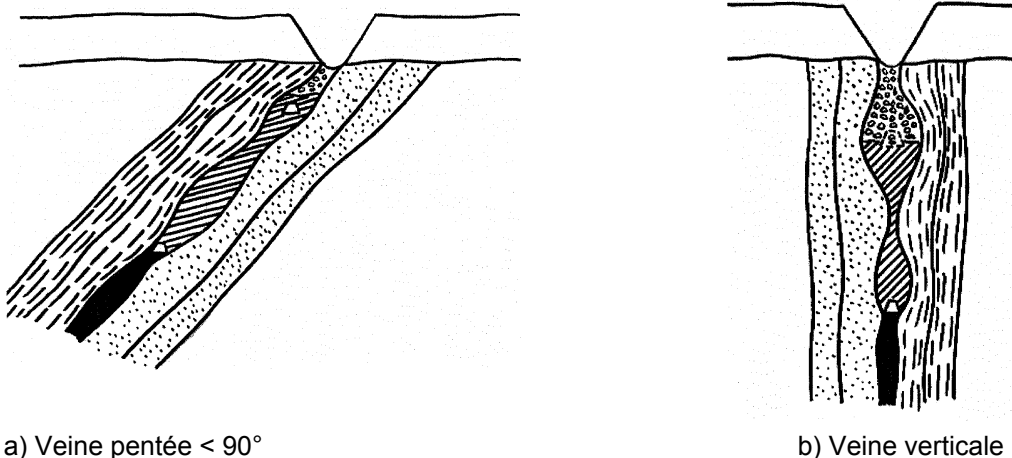


Figure A : Rupture d'une tête de veine pentée

- Effondrement localisé lié à une rupture d'un barrage d'arrêt souterrain et à un déboufrage des produits de comblement vers des vides plus profonds ;

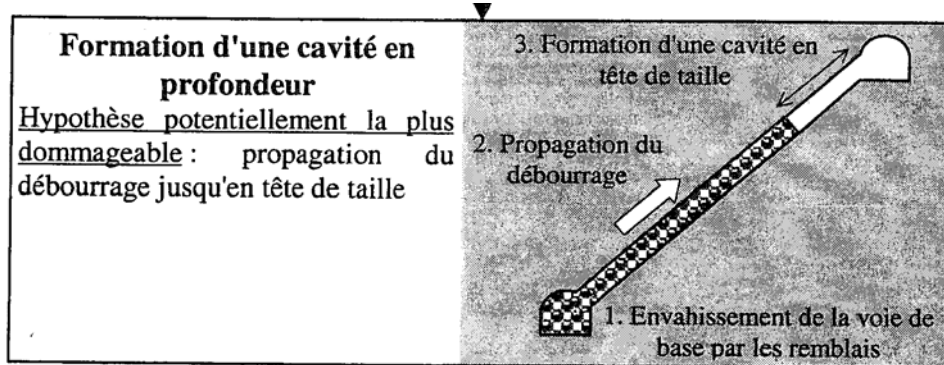


Figure B : Rupture d'un barrage et déboufrage d'un chantier penté remblayé

- Effondrement localisé lié à une rupture du toit de la chambre (fragilité des épontes) ;

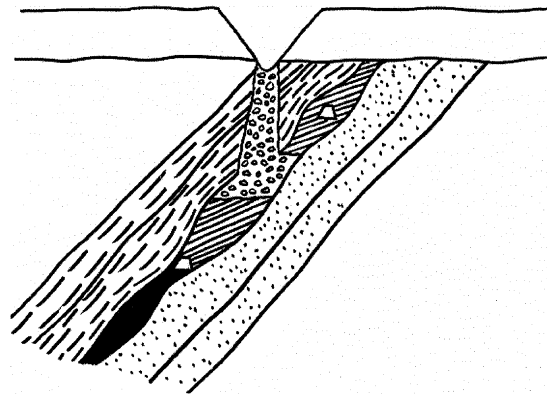


Figure C : Effondrement localisé de type fontis au droit de zone de travaux

- Affaissements dissymétriques.

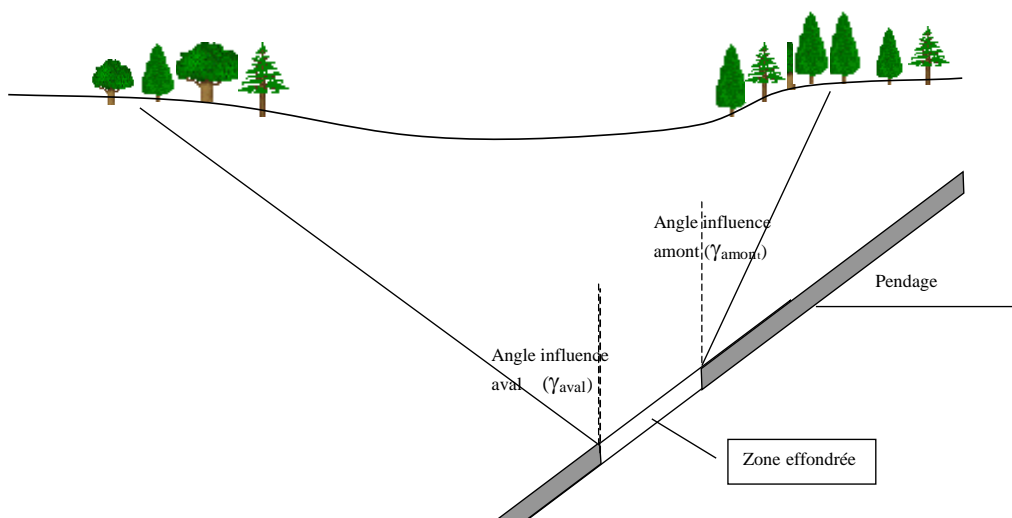


Figure D : Représentation schématique de la cuvette d'affaissement et des angles d'influence amont et aval en gisement penté

Aucun exemple de phénomène d’effondrement généralisé lié à des gisements pentés et/ou filoniens n’a été retrouvé dans nos recherches documentaires.

Retours d’expérience

Les principaux critères à prendre en compte lors d’une évaluation des aléas en gisements pentés et/ou filonien sont :

- La géométrie des travaux (largeur exploitée des panneaux) ;
- L’ouverture des chantiers souterrains ;
- La méthode d’exploitation (présence de vides résiduels, de chantiers remblayés, taux de défruitement, etc.) ;
- Le pendage des couches ;
- La profondeur des panneaux ;
- L’épaisseur du stot de protection en surface, quand il existe ;
- La nature et les caractéristiques, notamment mécaniques, des terrains de recouvrement, la présence de failles, la topographie de surface, etc.

Les gisements filoniens présentent toutefois des particularités. Les irrégularités de la minéralisation et les difficultés à définir la position des filons et de leurs affleurements entraînent un zonage de l’aléa prenant en compte ces incertitudes par l’ajout notamment d’une marge d’incertitude plus ou moins large.

Le tableau suivant présente quelques conditions d’apparition de désordres en surface. Ils proviennent des retours d’expérience français que nous avons étudiés.

		Pendage du gisement	Profondeur de l'exploitation*	Méthodes d'exploitation	Remarques
Effondrement localisé	Rupture du stot de protection	45° à 90°	0 à 50 m**	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	effondrement situé à l'affleurement, allongé dans le sens de la couche (type gouttière)
	Eboulement du toit de la chambre ou de pilier isolé ou de galeries isolées	0 à 60°	0 à 80 m	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	effondrement circulaire
	Rupture d'ouvrage	0 à 90°	-	puits, descenderies	-
	Affaissement	0 à 90°	toute	exploitations remblayées ou exploitations partielles à forte profondeur	cuvette d'affaissement dissymétrique et amplitude de l'affaissement (centre de la cuvette) plus faible peut s'accompagner de crevasses
	Effondrement généralisé	0 à 45°	-	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	aucun retour d'expérience de ce type de désordre en gisement penté ou filonien

*valeurs indicatives ne prenant pas en compte la présence de facteurs aggravants comme les phénomènes karstiques

**épaisseur du stot de protection

Tableau A : Conditions d'apparition de désordres en surface liés à des exploitations pentées ou filoniennes

Les valeurs données dans le tableau A ci-dessus sont indicatives. Elles peuvent varier selon les conditions géologiques du site (recouvrement calcaire ou très altéré). La présence de facteurs aggravants comme l'eau ou le temps (agissant notamment sur le vieillissement des matériaux) est à prendre en compte. Il est nécessaire de se baser sur les retours d'expérience recueillis sur le site étudié.

Evaluation des aléas

Diverses méthodes existent pour évaluer ces types de désordres. Qu'elles soient numériques ou empiriques, elles sont, en principe, basées sur des exemples de désordres observés. Leur domaine d'application est souvent restreint mais peut s'élargir par extrapolation (cas des abaques d'affaissement).

Effondrement localisé

L'effondrement localisé peut être induit par divers mécanismes :

- Les ruptures ou instabilités d'ouvrage (puits, descenderie...) et les ruptures de toit de galerie isolée sont des mécanismes qui ne sont pas exclusifs aux gisements pentés ou filoniens. Ce type de rupture n'est pas nécessairement lié au pendage du gisement ;

- Les ruptures de toit de chambre ou de pilier isolé donnant naissance au phénomène de fontis. Ce type de désordre apparaît également pour les gisements en plateure. Toutefois, compte tenu du pendage des exploitations, de l'écoulement du matériau éboulé vers l'aval, les conditions d'autocomblement sont plus difficiles à atteindre. La hauteur maximale de remontée d'un fontis est supérieure à celle attendue dans un gisement en plateure, toutes choses égales par ailleurs. Des approches volumétriques existent cependant pour évaluer la hauteur de remontée d'un fontis à la surface en fonction du pendage. De ce fait, le tableau A reste indicatif ;
- La déstabilisation de la couronne en tête des chambres qui conduit à la rupture des stots de protection de la surface (pilier couronne). Ce mécanisme se produit lorsque les chambres montantes partant de la voie de base sont exploitées trop près de la surface. Une approche empirique basée sur les retours d'expérience trouvés sur le site ou sur des bassins analogues permet de mieux appréhender le phénomène de rupture du stot de protection. Là encore, les conditions du tableau A restent indicatives. La rétroanalyse fait apparaître que l'intensité des désordres augmente avec le pendage de la couche. Naturellement, une plus grande inclinaison de la couche facilite l'écoulement des éboulis dans les chambres et minimise le processus de blocage des éboulis plus en profondeur. Elle favorise ainsi l'extension du désordre en surface (effondrement de type « gouttières »). Il semble, en outre, très probable que la présence d'anciennes tranchées creusées à ciel ouvert (désignées « minières ») soit également à l'origine du phénomène ;
- La rupture d'un barrage d'arrêt souterrain, pour les couches fortement pentées, lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides. Il peut induire un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit l'apparition de vides proches de la surface et peut entraîner des ruptures des types précédents.

Affaissement

L'une des incidences du pendage reconnue unanimement par tous les auteurs et démontrée par toutes les mesures de terrain est le décalage (vers l'aval) du point d'affaissement maximal par rapport à ce que serait sa position dans le cas de couches en plateure. Ce décalage influence généralement sur la cuvette d'affaissement : profil de la cuvette, déformations et pentes. La forme de la cuvette d'affaissement est dissymétrique.

Lorsque la profondeur d'exploitation devient importante, l'influence de l'angle aval se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement mais, en contrepartie, par des amplitudes d'affaissement vertical et des déplacements différentiels horizontaux plus faibles. En revanche, coté amont les déplacements augmentent sensiblement.

L'amplitude de l'affaissement maximal dans le cas de gisements pentés est plus faible que celle attendue pour des gisements en plateure, toutes choses égales par ailleurs. Elle est, selon certains auteurs, fonction du cosinus de l'angle de pendage. L'amplitude maximale de l'affaissement est directement proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Le coefficient de proportionnalité dépend notamment de la profondeur des travaux, de la méthode d'exploitation

(défrètement) et de traitement des vides (foudroyage ou remblayage). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées sont d'ordre décimétrique à métrique.

Plusieurs abaques ont été proposés pour déterminer les angles de la cuvette d'affaissement et la déformation maximale attendue en fonction du pendage du gisement.

Nota : pour apprécier les facteurs de prédisposition et l'intensité d'un phénomène redouté, rappelons que l'approche globale d'évaluation des aléas « mouvement de terrain » présentée dans ce rapport ne se substitue pas à une étude particulière de site.

1. DÉFINITION DES DÉSORDRS

Certains désordres, estimés caractéristiques, sont détaillés dans l'annexe 1. Ces désordres se situent dans les bassins ferrifères de l'Ouest ou dans le bassin houiller de Lorraine.

Une synthèse non exhaustive des désordres répertoriés dans les études liées à divers PPRM est présentée en annexe 2.

En effet, l'analyse des phénomènes accidentels potentiels est largement mise à profit lorsque l'on procède à une recherche qui se place à l'échelle de l'ensemble du bassin de risque, voire de plusieurs bassins de risque s'ils présentent de fortes analogies (ex : gisements ferrifères des synclinaux de Soumont, May-sur-Orne, La Ferrière-aux-Etangs et Segré, annexe 3).

Les désordres observés dans ces différents bassins sont comparables (essentiellement des effondrements localisés par rupture de couronne, des débousses de puits ou cheminées ou des affaissements).

1.1 EFFONDREMENT LOCALISÉ

Définition

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale (diamètre) varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des travaux souterrains mais il n'est pas rare qu'elle atteigne une dizaine de mètres même si, dans la majorité des cas, elle se limite à quelques mètres.

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

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

Les désordres observés ou mentionnés dans les gisements pentés (exemples A, B, C et D de l'annexe 1) se présentent en surface sous la forme d'effondrements localisés de grandes dimensions (en forme de « gouttière », dans la direction de la couche, lorsque l'effondrement du stot correspond à la largeur de la chambre) ou d'effondrements de forme circulaire et de taille le plus souvent limitée (fontis), lorsque l'instabilité est localisée de façon plus ponctuelle.

Modes de rupture

Les modes de rupture relèvent essentiellement des mécanismes suivants :

- Rupture du stot de protection de la surface, après éboulement de la couronne (exemple A de l'annexe 1) ;
- Rupture d'un pilier isolé ;

- Rupture du toit au droit de la chambre, suivie d'une remontée de la cloche d'éboulement jusqu'à la surface, du type fontis (exemple B de l'annexe 1) ;
- Rupture d'un barrage d'arrêt souterrain dans un chantier penté remblayé et débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds ;
- Rupture d'un ouvrage minier débouchant en surface (exemples C et D de l'annexe 1).

Le premier mode de rupture est spécifique à un pendage élevé des couches.

La plupart des désordres de type effondrement localisés se produisent après l'achèvement de l'exploitation des chantiers.

Ces événements se répartissent, sur les différents sites, de façon presque proportionnelle à l'étendue des travaux miniers (exemple des mines de fer de Normandie).

Ce type de désordres peut se produire principalement dans les exploitations par :

- Sous-niveaux abattus où en général tout le minerai, situé entre les deux niveaux, est pris, excepté quelques piliers irréguliers ;
- Chambres-magasins où la chambre est laissée vide après le soutirage ;
- Tranches descendantes sous remblai où les chambres ne sont souvent que partiellement remblayées ;
- Toutes les méthodes d'exploitation où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débouillage).

Pour les couches fortement pentées (filons, couches en dressant), lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides, la rupture d'un barrage d'arrêt souterrain peut induire un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit l'apparition de vides proches de la surface et peut entraîner des ruptures des types explicités ci-dessus.

1.1.1 EFFONDREMENT PAR RUPTURE D'UNE TÊTE DE VEINE DE FILON OU D'UNE VEINE PENTÉE (RUPTURE DU PILIER COURONNE)

1.1.1.1 DÉFINITION ET MÉCANISMES DE RUPTURE

Lorsque l'exploitation d'un filon ou d'une veine pentée s'est développée près de la surface, une rupture peut se développer par cisaillement le long des interfaces minerai - épontes ou encore par éboulement progressif de la couronne à un endroit où le minerai se trouve dans un état altéré (on parle alors de rupture du pilier couronne).

En Normandie (exemple A de l'annexe 1), ce mécanisme se produit lorsque les chambres montantes partant de la voie de base (aux niveaux - 40 à - 86 m pour les mines de fer) sont exploitées à moins de 20 - 25 m de la surface. Il semble, en outre, très probable que la présence d'anciennes tranchées creusées à ciel ouvert (désignées « minières ») soit également à l'origine du phénomène.

Il est important de noter que la notion de pilier « couronne » est différente de la notion classique de piliers dans la méthode des chambres et piliers abandonnés. Ce terme désigne la dalle de terrain en place séparant la surface et la galerie la

moins profonde (Crown pillar : pilier le plus proche de la surface, Figure 1 et Figure 2).

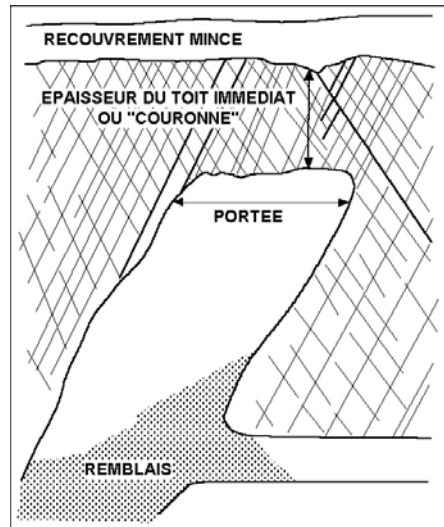


Figure 1 : Schéma général d'une « couronne » (d'après Hutchinson, Phillips et Cascante [19])

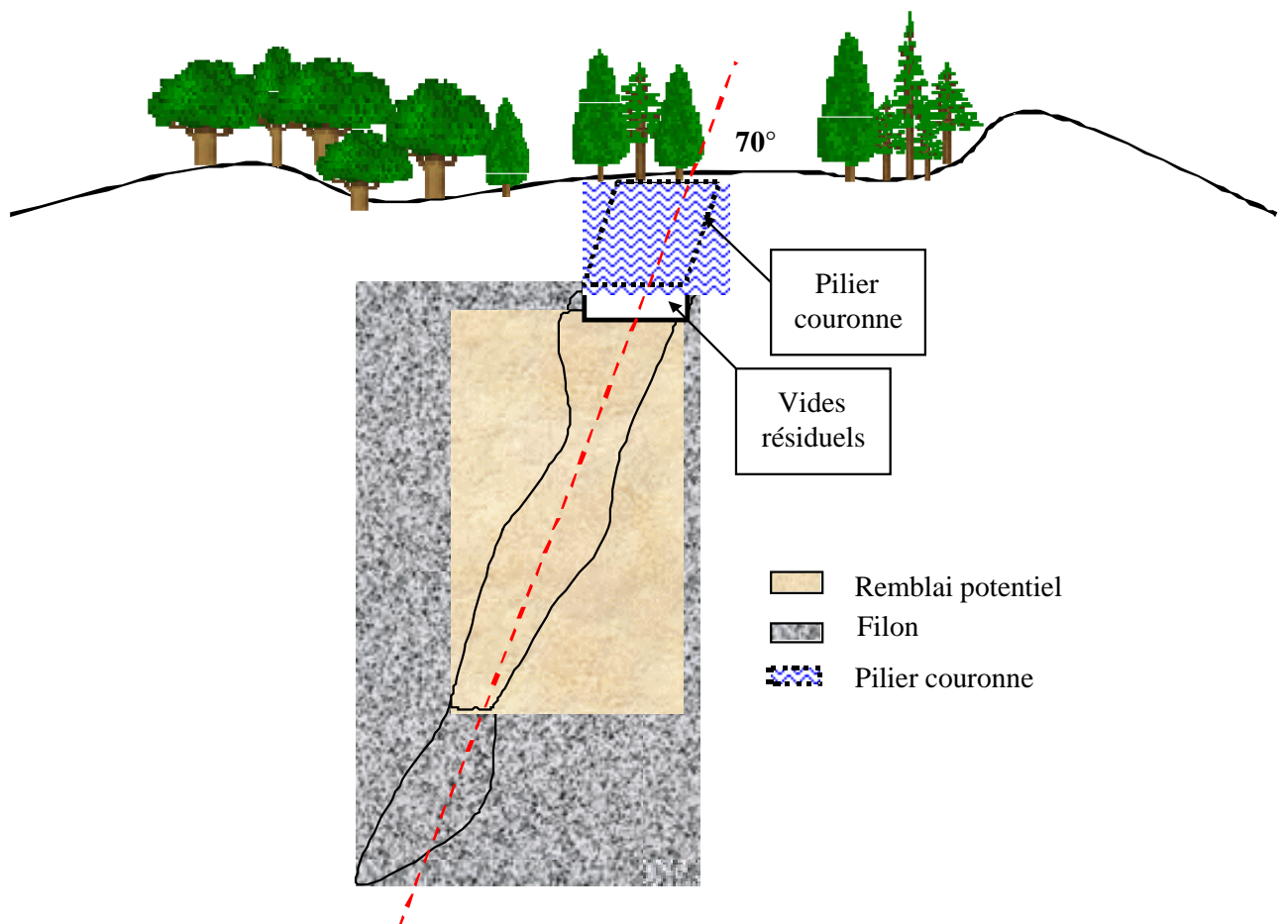


Figure 2 : Représentation schématique d'un pilier couronne

Du fait du pendage important des filons et du poids des terrains sus-jacents, les efforts tranchants s'appliquant aux épontes des filons peuvent dépasser la

résistance au cisaillement du massif et mettre en péril la stabilité du pilier « couronne ». Dans l'hypothèse d'une rupture de cette structure, le désordre peut alors « se propager » vers la surface de la même manière qu'une cloche de fontis et déboucher, plus ou moins brutalement, dans l'axe du filon exploité. Par opposition avec le phénomène de fontis, ce type de phénomène traduit le fait que les épontes du gisement sont plus résistantes que le minerai.

Il existe aussi des zones spécifiques d'un point de vue tectonique où la répartition des contraintes dans le massif est particulière. La contrainte horizontale peut être importante et parfois supérieure à la contrainte verticale. Cette répartition peut alors entraîner une convergence des épontes subverticales et une fermeture progressive des vides.

1.1.1.2 CONSÉQUENCES EN SURFACE

La forme du cratère en surface dépend étroitement de la nature des terrains et des caractéristiques d'exploitation mais peut différer du fontis par un contour plus allongé, aligné dans l'orientation de la veine. Si la largeur de l'effondrement n'excède ainsi que très rarement quelques dizaines de mètres, son extension longitudinale peut être plus importante dans le sens du filon ou de la veine (effondrement en forme de gouttière).

Notons que ce type de phénomène peut se rattacher à la famille des effondrements localisés dont l'intensité dépend principalement des dimensions du désordre en surface (diamètre, longueur ou largeur). La profondeur influe sur la dangerosité de l'effondrement mais, souvent délicate à prévoir, elle n'est pas souvent retenue. Parmi les principaux facteurs susceptibles d'influer sur le diamètre de l'effondrement, on retient pour qualifier l'intensité du phénomène : la dimension des vides résiduels au sein des travaux souterrains (volume) ainsi que l'épaisseur et la nature des terrains constituant le recouvrement dont le rôle est prépondérant sur les dimensions de l'entonnoir d'effondrement en surface.

Les dégâts de surface les plus spectaculaires par l'importance de leurs dimensions sont les effondrements localisés en forme de gouttières (dépressions allongées dans la direction de la couche atteignant, dans la région normande, 15 à 30 m de long, 8 à 15 m de large et 2 à 15 m de profondeur). On dénombre une demi-douzaine d'événements de ce type sur l'ensemble du bassin de Segré (49).

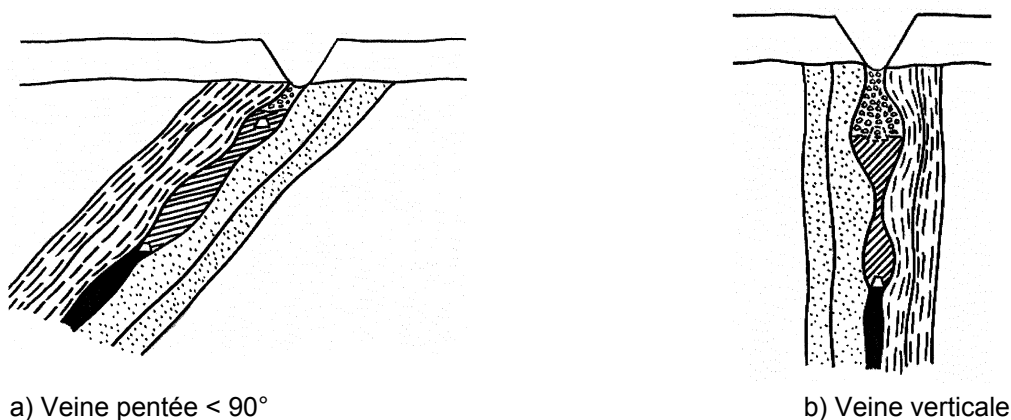


Figure 3 : Rupture d'une tête de veine pentée

1.1.2 EFFONDREMENT LOCALISÉ PAR RUPTURE DE PILIER(S) ISOLÉ(S)

Au sein d'une exploitation menée par la méthode des chambres et piliers abandonnés, la ruine d'un (ou de quelques) pilier(s) peut se traduire (Photographie 1), en surface, par un effondrement lorsque la profondeur des travaux et la raideur du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes. On parle alors de **rupture de pilier(s) isolé(s)**.



Photographie 1 : Dégradation d'un pilier dans une exploitation pentée par chambres et piliers (May-sur-Orne, 14)

La dimension de la zone affectée en surface est généralement plus importante que celle résultant d'un simple fontis (cf. 1.1.3) mais sensiblement plus réduite que dans le cas d'un effondrement généralisé décrit plus loin. Comme les fontis, les ruptures de piliers isolés sont des phénomènes locaux qui ne dépendent pas de la géométrie globale des exploitations mais uniquement de conditions locales défavorables.

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

Les exploitations pentées laissant en place des piliers de minerai (chambres et piliers, sous-niveaux abattus par exemple) sont particulièrement exposées à ce type de rupture. En effet, des études expérimentales, menées notamment par les Russes [44], ont montré que l'abandon de piliers en couche inclinée avec un axe normal à la stratification (Photographie 2) amène à la manifestation, dans les piliers, de contraintes de cisaillement et à une concentration élevée de contraintes. Les piliers soumis à cette répartition de contraintes peuvent être moins stables que dans le cas des gisements en plateaux. L'inclinaison des piliers vers l'amont pendage permet de se rapprocher de la distribution de contraintes des gisements en plateaux : les zones de compression se répartissent de tous les côtés du pilier et non plus de façon dissymétrique (au toit du côté amont pendage et au mur du côté aval pendage).



*Photographie 2 :
Exploitation par
chambres et piliers à
May-sur-Orne,
Calvados (axe du pilier
normal à la
stratification)*

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

1.1.3 EFFONDREMENT LOCALISÉ PAR ÉBOULEMENT D'UNE GALERIE OU DU TOIT D'UNE CHAMBRE (FONTIS)

On parle de « fontis » lorsque le désordre qui affecte la surface résulte de la remontée au jour d'un éboulement initié au sein d'une excavation souterraine (galerie, chambre d'exploitation, etc.). Lorsque la voûte initiée par la rupture du toit de l'excavation ne se stabilise pas mécaniquement du fait de la présence de bancs résistants et massifs au sein du recouvrement, elle se propage progressivement vers la surface et, si l'espace disponible au sein des vieux travaux est suffisant pour que les matériaux éboulés et foisonnés puissent s'y accumuler sans bloquer le phénomène par « autocomblement », la voûte peut atteindre la surface du sol.

L'apparition de ce type de désordre en surface ne concerne que les travaux peu profonds. Les retours d'expérience disponibles sur plusieurs bassins miniers (exemple B de l'annexe 1) ont montré que, sauf spécificité géologique ou d'exploitation, au-delà d'une soixantaine de mètres de profondeur (et parfois moins), les anciens vides miniers (dans des gammes d'ouvertures classiques : 2 à 4 ou 5 m) n'ont donné lieu à aucun fontis débouchant en surface.

Le type d'effondrement de forme circulaire et de moindres dimensions (le plus souvent 2 à 3 m de diamètre, plus rarement jusqu'à 15 m) est, de loin, le plus fréquent. Il affecte les exploitations quelque soit le pendage. L'origine de ce phénomène est semblable à celle de la rupture de couronne ou du toit, avec un développement en « remontée de cloche de fontis ».

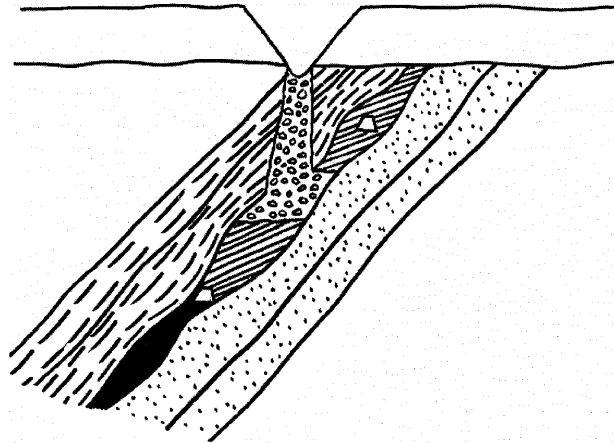


Figure 4 : Effondrement localisé de type fontis au droit de zone de travaux

Lorsqu'il n'y a pas de recouvrement dur au-dessus des couches exploitées, ces phénomènes se localisent généralement dans les zones d'affleurement du minerai.

Ce type de désordres traduit que le matériau des épontes est moins résistant que le minerai extrait.

1.1.4 EFFONDREMENT LOCALISÉ LIÉ AU DÉBOURRAGE D'UN CHANTIER REMBLAYÉ

Ce mécanisme, susceptible d'affecter les couches fortement pentées (filons, couches en dressant), est assez similaire à celui d'un déboufrage de puits. Lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides, la rupture d'un barrage d'arrêt souterrain peut induire un déboufrage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit un effondrement en surface dont la forme et les dimensions dépendent directement des conditions d'exploitation (Figure 5).

L'eau et le temps sont des paramètres importants qui influent sur la stabilité à long terme de ce type d'exploitations pentées et remblayées.

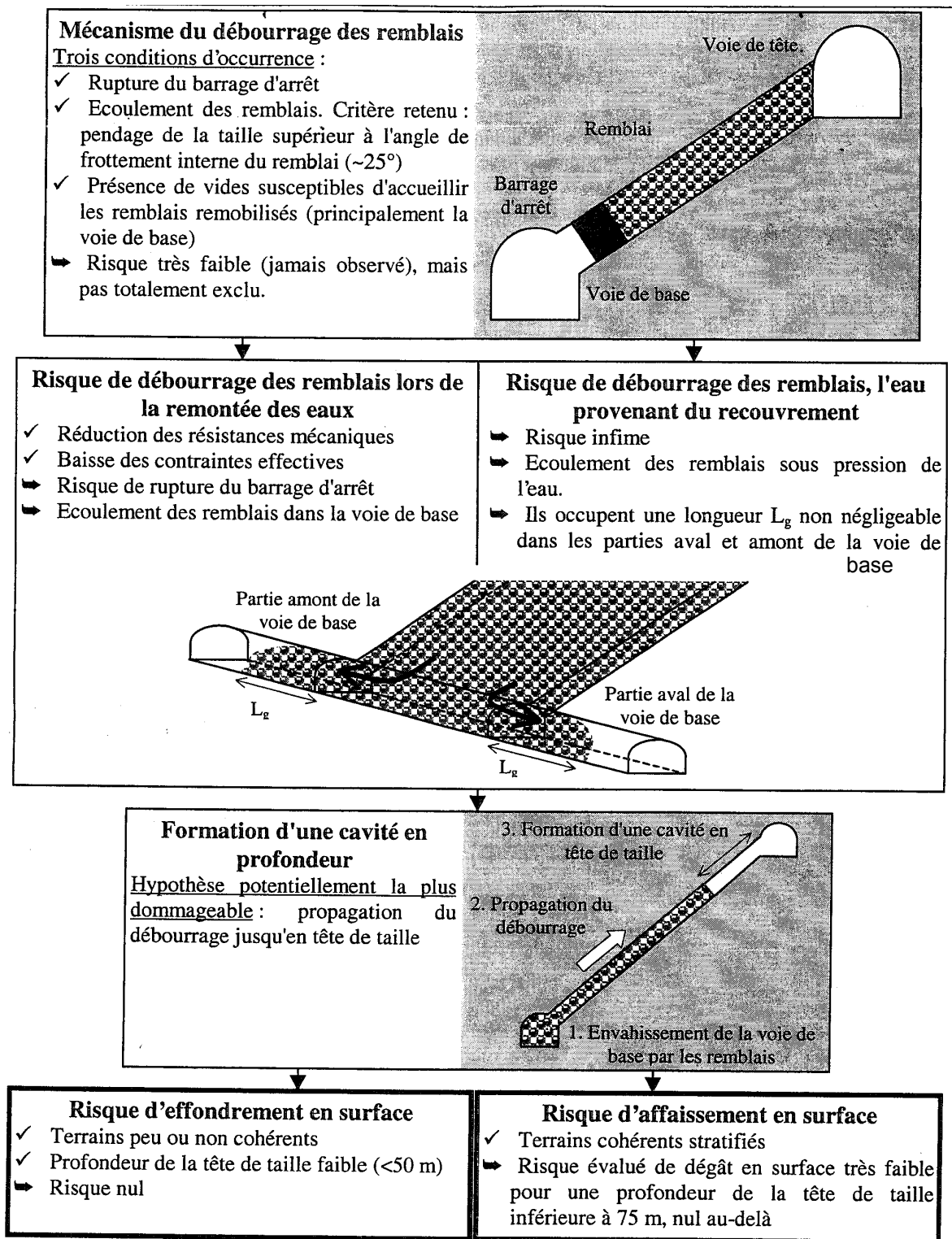


Figure 5 : Effets d'une variation de l'environnement hydraulique sur la stabilité mécanique des tailles pentées remblayées (d'après VINKLER [45])

Labonde (1996 [24]) rapporte que, lors de l'envoyage de la mine d'uranium du Chardon en Vendée, exploitée par tranches montantes remblayées, les sables de remblayage remplissant les cavités les plus proches de la surface se sont liquéfiés et se sont répandus dans les travaux situés en aval pendage. Les vides créés par le débouillage des remblais ont déstabilisé les terrains sus-jacents, provoquant un effondrement jusqu'en surface et la formation d'un effondrement localisé. Cet

accident s'est produit à la suite du débouillage de remblais dans une zone très proche de la surface, l'exploitation ayant débuté à quelques mètres seulement sous la surface. A plus grande profondeur, un tel accident n'entraînerait pas forcément d'effondrement en surface mais certainement un affaissement. Cet exemple exceptionnel a toutefois le mérite de démontrer que le mécanisme de débouillage peut être vraisemblable.

1.1.5 EFFONDREMENT LOCALISÉ PAR RUPTURE OU DÉBOUILLAGE D'OUVRAGE

De nombreux puits ou cheminées d'aération ont été foncés pour les besoins des exploitations. La plupart a été remblayée à la fermeture des mines, mais quelques-uns d'entre eux (cheminées et puits d'aération de petite taille) peuvent subir des phénomènes de débouillage ou de tassement des remblais.

Ce débouillage peut, dans certains cas (assez fréquents lorsqu'il s'agit de très vieux puits), s'accompagner, ou être suivi, d'une rupture du revêtement du puits et d'un effondrement des terrains peu compétents environnants, comme le sont généralement les terrains superficiels. Il se produit alors un cône d'effondrement dont les dimensions dépendent de l'épaisseur et des caractéristiques géologiques et mécaniques locales des terrains (exemples C et D de l'annexe 1).

La manifestation en surface peut ainsi se restreindre à un cratère de petite taille (quelques mètres de diamètre au maximum) ou générer des désordres plus importants (diamètre pouvant dépasser une dizaine de mètres). Des effondrements de diamètre beaucoup plus grands sont tout à fait exceptionnels et correspondent généralement à la présence de sables bouillants proches de la surface.

La rupture de tête de puits ou de descenderie et le phénomène de débouillage de puits ne sont pas caractéristiques des exploitations pentées ou filoniennes (voir guide méthodologique sur l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers en cours de finalisation [20]).

1.2 FACTEURS AGGRAVANTS

Les perturbations provoquées par les exploitations minières sur le régime hydraulique du secteur peuvent accélérer un processus karstique déjà naturellement amorcé. Des effondrements apparus à l'aplomb d'exploitations peuvent résulter ainsi de la superposition de facteurs naturels et de facteurs miniers. Cette conclusion est attestée par les effondrements recensés dans le périmètre minier du gisement de La Mure (38) où le processus karstique est vérifié. L'activité minière peut avoir un effet de catalyseur sur les processus naturels.

Soulignons aussi que l'action de l'eau peut entraîner une réduction des propriétés mécaniques de la roche et en particulier une diminution de la résistance des piliers, du toit, des parements de l'exploitation, ce qui peut favoriser l'apparition d'un effondrement localisé.

Les instabilités en surface peuvent être liées à la remontée des eaux suite à l'arrêt du pompage mais aussi suite à une arrivée d'eau par le recouvrement. Lors de la remontée des eaux, la réduction des propriétés mécaniques des terrains et la hausse des pressions hydrauliques sont toutes deux susceptibles d'entraîner ou

de réactiver des éboulements au fond, des instabilités du mur et/ou des parois des exploitations. On peut toutefois préciser que plus on se rapproche de la surface, plus l'importance relative de la réduction des propriétés mécaniques et des altérations physico-chimiques liées à l'eau l'emporte sur l'impact de la hausse des pressions hydrauliques [45].

Par ailleurs, la réactivation de failles ou de discontinuités majeures sous l'effet de la pression hydraulique constitue un risque sérieux à prendre en compte. Précisons toutefois que la bibliographie ne mentionne de réactivation de faille que durant l'exploitation. Ce fait modère le risque d'occurrence du phénomène. Cependant, ses conséquences potentielles peuvent être importantes. Il est donc souhaitable de surveiller les failles ou discontinuités majeures qui répondent aux critères suivants : grande extension à proximité de la surface et ayant déjà rejoué durant l'exploitation.

Dans les chantiers remblayés ou foudroyés, l'action de l'eau peut également entraîner un tassement des remblais ou des terrains foudroyés lors de leur réhumidification. Lors de la remontée des eaux, une réorganisation des grains de ces matériaux décomprimés est possible (entraînement des éléments fins vers le bas). Cette réorganisation est alors susceptible de créer un tassement en surface (§ 1.3).

1.3 AFFAISSEMENT

1.3.1 DÉFINITION

L'exploitation de gisements pentés et/ou filoniens peut donner naissance à des phénomènes d'affaissement en surface (exemples E, F et G de l'annexe 1). Quand la profondeur d'exploitation est importante, du fait du faible volume des vides résiduels (couches ou filons souvent de faible puissance), la répercussion des désordres en surface se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement et par des amplitudes d'affaissement vertical et de déplacements différentiels horizontaux faibles.

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

1.3.2 MÉCANISMES DE RUPTURE

Dans le cas de chambres montantes remblayées, les vides résiduels et/ou la compressibilité des remblais mis en place peuvent être à l'origine d'une convergence des épontes (Photographie 3). Cette convergence se traduit par la formation d'une voûte de décompression au toit de l'exploitation, avec développement de fissures au sein du massif rocheux. Si les stots séparant des chantiers adjacents viennent à se rompre et que l'exploitation est suffisamment étendue, cette voûte de décompression se propage. Les terrains surincombants cette voûte peuvent alors se déconsolider et générer en surface des affaissements. On notera également le risque d'écoulement de remblais fins (débouillage) et la génération de vides à forte profondeur susceptibles de se refermer et d'induire une cuvette en surface (Figure 5). Le mécanisme est relativement semblable à ceux des méthodes d'exploitation descendantes sous dalles. En cas de rupture progressive des dalles, la convergence du toit peut générer des reports de vides en surface.



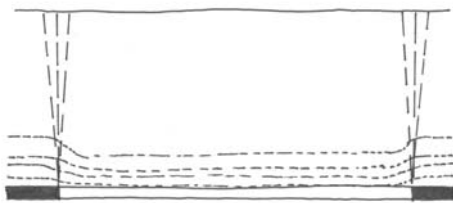
Photographie 3 : Dégradation des épontes dans une exploitation pentée (May-sur-Orne, 14)

Les exploitations menées par « piliers abandonnés » ou par « sous-niveaux abattus », peuvent, comme dans le cas des exploitations partielles menées en terrains stratifiés, générer des ruptures au toit de chambres laissées vides ou des ruptures de piliers (Photographie 1). Lorsque la profondeur d'exploitation est importante et que la largeur du panneau exploité est suffisante par rapport à sa profondeur, la répercussion des désordres en surface se traduit généralement, là encore, par l'apparition d'une cuvette d'affaissement.

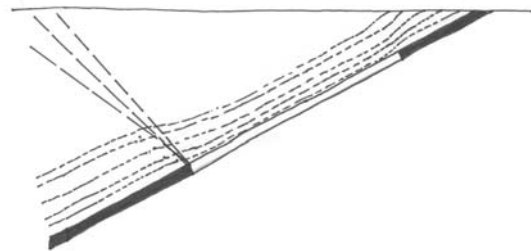
Les désordres peuvent aussi être la conséquence d'une rupture de plusieurs piliers abandonnés au sein de vastes secteurs exploités entre des stots de protection ou des bandes fermes suffisamment larges. En effet, sous l'effet de contraintes verticales (dûes aux poids des terrains de recouvrement) et d'effets de cisaillement (dû au pendage de la couche) les piliers peuvent se rompre. Un réajustement des terrains à l'aplomb de la zone effondrée survient généralement ensuite.

Il apparaît que la valeur du pendage est un paramètre essentiel du mode de rupture des chantiers.

Dans le cas d'un chantier penté (en supposant des bancs raides), les points de rupture, par flexion ou par cisaillement, se distribuent, en s'éloignant du bord inférieur du chantier, selon un angle sensiblement perpendiculaire au pendage des bancs (Figure 6). La zone de cisaillement ou de glissement potentiel, mobilisée en aval, devient beaucoup trop grande pour permettre un effondrement généralisé. Contrairement au gisement en plateure où les panneaux sont généralement sollicités de manière homogène - ce qui permet une libération rapide de l'énergie emmagasinée à la rupture - le mécanisme attendu pour les gisements pentés est un mécanisme de flexion progressif, même si des ruptures locales sont possibles. Lorsque le pendage croît, le caractère instantané de la rupture devient peu probable. En devenant plus progressif, le phénomène d'effondrement fait place à un phénomène d'affaissement.



Coupe d'un chantier en plateure



Coupe d'un chantier en gisement penté

Figure 6 : Lignes de rupture par cisaillement à l'aplomb de l'exploitation

1.3.3 GÉOMÉTRIE DE LA CUVETTE D'AFFAISSEMENT

L'affaissement, dont la manifestation en surface est généralement lente, progressive et souple, prend la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette. Les exemples E et F de l'annexe 1 donnent quelques géométries de cuvette.

Comme pour les exploitations en plateure, à une profondeur donnée, il existe une largeur de cavité, qualifiée de « critique », pour laquelle un point de la surface, et un seul, subit l'affaissement maximal A_m . Au-delà de cette largeur critique, la cuvette présente un fond plat, constitué par tous les points dont l'affaissement vaut A_m et la largeur de la cuvette grandit comme la largeur de la cavité (largeur surcritique). En deçà de la largeur critique, l'affaissement de surface est incomplet (largeur sous-critique) et peut même être inexistant si la cavité est très étroite par rapport à la profondeur.

D'après Proust [31], l'affaissement maximal reste identique à celui d'une veine en plateure.

L'une des incidences du pendage que reconnaissent unanimement tous les auteurs et que démontre toutes les mesures de terrain est le décalage (vers l'aval) du point d'affaissement maximal par rapport à ce que serait sa position dans le cas de couches en plateaux. Selon Aissaoui [1], ce décalage est négligeable jusqu'à 15° de pendage (cas des mines de l'unité d'exploitation de Provence). Ce décalage s'accompagne généralement de modifications sur la cuvette d'affaissement : profil de la cuvette, déformations et pentes. La forme de la cuvette d'affaissement est dissymétrique et 4 angles la caractérisent (Figure 7) :

- L'angle limite (γ) : il est égal à celui constaté dans une exploitation en plateaux au sein du même gisement. Les valeurs de γ que l'on retrouve dans la littérature oscillent entre 30 et 40° dans l'hémisphère nord (Grande-Bretagne, Nord Pas-de-Calais et Ruhr où les recouvrements sont caractérisés par des alternances de schistes-grès et de calcaire-marne, [1]) ;
- L'angle limite amont (γ_r) : variable avec la pente, mais toujours plus faible que l'angle limite ;
- L'angle limite aval (γ_d) : variable avec la pente, mais toujours plus grand que l'angle limite ;
- L'angle de déviation (ϕ) de l'affaissement maximum : il permet de déterminer la position en surface du début de la zone où l'affaissement maximum (A_m) est atteint. Il dépend de la nature des terrains de recouvrement de la profondeur moyenne de la zone exploitée (H) et du pendage des couches (θ)

Précisons que ces angles sont pris sur la verticale et qu'ils relient l'extrémité de la zone exploitée au fond aux points de la surface où les affaissements, déformations ou pentes des terrains sont considérés comme imperceptibles ou nuls. L'angle moyen en gisement plateaux vaut $\gamma = 35^\circ$.

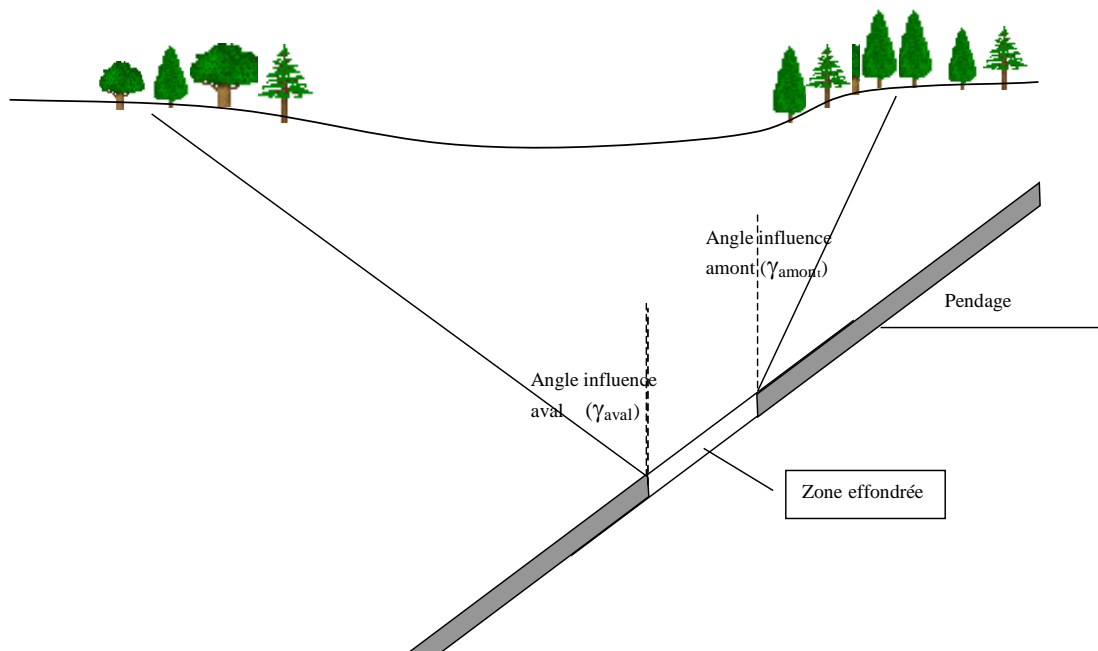


Figure 7 : Représentation schématique de la cuvette d'affaissement et des angles d'influence amont et aval en gisement penté

Quand la profondeur d'exploitation devient importante, l'influence de l'angle aval se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement mais, en contrepartie, par des amplitudes d'affaissement vertical et des déplacements différentiels horizontaux plus faibles. En revanche, coté amont les déplacements augmentent sensiblement.

Concernant la géométrie de la cuvette d'affaissement, une approche récente et un peu différente de celle présentée ci-dessus (PROUST) a été développée par Gonzales Nicieza et al. [4]. Elle est basée sur des retours d'expérience des mines de charbon du nord de l'Espagne.

Elle montre que les gisements pentés à plus de 45° induisent deux types d'affaissement :

- Les affaissements directs dus aux contraintes appliquées sur le toit de l'exploitation ;
- Les affaissements indirects dus aux contraintes appliquées sur le mur de l'exploitation.

Il en résulte deux cuvettes d'affaissement, l'une en amont et l'autre en aval de l'exploitation (Figure 8).

Lors d'une excavation, l'état des contraintes initiales dans le massif est modifié. Dans le cas d'une exploitation pentée comme dans les exploitations en plateaux, les forces qui s'appliquent sur les parois de la cavité sont présentées sur la Figure 8. Dans le cas d'une exploitation pentée, la force de confinement appliquée sur le mur du gisement ne sera plus verticale et provoquera aussi un affaissement dans la partie amont du gisement. L'affaissement indirect est toujours plus faible que l'affaissement direct.

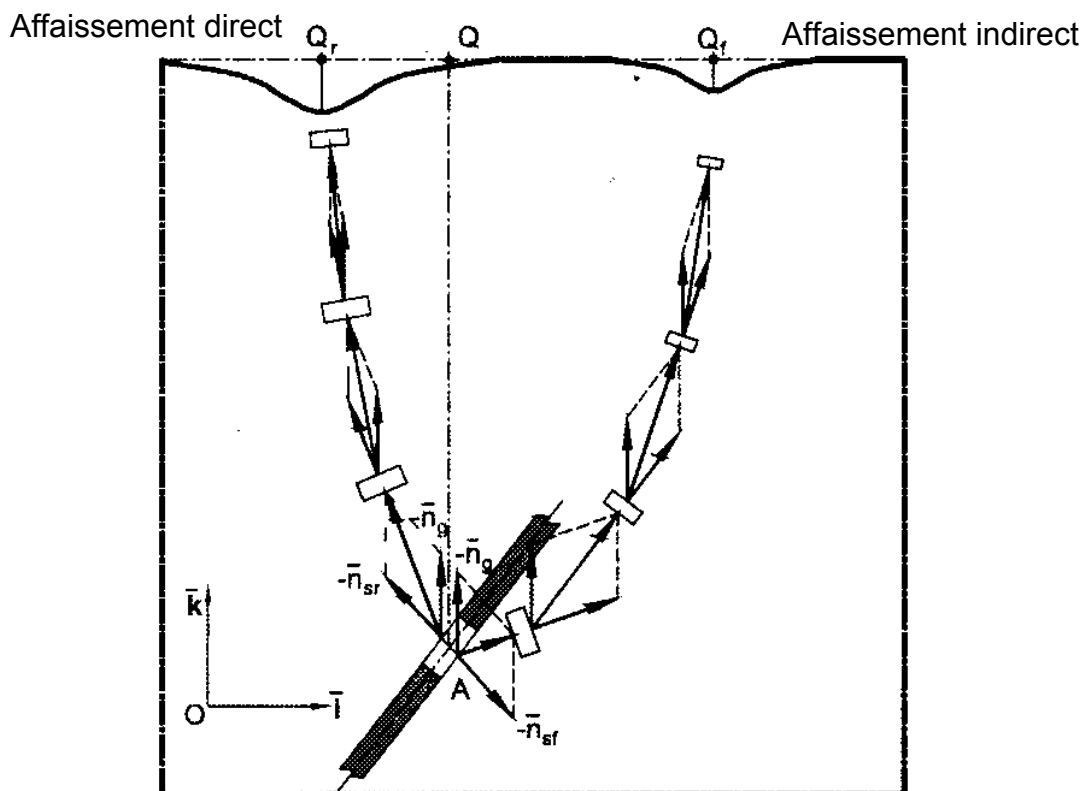


Figure 8 : Forces agissant sur les parois d'une cavité souterraine - Affaissements directs et indirects dans une exploitation pentée [4]

On peut toutefois penser que le mouvement amorcé à partir du mur de la cavité n'atteint pas, à chaque fois, la surface et n'entraîne pas toujours d'affaissement indirect visible en surface.

Cette approche (Figure 8) montre également que le centre (Q_r) de la cuvette d'affaissement direct est toujours située en aval de la projection (Q) du centre (A) du panneau exploité, alors que le centre (Q_f) de la cuvette d'affaissement indirect se situera en amont et à une plus grande distance ($Q_fQ > Q_rQ$).

Il est noté également que la nature et la résistance des matériaux constitutifs des épontes du gisement influent sur la valeur de l'affaissement maximal qu'il soit direct ou indirect.

La présence de bancs, de matériaux lités ou schisteux peut influencer la forme de la cuvette d'affaissement [4].

Rappelons que des phénomènes d'affaissement peuvent être initiés plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux si les structures souterraines sont suffisamment résistantes pour demeurer stables jusqu'à ce terme.

Des fractures ouvertes sont possibles dans la zone en extension, située sur la bordure de l'affaissement. Les crevasses peuvent accompagner le phénomène d'affaissement dans le cas où des terrains plus compétents surmontent les couches exploitées. Ces désordres sont donc liés au contexte géologique.

Il s'agit de fractures ouvertes, souvent verticales, qui se localisent dans les zones extensives des cuvettes d'affaissement, c'est-à-dire à leurs bordures. Elles peuvent être continues sur plusieurs kilomètres et leur ouverture peut être métrique (exemples H, I et J de l'annexe 1).

Leur apparition est souvent différée par rapport à leur création (par exemple, pour les mines de charbon de Lorraine) car les terrains plus compétents où se forment les crevasses peuvent être recouverts par une couche de sol.

Les crevasses ne sont pas forcément spécifiques des gisements pentés et/ou filoniens.

1.3.4 CONSÉQUENCES EN SURFACE

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

Ainsi, les caractéristiques de l'intensité des phénomènes d'affaissement progressif, sont généralement les déformations différentielles horizontales et la pente de la déformée de la surface.

Les principaux facteurs susceptibles d'influencer la valeur de ces deux paramètres sont :

- La géométrie des travaux (largeur exploitée des panneaux) ;
- L'ouverture des chantiers souterrains (tailles) ;
- La méthode d'exploitation et ses caractéristiques (taux de défrusement, etc.) ;
- Le pendage des couches (par exemple, au-delà de 20° ou 30°) ;
- La profondeur des panneaux ;
- La nature et les caractéristiques mécaniques des terrains de recouvrement, la présence de failles, la topographie de surface, etc.

1.4 EFFONDREMENT GÉNÉRALISÉ

1.4.1 NATURE DU PHÉNOMÈNE ET MÉCANISME DE RUPTURE

Les effondrements généralisés sont exclusivement liés aux exploitations partielles, et plus particulièrement aux exploitations par chambres et piliers abandonnés, en général assez proches de la surface. Ils se caractérisent par une rupture franche et brutale des terrains de surface résultant de la ruine de piliers sous-jacents consécutive à une rupture du toit ou à une rupture en chaîne d'un grand nombre de piliers. La zone d'effondrement, étendue à l'aplomb de tout ou partie du panneau, est bordée par des fractures franches avec rejet, ouvertes et sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier ». La surface effondrée correspond sensiblement à la surface éboulée au fond et ne s'évase pas latéralement sous forme d'une zone d'influence, en forme de cuvette plus ou moins souple, comparable à celle d'un affaissement.

1.4.2 CRITÈRES DE PRÉDISPOSITION

1.4.2.1 RÉTROANALYSE

Le premier critère fondamental est fondé sur la *rétroanalyse* des événements passés. Il consiste, indépendamment du contexte d'exploitation, à mettre en évidence l'existence ou non d'anciens mouvements de type effondrement généralisé, à partir d'observations sur site ou de recherches documentaires dans les archives.

Les résultats des recherches documentaires, des observations sur site et les témoignages sont explicites : à l'exception des ardoisières d'Angers (exploitations non minières), on ne recense aucun événement de type effondrement généralisé en gisement pentés ou filoniens. C'est notamment le cas pour les bassins synclinaux de l'Ouest, ayant fait l'objet d'une exploitation de minerai de fer (annexe 3).

Les mouvements de terrains de grande ampleur observés sur ces différents bassins sont : soit des effondrements du stot de protection de la surface dans le cas des chantiers subverticaux ou très pentés, soit des affaissements de la surface consécutifs à des éboulements du fond dans le cas des chantiers faiblement ou moyennement pentés.

On sait que les seuls effondrements généralisés connus dans les bassins synclinaux de l'Ouest sont exclusivement le fait d'exploitations ardoisières dont les

caractéristiques communes (géométries complexes et irrégulières, volumes de vides très importants) les différencient fondamentalement des exploitations ferrifères (Schwartzmann, 1991 ; Tritsch, 2000).

1.4.2.2 PRÉDISPOSITION À LA RUPTURE

L'autre critère de prédisposition d'un effondrement généralisé est directement lié au contexte d'exploitation. Il consiste à analyser la prédisposition mécanique de l'ouvrage à ce mode de rupture et la prédisposition des terrains de recouvrement à se rompre de façon dynamique.

Il semblerait, de toute évidence, que la valeur du pendage soit un paramètre essentiel du mode de rupture des chantiers. Les phénomènes d'effondrements généralisés sont extrêmement rares, voire inconnus, dès lors que le pendage de la couche exploitée dépasse une certaine valeur.

Cas d'une exploitation en plateure

Dans le cas d'un chantier situé dans un gisement stratifié subhorizontal ou très peu penté, constitué de bancs suffisamment raides, les mécanismes du comportement des bancs du toit sont bien connus : les points de rupture par flexion ou par cisaillement se situent sensiblement dans un plan proche de la verticale reliant les bords du chantier à la surface. Le panneau est généralement sollicité de manière homogène, ce qui permet une libération rapide de l'énergie de déformations élastiques emmagasinée à la rupture, entraînant des effets dynamiques. Les zones de cisaillement se développent simultanément au droit des bords du chantier et concernent, en surface, un domaine bien défini (Figure 6). L'effondrement est dit « généralisé ».

Cas d'une exploitation pentée

Dans le cas d'un chantier penté (en supposant toujours l'existence de bancs raides dans le recouvrement), les points de rupture, par flexion ou cisaillement, se distribuent en s'éloignant du bord inférieur du chantier selon un angle sensiblement perpendiculaire au pendage des bancs (Figure 6). La zone de cisaillement ou de glissement potentiel, mobilisée en aval, devient beaucoup trop grande pour permettre un effondrement généralisé. Le mécanisme attendu est alors un mécanisme de flexion progressif, même si des ruptures locales sont possibles. Lorsque le pendage croît, le caractère instantané de la rupture devient peu probable. En devenant plus progressif, le phénomène d'effondrement fait place à un phénomène d'affaissement.

2. EVALUATION DES ALÉAS

2.1 EFFONDREMENT LOCALISÉ

Les effondrements localisés intéressent les travaux miniers peu profonds. Compte tenu du pendage en gisement penté et filonien, l'emprise en surface des travaux est inférieure à celle des travaux en plateure, toutes choses égales par ailleurs.

2.1.1 RUPTURE DE PILIER COURONNE

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

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

La rétroanalyse, souvent effectuée dans le cadre de la phase informative d'un PPRM, permet d'apprécier l'intensité des phénomènes d'effondrement localisé par rupture de pilier couronne. Elle permet également de définir plus précisément les facteurs de prédisposition.

Sur les bassins ferrifères de l'Ouest, par exemple, on note que l'importance des désordres en surface est influencée par le pendage et surtout par la présence d'anciennes fouilles (ou « Minières ») en surface, alignées dans la direction de la couche.

Les secteurs menacés du risque d'effondrement localisé se situent à l'aplomb de chantiers miniers proches de la surface. Ces chantiers (chambres) poussés trop haut vers l'affleurement, à partir du niveau de base supérieur, laissent une hauteur de stot de protection trop faible au-dessus de la couronne, avec des terrains proches de la surface, de qualité mécanique insuffisante, altérés ou remaniés (fouilles par exemple).

Les observations montrent aussi que les désordres sont d'autant plus importants (en dimensions) en surface que le pendage est élevé (différence observée en comparant les flancs nord et sud des couches du synclinal de Segré). On peut aussi raisonnablement penser qu'une plus grande inclinaison de la couche facilite l'écoulement des éboulis dans les chambres et minimise le processus de blocage des éboulis en profondeur par « effet de blocage en silo ». Elle favorise ainsi l'extension du désordre en surface.

Si l'on se base sur les quelques cas d'exploitation analysés, il est rare que ce type de mécanisme de rupture se produise pour des pendages inférieurs à 45°. C'est le cas dans les bassins ferrifères de l'Ouest, où les mines de la Ferrière-aux-Etangs dont le pendage atteint au maximum 45° ne présentent aucun désordre lié à une rupture de pilier couronne alors que les mines de fer de Segré ou Soumont dont le pendage est plus fort présentent majoritairement ce type de rupture. Pour des pendages inférieurs à 45°, le phénomène d'effondrement localisé attendu est essentiellement du type fontis.

En outre, sans informations complémentaires, de manière sécuritaire, on estime qu'au-delà d'une épaisseur d'une cinquantaine de mètres, la prédisposition du stot de protection à se rompre devient généralement négligeable pour des chambres de dimension habituelle.

Méthodes des abaques de Hollmann et Nüremberg [18]

En Allemagne, la détermination des marges de sécurité au droit des anciens travaux peu profonds est réalisée à l'aide des abaques de Hollmann et Nüremberg (1972). Ces abaques (Figure 9) ont été tracés à partir de retours d'expérience d'effondrements localisés dans la région de la Ruhr (couches de charbon pentées sans recouvrement alluvionnaire). La largeur de la zone d'aléa (en amont et aval de l'affleurement) est uniquement fonction du pendage de la couche (exprimé en gon dans le diagramme, 1 gon = 0,9° = $\pi/200$ rad). Il n'y a pas, dans cet abaque, d'influence de la profondeur des exploitations.

Ces abaques définissent, en fonction du pendage de la couche, les valeurs de la marge d'influence d'un désordre en aval de l'exploitation.

Cette marge est lue directement en croisant la valeur de pendage et la courbe limite d'influence du phénomène. Ces abaques permettent de définir une zone d'influence des désordres variant entre 1 et 30 m (distance du désordre à l'affleurement).

En fait, il est possible de lire sur ces abaques l'influence d'un désordre qu'il soit de type effondrement ou de type affaissement. Mais lorsque le pendage de la couche est supérieur à 40°, seul l'aléa effondrement est estimé dans les abaques.

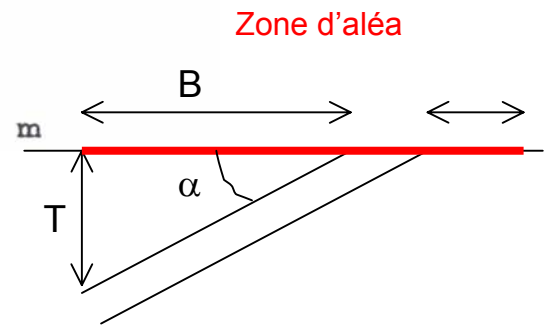
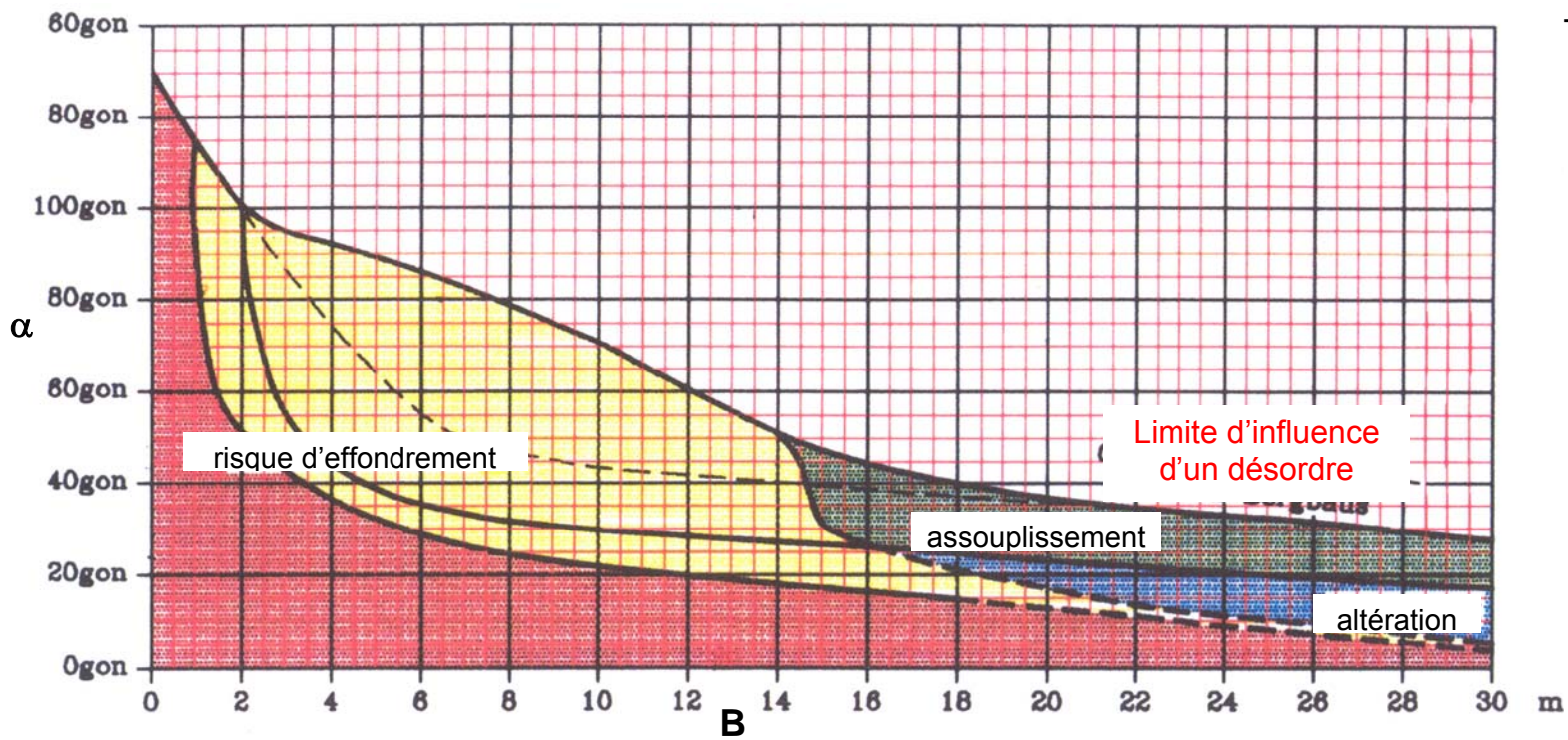
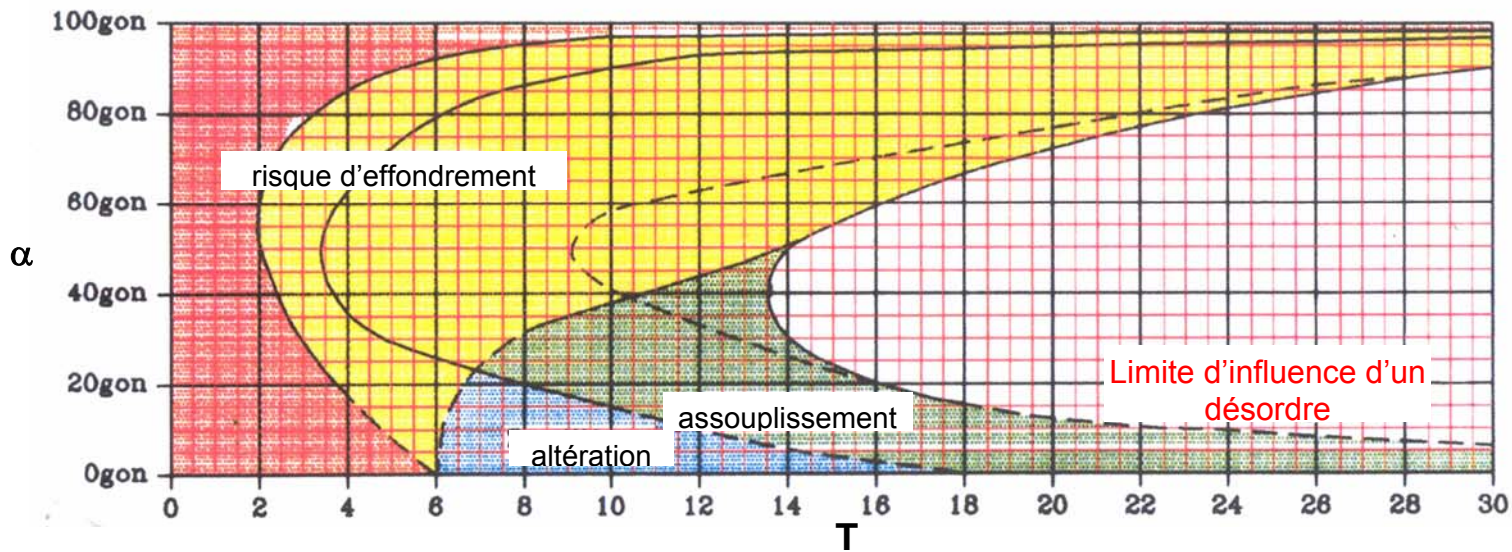


Figure 9 : Abaques pour déterminer les zones d'aléa affaissement au droit d'une exploitation pentée sans recouvrement [18]

$1 \text{ gon} = 0,9^\circ = \text{Pi}/200 \text{ rad}$

Avec un recouvrement alluvionnaire comme c'est le cas dans la région d'Aix-la-Chapelle (Allemagne), les résultats de ces abaques se traduisent actuellement en ajoutant, à la marge définie par les abaques, une marge de sécurité de largeur égale à l'épaisseur des terrains alluvionnaires en surface (angle d'influence de 45°). Cependant, la valeur d'angle de 45° s'avère trop sécuritaire par rapport aux observations sur le terrain. Des chercheurs allemands tentent actuellement d'affiner cette valeur et de mettre au point un modèle et/ou un abaque plus proche des retours d'expérience de la région d'Aix-la-Chapelle.

Selon les chercheurs allemands, les observations de terrain et des sondages montrent que plus les travaux sont pentés plus la probabilité d'avoir un vide résiduel est grande.

Si l'on tente d'appliquer ces abaques aux retours d'expérience français (effondrements localisés), il résulte que :

- Les valeurs de T et de B définis dans ces abaques semblent être applicables uniquement dans le cas d'un mécanisme de rupture de pilier couronne car il n'est pas possible de prédire l'influence de travaux miniers à plus de 30 m de profondeur ;
- Aucun affaissement ne semble possible au-delà de 40° de pendage ;
- La valeur T (épaisseur des terrains de recouvrement) est plus facilement vérifiée que la valeur B (distance du désordre à l'affleurement).

En conclusion, ces abaques doivent être utilisés avec précaution dans le cas des gisements français notamment puisqu'ils se basent sur une géologie et des caractéristiques d'épentes bien spécifiques.

2.1.2 RUPTURE DE TOIT D'UNE CHAMBRE, D'UNE GALERIE ISOLÉE OU D'UN PILIER ISOLÉ

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

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

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

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

- La stabilisation du phénomène par formation d'une voûte stable. Vis-à-vis de ce mécanisme, c'est, à largeur de galerie égale, la présence de bancs massifs, épais et résistants au sein du recouvrement qui contribuera à diminuer la prédisposition d'un site à voir se développer des fontis en surface ;

- La stabilisation du phénomène par auto-comblement, du fait du foisonnement des éboulis. Le volume des vides résiduels disponibles au sein des vieux travaux (tenant compte des dimensions des galeries et de l'existence d'éventuels travaux de remblayage) ainsi que la nature (coefficient de foisonnement) et l'épaisseur des terrains de recouvrement influenceront directement sur la prédisposition des remontées de voûte à se stabiliser ou non par auto-comblement.

La prédisposition de piliers à la rupture dépendra principalement :

- Des contraintes s'exerçant au sein des piliers (tributaires notamment du taux de défruitement local et de la profondeur des travaux) ;
- Des caractéristiques des piliers concernés (résistance du pilier, sensibilité à l'eau, section, élancement, forme, régularité, présence de failles ou d'accidents structuraux, mauvaise superposition...).

Lorsque le pendage des couches diminue sensiblement (typiquement inférieur à 45° comme pour les Mines de la Ferrière-aux-Etangs), le risque d'effondrement localisé potentiel correspond essentiellement au phénomène de fontis (effondrement de toit d'une chambre ou d'une galerie ou d'un pilier) et non plus à celui dû à une rupture de pilier couronne.

Comme pour la rupture de pilier couronne, les désordres observés sont d'autant plus importants en surface que le pendage est élevé : une plus grande inclinaison de la couche facilitant l'écoulement des éboulis et minimisant le processus de blocage des éboulis.

Dans les faits, même si la hauteur de remontée de fontis en surface dépend étroitement de la nature des terrains de recouvrement, le retour d'expérience disponible montre qu'il est possible que des travaux miniers pentés à près de 80 m de profondeur engendrent encore en surface des désordres de type fontis (exemple des désordres à Segré). Au-delà de cette limite la remontée de fontis jusqu'en surface devient généralement peu probable, sauf si des facteurs aggravants (phénomènes karstiques dans des roches carbonatées par exemple) sont prévisibles sur le site.

Dans les gisements pentés et dans des terrains stratifiés de résistance variable, il est possible que le fontis ne remonte pas verticalement jusqu'à la surface. Il peut suivre le pendage des terrains du recouvrement.

Méthode INERIS

Plusieurs méthodes existent pour évaluer l'aléa effondrement localisé : il s'agit de méthodes empiriques, analytiques ou numériques.

L'INERIS a développé un logiciel de calcul par une méthode analytique basée sur le phénomène d'auto-comblement du vide souterrain. Elle est adaptée dans le contexte de terrains de recouvrement peu compétents et incapables de bloquer mécaniquement la propagation d'un fontis en surface. Cette méthode a été appliquée à des mines et carrières souterraines.

Cette méthode est utilisée notamment du fait de sa simplicité et rapidité de mise en œuvre. Le principe de la méthode repose sur l'égalité des volumes : le risque de fontis est nul si le volume foisonné des terrains éboulés est supérieur ou égal à

la somme des volumes du vide initial et de la cloche d'éboulement ainsi créée au toit de ce vide.

L'INERIS a développé un logiciel de calcul pour différentes géométries (galerie isolée, chambres et piliers, 2 niveaux exploités), pour effectuer aisément ce bilan volumétrique. L'annexe 4 présente la méthode de calcul. Les différents paramètres nécessaires au calcul sont (Figure 10) :

- Paramètres géométriques : largeur de la galerie (a), ouverture de la couche (H_g), épaisseur du recouvrement, angle des parements de la galerie (β). Ces paramètres sont déterminés directement à partir du plan de l'exploitation et de la topographie de surface ;
- Paramètres de foisonnement des terrains éboulés : la nature des terrains de recouvrement permet d'estimer le coefficient de foisonnement¹ et l'angle de talus des terrains éboulés et foisonnés (α) ;
- Largeur de la base de la cloche de fontis (r), déterminée d'après l'expérience issue de l'observation des phénomènes sur site.

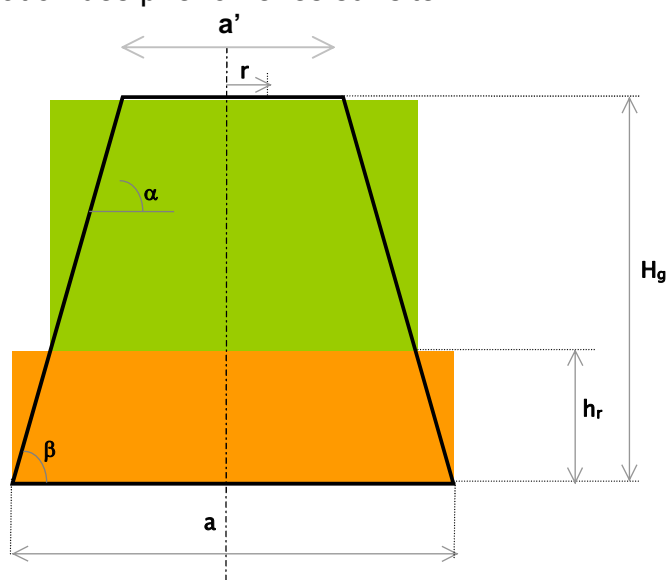


Figure 10 : Paramètres de calcul pour la remontée d'un fontis en surface dans le cas d'une galerie de section trapézoïdale

Pour une zone potentiellement objet d'aléa effondrement localisé, les considérations suivantes sont appliquées :

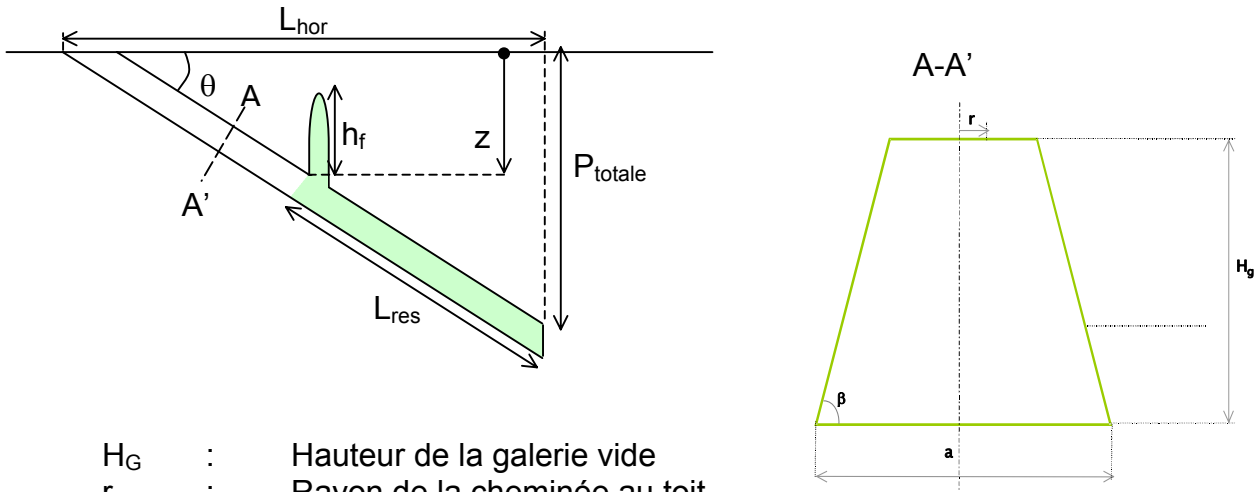
- Lorsque la hauteur calculée de la montée de voûte est supérieure ou égale à l'épaisseur des terrains de recouvrement, la cloche d'éboulement se propage et le fontis débouche en surface ;
- Lorsque le sommet de la cloche atteint les terrains dits superficiels, on estime que ces terrains ne sont pas suffisamment résistants (sans cohésion). Dans ce

¹ Le coefficient de foisonnement est le rapport du volume de matériau éboulé sur le volume du même matériau initialement en place. Les valeurs du coefficient de foisonnement retenues sont issues de la classification R.T.R (Recommandations pour les Terrassements Routiers, SETRA et LCPC. 1976). Il peut valoir 1 pour un sable et atteindre 1,6 pour des roches qui s'éboulent en gros voire très gros blocs désordonnés.

cas, on considère que le fontis peut avoir des effets en surface identiques au cas précédent (un fontis peut déboucher au jour). L'épaisseur de ces terrains peu résistants est obtenue par l'analyse du log géologique des terrains de recouvrement.

Développée initialement sur des gisements en plateaux, le logiciel a été étendu au cas des galeries pentées ($> 30^\circ$). Le volume pouvant contenir le matériau foisonné issu de l'éboulement du toit devient bien plus important, puisqu'il correspond à l'ensemble de la galerie en aval de la zone de fontis (Figure 11).

Par cette approche, la hauteur prévisible de remontée d'un fontis est une fonction de la profondeur de la galerie.



- H_G : Hauteur de la galerie vide
- r : Rayon de la cheminée au toit
- f : Coefficient de foisonnement du matériau
- a : Largeur en pied de galerie
- β : Angle des parements
- θ : Pendage de la galerie
- L_{hor} : Longueur horizontale totale de la galerie
- L_{tot} : Longueur totale de la galerie
- P_{tot} : Profondeur maximale de la galerie

Pour une profondeur de galerie z donnée, la longueur de galerie disponible pour accueillir le matériau foisonné est L_{res} .

h_f : Hauteur prévisible de remontée de la cheminée de fontis

Figure 11 : Principe d'évaluation de la hauteur de remontée de fontis en galerie pentée par la méthode développée par l'INERIS

Approche allemande

L'approche allemande se rapproche beaucoup de celle appliquée par l'INERIS. Il s'agit également d'un calcul volumique qui permet de déterminer la hauteur maximale de remontée d'un fontis. La formule théorique fonction de la forme de la cloche de fontis et de la géométrie des vides a été définie par MEIER [27] ou HEITFELD et al. [17].

Cette évaluation numérique d'une remontée de fontis au droit d'une exploitation par chambres et piliers s'évalue par :

- La géométrie et la profondeur des vides ;
- L'influence du temps et de l'eau ;

- Les propriétés mécaniques et géologiques des terrains sus-jacents et les contraintes appliquées au toit des chambres vides.

Cette méthode de calcul se différencie cependant de la méthode utilisée par l'INERIS par le choix de certains paramètres mécaniques (coefficient de foisonnement et angle de talus des terrains éboulés) comme le montrent les tableaux suivants :

Matériau	Coefficient de foisonnement
Marne ou silt	1,2
Argile	1,2-1,5
Sable	1,2-1,4
Charbon, lignite	1,2
Calcaire	1,6-1,9
Grès	1,6-2,0
Argile schisteuse	1,4-1,5
Schiste	1,7

Matériau	Angle de talus (°)
Calcaire	36
Schiste	35
Granite	35
Silt	36
Sable, Argile	30
Charbon, lignite	25-33
Autres	45

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de foisonnement et de l'angle de talus dans la méthode allemande [27][17]

Matériau	Coefficient de foisonnement
Marne ou silt	1,1-1,4
Argile	1,3-1,6
Sable	1,1-1,35
Roches altérées	1,2-1,3
Calcaire dur	1,4-1,6
Grès dur	1,4-1,6
Schiste	1,3-1,5

Tableau 2 : Extraits de la classification RTR¹ pour le coefficient de foisonnement de certains matériaux

Soulignons que dans l'approche française, le coefficient de foisonnement doit être considéré à long terme. Il inclut :

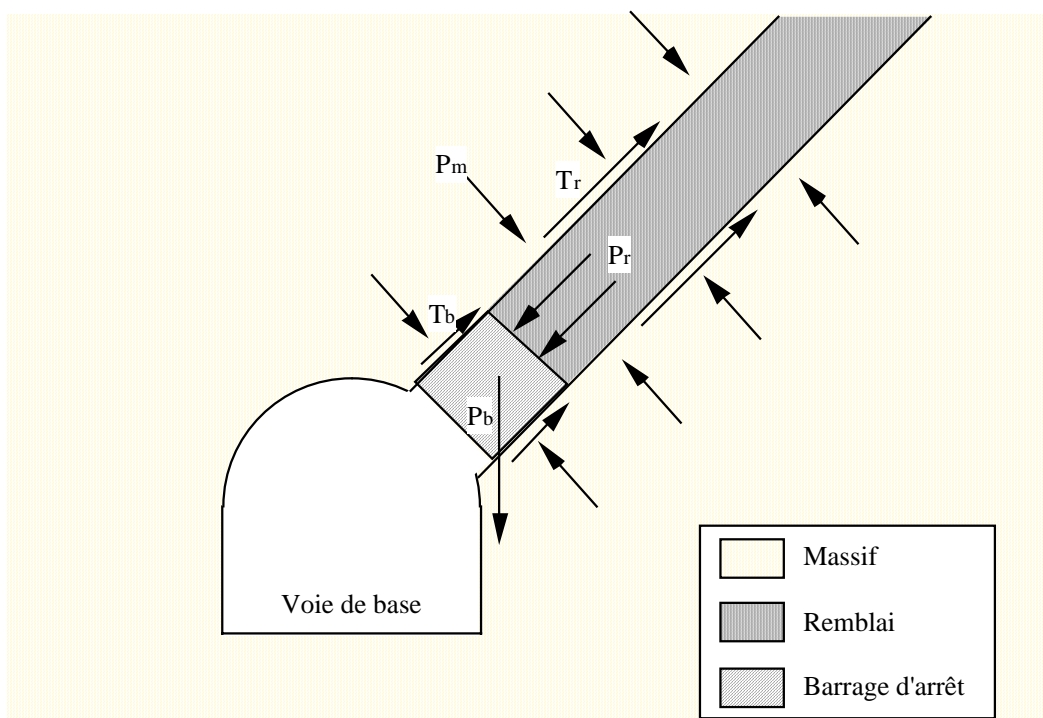
- Un foisonnement lors de l'éboulement ;
- Une recompaction des matériaux éboulés sous le poids des terrains sus-jacents.

2.1.3 EFFONDREMENT LOCALISÉ LIÉ À UN DÉBOURRAGE DE REMBLAI DANS UN CHANTIER PENTÉ

A l'image du déboufrage de la colonne de remblai d'un puits, le déboufrage des remblais de travaux pentés est la traduction d'une remobilisation dynamique des remblais qui descendent et s'engouffrent dans les travaux situés en aval, créant ainsi un vide en amont qui peut engendrer un effondrement ou une reprise d'affaissement en surface.

En l'absence de toute action de l'eau, il est possible de dresser la liste des conditions nécessaires à l'occurrence du déboufrage des remblais :

- Présence de vides en aval communiquant avec les travaux remblayés. Les vides disponibles pour accueillir les remblais des travaux pentés sont réduits uniquement aux voies de base, non effondrées ou non remblayées, et aux autres ouvrages miniers (bures, plans inclinés...) présentant des vides résiduels qui communiquent avec ces ouvrages, à condition évidemment que le déplacement des remblais soit suffisant pour y accéder ;
- Rupture du barrage d'arrêt. Les barrages d'arrêt sont le plus souvent constitués soit de piles de bois serrées et calées au toit et au mur, soit de piliers minces de minerai laissés en place et percés de goulottes refermées après exploitation par des piles de bois. Les forces intervenant dans l'équilibre et les paramètres qui gouvernent le comportement du barrage d'arrêt sont représentées schématiquement Figure 12 ;



P_b : poids du bouchon

T_b : frottement du bouchon contre les épontes de la taille

P_r : composante normale à la face de contact du bouchon du poids des remblais qui s'y appliquent ; une grande partie du poids est en effet repris par le frottement T_r du remblai sur les épontes de la taille

Figure 12 : Forces et paramètres qui gouvernent le comportement du barrage d'arrêt [45]

- Caractéristiques des remblais et de l'interface remblais-éponges insuffisantes pour permettre la tenue des remblais dans la taille (angle de frottement, granulométrie). Le départ des remblais est, a priori, possible si le pendage de la taille est supérieur à l'angle de frottement interne du matériau de remblayage. Pour les bassins houillers français, Thoraval (1998) et Vinkler [45] définissent l'angle minimal de pendage de la taille à 25° pour lequel le critère d'écoulement serait rempli. Il s'agit d'une valeur jugée pessimiste, retenue pour tenir compte du risque maximal. En effet, l'angle de frottement mesuré sur des stériles miniers tout-venant varie de 30° à 45°. Cette valeur est d'autant plus pessimiste que la convergence des éponges assure un effet de frettage (confinement) qui permet aux remblais de rester en équilibre dans des tailles dont l'angle de pente dépasse l'angle de frottement interne des remblais. A ce sujet, des observations réalisées dans les tailles pentées remblayées, dans lesquelles le barrage d'arrêt avait été détérioré, ont montré que le remblai, une fois tassé et confiné entre les éponges par la convergence de celles-ci ne s'écoulait pas et ceci même en présence d'eau et bien que le pendage de la veine soit important.

En première analyse et en dehors de l'action de tout autre facteur, il est clair que la probabilité d'occurrence du débouillage des remblais est faible car les trois conditions citées précédemment doivent être remplies pour qu'un tel processus puisse s'initier.

Concernant le risque de remontée d'effondrement localisé, celui-ci est lié à la nature des terrains de recouvrement, à leur plus ou moins grande aptitude au foisonnement et à la forme initiale des vides au-dessus desquels peut s'initier un effondrement. Dans le cas des exploitations pentées remblayées, la cloche d'éboulement sera d'autant moins haute que les vides consécutifs au débouillage des remblais sont répartis sur une grande longueur.

Mentionnons que parfois plusieurs tailles remblayées sont superposées, la galerie de base de l'une servant de galerie de tête à la précédente. Il serait alors à craindre que des débouillages successifs, au fur et à mesure de la remontée des eaux par exemple, entraînent la formation d'une cavité de grande dimension dans la taille supérieure. Toutefois, la remontée des eaux étant souvent progressive, les cavités formées se seraient éboulées avant que le débouillage n'atteigne la taille supérieure. Ce scénario de débouillage successif dans des tailles superposées est possible mais reste exceptionnel.

2.1.4 EFFONDREMENT LOCALISÉ PAR RUPTURE D'OUVRAGE OU DÉBOUILLAGE

La rupture de tête de puits ou de descenderie et le phénomène de débouillage de puits n'étant pas spécifiques des exploitations pentées ou filoniennes, on se reportera au guide méthodologique sur l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers en cours de finalisation [20].

2.1.5 CARTOGRAPHIE DE L'ALÉA

Les effondrements localisés intéressent les travaux miniers peu profonds. Compte tenu du pendage en gisement penté et filonien, l'emprise des travaux est inférieure à celle des travaux en plateure. De ce fait, la zone d'aléa lié au phénomène d'effondrement localisé devrait être moins étendue que pour les gisements en plateures, toute chose restant égale par ailleurs.

Les gisements filoniens présentent toutefois des particularités [23]. Les irrégularités de la minéralisation et les difficultés à définir la position des filons et de leurs affleurements entraînent un zonage de l'aléa prenant en compte ces incertitudes par l'ajout notamment d'une marge plus ou moins large.

Dans le cas du PPRM de Trémuson par exemple (exemple D de l'annexe 1 [36]), la phase informative avait montré l'existence de nombreux secteurs de travaux anciens, sans plan du fond disponible. La cartographie de l'aléa mouvements de terrains devait prendre en compte ces secteurs plus ou moins bien localisés grâce à des plans du fond, des accidents passés, de relevés de fracturation, des campagnes de géochimie, des photographies aériennes et de leur interprétation. Il a été choisi de distinguer plusieurs familles :

- Famille 1 : les filons qui ont certainement fait l'objet de travaux souterrains parce qu'ils se situent à proximité de puits ou galeries ou parce qu'un effondrement de terrain s'est manifesté à proximité ;
- Famille 2 : les filons qui ont probablement fait l'objet de travaux souterrains parce qu'ils ont été identifiés lors des campagnes de géochimie tactique ou d'analyse structurale mais pour lesquels aucun indice supplémentaire d'existence de travaux n'existe ;
- Le relevé de fracturation au 1/25 000 dont la fiabilité n'est pas suffisante pour identifier et qualifier un aléa « mouvements de terrain ».

Les filons appartenant à la famille 1 ont été affectés d'un niveau d'aléa identique à celui correspondant aux zones pour lesquelles on dispose des plans des travaux du fond (soit, un aléa « effondrement localisé » de niveau moyen).

Les filons appartenant à la famille 2 ont été affectés d'un niveau d'aléa inférieur à celui correspondant aux zones pour lesquelles on dispose des plans des travaux du fond (on suppose l'existence de travaux mais on n'en est pas certain).

Enfin, il n'a pas été retenu d'aléa à proximité des fracturations relevées à partir de l'interprétation photographique. On notera cependant que l'existence de travaux en dehors des zones d'aléa cartographiées, bien que peu probable, ne peut être totalement exclue.

2.2 AFFAISSEMENT

Toutes les informations, les calculs et les modèles présentés dans ce paragraphe résultent de retours d'expérience sur des sites dont le pendage n'excèdent pas 45°. Au-delà de cette valeur, les abaques, tables et tableaux présentés ne donnent bien souvent que des extrapolations. Néanmoins, il est intéressant d'étudier ces données qui peuvent donner des indications intéressantes.

Trois types de méthodes ont été développés pour modéliser les phénomènes d'affaissement :

- Les méthodes empiriques qui sont basées sur des retours d'expérience. L'emploi de ce type de méthode est préconisé dans les cas où il existe déjà beaucoup de données relatives aux affaissements dans le bassin étudié. Leur extrapolation à d'autres bassins, éloignés géographiquement, est très délicate voire inadaptée ;

- Les méthodes physiques qui supposent la construction de modèles à petite échelle, plus ou moins coûteux. Ces modèles permettent de mieux comprendre le mécanisme d'affaissement mais ne permettent pas en général de prédire les déplacements relatifs à celui-ci ;
- Les méthodes numériques qui sont basées sur des approximations numériques d'équations (équations d'équilibre, relations contraintes-déplacements,...). Elles fournissent des valeurs plus ou moins précises de déplacements et de contraintes induites dans les zones étudiées. Ces méthodes sont toutefois imparfaites car elles prennent difficilement en compte le comportement réel des roches à la rupture. En outre, les valeurs des paramètres du modèle de calcul numérique nécessitent souvent d'être calées à partir de mesures et d'observations in situ.

2.2.1 PROFIL DE LA CUVETTE D'AFFAISSEMENT

2.2.1.1 MÉTHODES EMPIRIQUES

Méthode de Proust [31][45]

Le Tableau 3 montre la valeur des angles d'influence amont et aval en fonction du pendage de la taille (l'angle moyen en plateaux vaut 35°). La Figure 13 montre la cuvette d'affaissement pour une largeur critique.

Pendage de la veine	Angle d'influence amont	Angle d'influence aval
0°	35°	35°
10°	33°	37°
15°	31°	38°
20°	30°	39°
25°	30°	40°
30°	30°	43°
40°	30°	45°
45°	29°	46°
50°	28°	47°
60°	27°	48°

Tableau 3 : Angles d'influence aval et amont pour une taille pentée, en fonction du pendage [31]

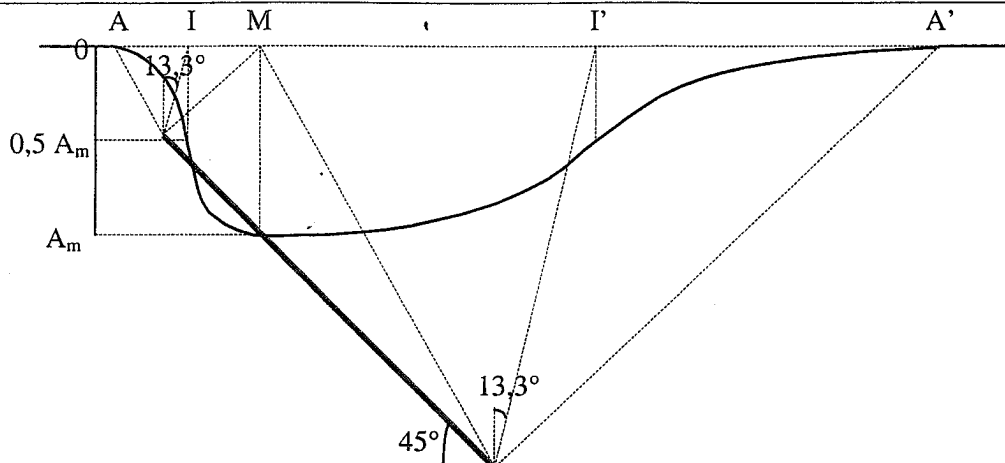


Figure 13 : Cuvette d'affaissement au-dessus d'une taille unique de largeur critique et de pendage 40° [31]

On déduit les cuvettes d'affaissement pour des tailles de largeur sous-critique et surcritique de la même manière qu'en plateure.

Méthodes des abaques NCB [30] ou méthodes des trois angles

Développées par National Coal Board (Royaume Uni), ces méthodes consistent simplement à lire les valeurs des trois angles sur la Figure 14 ci-après.

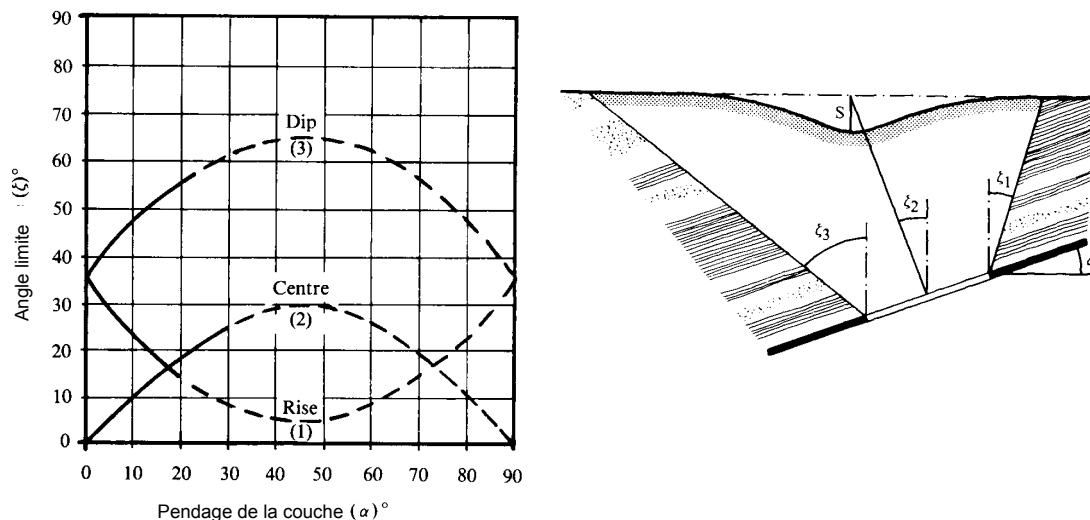
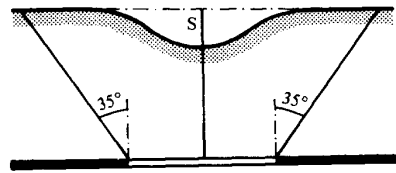
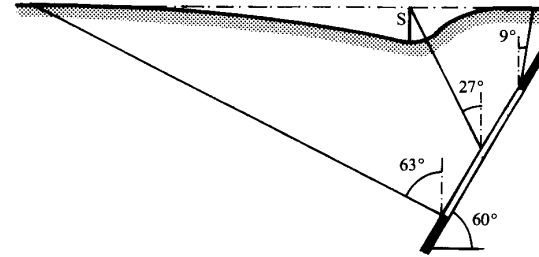


Figure 14 : Angles amont, aval et de déviation de l'affaissement maximal (d'après NCB, 1975 [30])

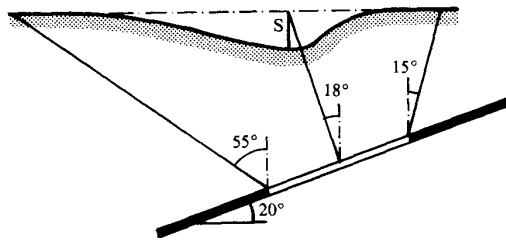
Notons que cette méthode a été établie à partir de mesures réalisées sur le bassin houiller britannique exploité par longue taille et pour des pendages inférieurs à 30°. Le recouvrement y est qualifié de compétent. Le NCB précise d'ailleurs qu'au-delà de cette valeur, les courbes des trois angles ne sont que des extrapolations, en pointillés sur la figure. Ces extrapolations conduiraient aux différents profils observés sur la Figure 15.



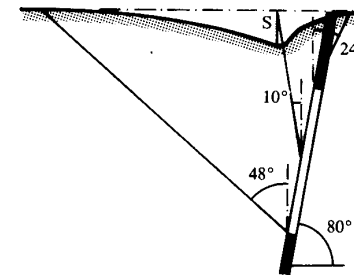
(a) Dip of seam = 0°



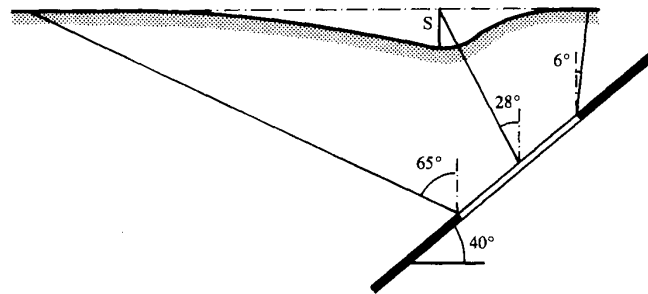
(d) Dip of seam = 60°



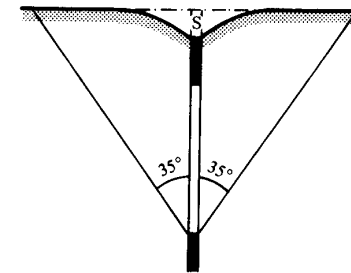
(b) Dip of seam = 20°



(e) Dip of seam = 80°



(c) Dip of seam = 40°



(f) Dip of seam = 90°

Figure 15 : Profils de la cuvette d'affaissement pour des pendages compris entre 0° et 90° (d'après NCB, [30])

D'après [39], cette méthode n'a pas été vérifiée sur des cas réels, en Chine notamment, où les pendages étaient de 43° et 62°.

Des études complémentaires menées par Orchard et Lin [25] ont montré que pendage et angle de déviation (§ 1.3.3) se confondaient dans les houillères britanniques pour des pendages inférieurs à 20° et en 1991 la relation fut vérifiée pour quelques mines dont le pendage était supérieur à 30° [47].

Méthodes des abaques de Sarre ou méthode des angles d'intersection [22]

Elles permettent, entre autres, d'accéder aux valeurs des angles limites amont et aval, par une lecture sur le graphe ci-dessous (Figure 16). A noter que l'angle lu sur ce graphe est le complémentaire des angles amont et aval décrits plus hauts.

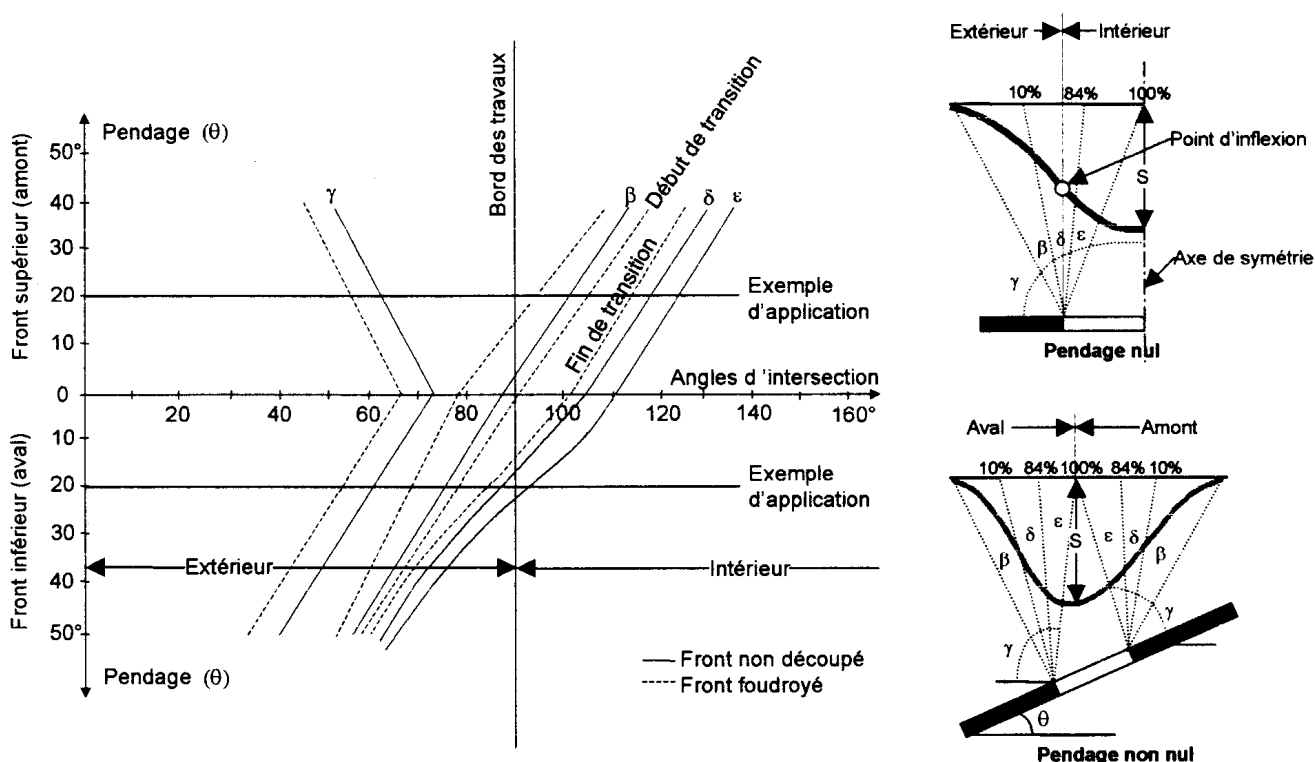


Figure 16 : Angles caractérisant le profil d'affaissement à partir de la méthode de Sarre [22]

Cet abaque est basé sur la théorie de PROUST et a été utilisé pour les exploitations pentées des Houillères du Bassin de Lorraine (annexe 5).

Exemple de lecture pour une exploitation pentée à 60° : les valeurs lues sur le graphe sont de 32° pour le front aval supposé foudroyé et de 45° pour le front amont supposé non découpé ; ce qui conduit à un angle limite aval de 58° et un angle limite amont de 45°.

Dans le cas particulier des affaissements survenus à Soumont (14) en 1966 (zone exploitée par chambres montantes, située entre 250 et 300 mètres de profondeur avec un pendage moyen de 32°), les experts avaient défini un angle amont de 0° à 10° et aval de 30° à 40° (Tableau 4). Notons, tout de même, qu'une confusion a pu être commise et que ces valeurs correspondraient à des valeurs d'angle limite de fracturation (correspondant à la position des dernières fractures observables en

surface) ; les valeurs réelles d'angles d'influence seraient donc supérieures aux valeurs ci-avant.

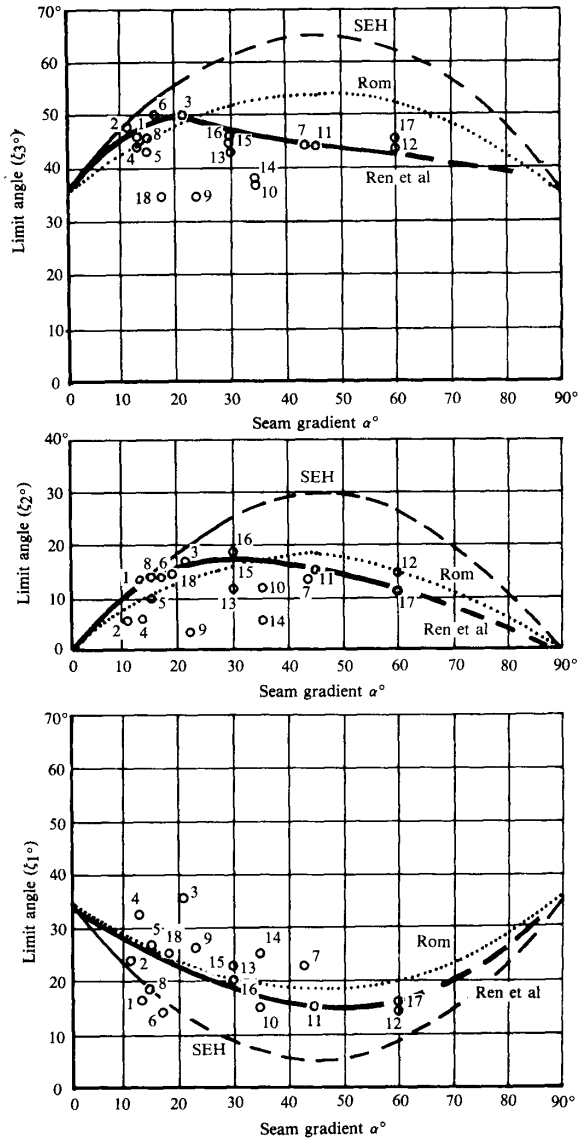
Dates de l'éboulement	Profondeur moyenne du panneau	Angle de fracture amont	Angle de fracture aval
1961	170 m	5°	20°
1965	185 m	10°	20°
1966	150 m	5°	40°

Tableau 4 : Angles de fracturation retenus pour les d'affaissements en surface à la mine de Soumont (14), en 1961, 1965 et 1966, Vouille et Tincelin

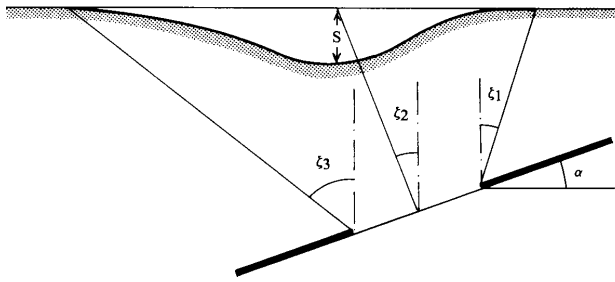
Autres abaques

Deux autres graphes, basés sur la lecture des trois angles, existent dans la littérature :

- Un retour d'expérience sur les affaissements dans les mines pentées de charbon d'Allemagne de l'ouest menée par H. Rom en 1964 [35] ;
- Un retour d'expérience sur des mines pentées mondiales (Grande-Bretagne, Chine, Japon, Tchécoslovaquie, Autriche entres autres) mené par Ren, Reddish and Whittaker en 1988 [33] ;
- Les trois graphes sont donnés sur la Figure 17. Les « courbes de Ren » sont calées sur des cas concrets pour des pendages allant jusqu'à 60°, les pendages limites dans le cas des courbes Rom n'ont pas été retrouvés.



Subsidence data:



No	Source
1	Western Coalfield, UK: British Coal
2	Western Coalfield, UK: British Coal
3	Western Coalfield, UK: British Coal
4	Western Coalfield, UK: British Coal
5	Western Coalfield, UK: British Coal
6	Western Coalfield, UK: British Coal
7	Northern Coalfield, China: Peking Coal Mining Research Institute
8	Western Coalfield, UK: British Coal
9	Japanese Coalfield: Hiramatsu et al (1979)
10	Mid-West Coalfield, China: CIMT (1982)
11	Mid-West Coalfield, China: CIMT (1982)
12	Mid-West Coalfield, China: CIMT (1982)
13	Central Coalfield, China: CIMT (1982)
14	Northern Coalfield, China: CIMT (1982)
15	Ostrava-Karvina Coalfield, Czechoslovakia: Zilavy (1968)
16	West European Coalfields: Stojanovic & Pataric (1979)
17	West European Coalfields: Stojanovic & Pataric (1979)
18	Austrian Tertiary Coal Basin: Perz (1957)

Figure 17 : Valeurs des angles amont et aval de la cuvette d'affaissement en fonction du pendage selon Ren, Rom et SEH [33]

Logiciel SUBSID

Le logiciel de calcul d'affaissement SUBSID, développé par l'INERIS (Aissaoui, 1999), permet de prévoir l'amplitude de l'affaissement pendant l'exploitation, selon deux méthodes empiriques :

- La méthode de NCB (National Coal Board) ;
- La méthode de Proust.

Basé sur des retours d'expérience, ce logiciel utilise les courbes d'affaissement mesurées sur le terrain pour plusieurs rapports largeur/profondeur, afin de prévoir les affaissements futurs. Testé dans le bassin houiller français Centre Méditerranée, il a montré une bonne adéquation avec les observations.

Dans SUBSID, le pendage n'influe pas sur l'amplitude des affaissements mais uniquement sur l'emplacement de la cuvette. En effet, d'après PROUST [31], le pendage n'influe pas sur la valeur de l'affaissement maximal mais en revanche, la valeur calculée par la suite, de la déformation horizontale maximale, est surestimée de 5 à 25% selon la valeur du pendage.

C'est la méthode de PROUST [31] qui a été utilisée pour le calcul de l'affaissement au centre de chaque panneau ou d'une zone exploitée. La relation utilisée est la suivante :

$$A = f_1 \times f_2 \times i \times O$$

Avec :

A : l'affaissement au centre du panneau, ou d'une zone ;

f_1 : facteur d'affaissement lié à la méthode d'exploitation et au traitement de l'arrière-taille (vide). La valeur de f_1 est égale à 0,3 pour l'exploitation avec remblai hydraulique ; il est égal à 0,4 pour le remblai pneumatique, 0,8 pour le remblai manuel et 0,9 pour une exploitation avec foudroyage ;

f_2 : facteur de profondeur, dont la valeur diminue avec la profondeur, entre 1 pour une profondeur de 400 m et 0,6 pour des profondeurs supérieures à 800m ;

i : facteur de réduction en fonction des dimensions du panneau par rapport aux dimensions critiques. Pour une surface exploitée critique ou sur-critique, il est égal à 1. On dispose d'abaques et de tableaux à double entrée pour déterminer sa valeur ;

O : ouverture de la veine ou de la couche exploitée en mètres.

Le calcul de l'affaissement en tout point de la surface est réalisé à l'aide des abaques du NCB. Ces abaques fournissent le pourcentage de l'affaissement du point concerné à partir de la distance entre le point et le centre du panneau. Pour un point de la surface, l'affaissement calculé est la somme des affaissements induits par l'exploitation de chaque panneau (ou bloc).

$$A = \sum_{i=1}^n A_i$$

A_i : l'affaissement induit par le panneau (ou le bloc) i ;

n : le nombre de blocs ou de panneaux de la concession concernée.

Les points de calcul d'affaissement peuvent être soit des bases de nivellement connues par leurs coordonnées soit des points de grille de calcul donnés par l'utilisateur avec un pas régulier dans les deux directions. Les résultats sont fournis sous forme de carte d'iso-affaissement, à l'aide du logiciel Surfer.

Le pendage est encore insuffisamment pris en compte dans le logiciel SUBSID. En effet, n'étant prévu, au départ, que pour le cas particulier des Houillères du Bassin du Centre et du Midi, où les pendages sont faibles (au maximum 16°), les seules conséquences du pendage retenues sont une translation de la cuvette d'affaissement calculée sur une taille de pendage nul. On ne retient pas en particulier de déformation du profil d'affaissement en fonction du pendage de la taille, alors que ce facteur est significatif.

2.2.1.2 MÉTHODES NUMÉRIQUES

Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, les méthodes numériques sont de plus en plus utilisées. Elles permettent notamment de prévoir les profils de cuvette d'affaissement à partir de lois de comportement telles que l'élasticité, la plasticité et la viscoplasticité ou en considérant un massif discontinu.

Parmi l'ensemble des calculs numériques que nous connaissons actuellement, peu ont pris en compte le pendage des exploitations, signalons en, tout de même, quatre :

- Yao et al

Ces travaux ont été menés en 1993 [47].

- Rodriguez et Torano :

Une méthode de prédiction d'affaissement a été mise au point par Rodriguez et Torano sur des mines du nord de l'Espagne [40]. Elle considère que, pour un pendage supérieur à 50° , l'affaissement est induit par deux types de mouvements : l'un perpendiculaire à la stratification dû au flambage et à la rupture de la couche, l'autre parallèle à la stratification dû au cisaillement et au glissement.

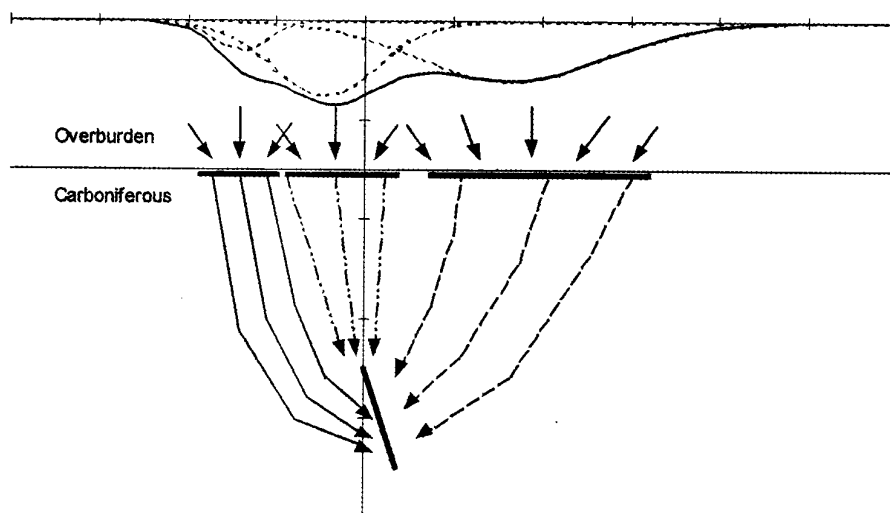


Figure 18 : Mouvements des terrains lors d'un affaissement pour une exploitation pentées [40]

Ces mouvements de terrain sont transmis à la surface et créent des affaissements liés à :

- La rupture et le flambage des bancs du toit de la couche ;
- La rupture et le flambage des bancs du mur de la couche ;
- Le glissement des bancs du toit et du mur de la couche.

La fonction représentant le profil d'une cuvette d'affaissement en un point x est donc la somme de fonctions exponentielles :

$$z(x) = D_1 \times e^{-(x-x_{01}/B_1)^2} + D_2 \times e^{-(x-x_{02}/B_2)^2} + D_3 \times e^{-(x-x_{03}/B_3)^2}$$

où : x_{01}, x_{02}, x_{03} : positions des points où le profil de la cuvette présente un maximum ;

D_1, D_2 et D_3 : valeurs maximales de la fonction ;

$2B_1, 2B_2, 2B_3$: demi-largeur de chaque profil d'affaissement.

Ces paramètres sont calculés à partir des relations données dans le tableau ci-dessous :

x_0	x_L	B	D
1 $x_{01} = \frac{H}{2tg\alpha} - \frac{2H_B + H}{2tg\theta_{01}}$	$x_{L1} = -\left(\frac{H_B - h_M + H}{tg\beta_{01}} + \frac{h_M}{tg\beta_{0M}}\right)$	$B_1 = -\frac{x_{L1} - x_{01}}{2}$	$D_1 = -2300 \times \frac{(H - 0.5) \times (m + 0.5)}{(h_M + 15) \times (H_B - 10)} \times (\alpha - 50)$
2 $x_{02} = \frac{H}{2tg\alpha} + \frac{2H_B + H}{2tg\theta_0}$	$x_{L2} = \frac{H_B - h_M + H}{tg\beta_0} + \frac{h_M}{tg\beta_{0M}}$	$B_2 = \frac{x_{L2} - x_{02}}{2}$	$D_2 = -33,000 \times \frac{(H - 0.5) \times (m + 0.5)}{(h_M + 30) \times (H_B - 10)} \times \frac{100}{(\alpha - 5)}$
3 $x_{03} = \frac{H}{2tg\alpha} - \frac{2H_B + H}{2tg\theta_0} = -x_{02} + \frac{H}{tg\alpha}$	$x_{L3} = x_{L1}$	$B_3 = -\frac{x_{L3} - x_{03}}{2}$	$D_3 = -1100 \times \frac{(H - 0.5) \times (m + 0.5)}{(h_M + 30) \times (H_B - 10)} \times (\alpha - 50)$

Tableau 5 : Relations mathématiques entre les paramètres de l'exploitation et les paramètres de la méthode de calcul [40]

Avec : H_B = profondeur des travaux ;
 h_M = épaisseur du recouvrement ;
 H = relevé du panneau ;
 α = pendage de la couche ;
 m = épaisseur de la couche ;
 β et τ : angles définis sur la Figure 19.

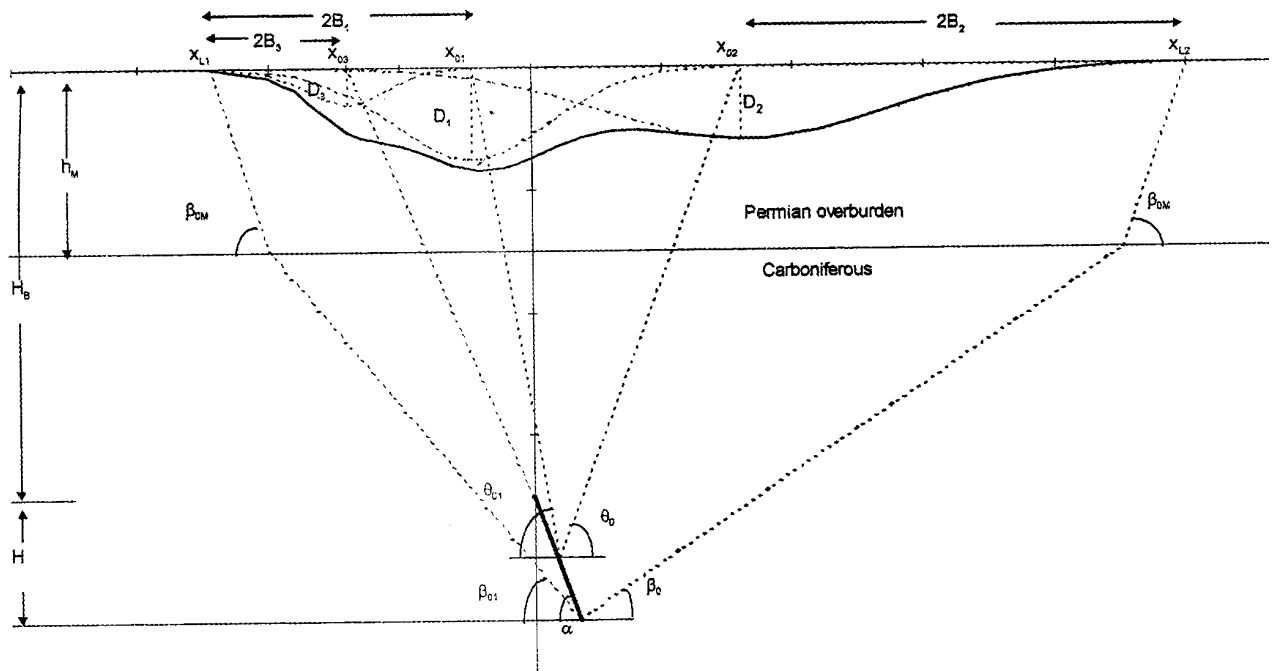


Figure 19 : Profil de la cuvette d'affaissement pour des exploitations très pentées [40]

Ces derniers paramètres ont été renseignés à partir de retour d'expérience dans des mines de charbon du nord-ouest de l'Espagne (Tableau 6) :

Values for angles obtained from experience

α (deg.)	70	80	90
θ_{01} (deg.)	82	84	90
θ_0 (deg.)	70	72	75
β_0 (deg.)	35	37	48
β_{01} (deg.)	65	60	48
β_{0M} (deg.)	70	70	70

Tableau 6 : Valeurs d'angle obtenues par retours d'expérience [40]

Une méthode numérique à partir du logiciel FLAC (méthode des différences finies) a été utilisée par Alejano et al [2]. Cette méthode a été développée à partir de retours d'expérience sur des mines en plateaux (mines de charbon des Midlands en Angleterre). Puis, elle a été étendue à des semi-dressants ; les résultats semblent cohérents avec ceux trouvés par les modèles physiques et empiriques. L'extrapolation vers des exploitations en dressants n'a, elle, pas pu être validée faute de retours d'expérience sur ce type de mines pentées.

- Aissaoui

La modélisation numérique en 2D, développée dans la thèse de doctorat d'Aissaoui sur les mines de charbon de l'unité d'exploitation de Provence en 1999 [1], a montré que l'angle de déviation de l'affaissement maximal était égal à la moitié de la valeur de l'angle du pendage (pour des valeurs de ce dernier inférieures à 15° à l'unité d'exploitation de Provence).

Ensuite, il a été choisi de déplacer tous les points (p_i) de la cuvette d'affaissement, obtenue par modélisation numérique, correspondant au cas d'exploitation plateure d'une distance égale à :

$$d_i = h_i \times \tan(\phi),$$

où h_i est la profondeur exacte du point p_i et ϕ l'angle de déviation de l'affaissement maximal.

Notons que l'on peut exprimer $h_i = h + x_i \times \tan(\theta)$ (x_i distance de p_i au centre de la cuvette et θ pendage, Figure 20).

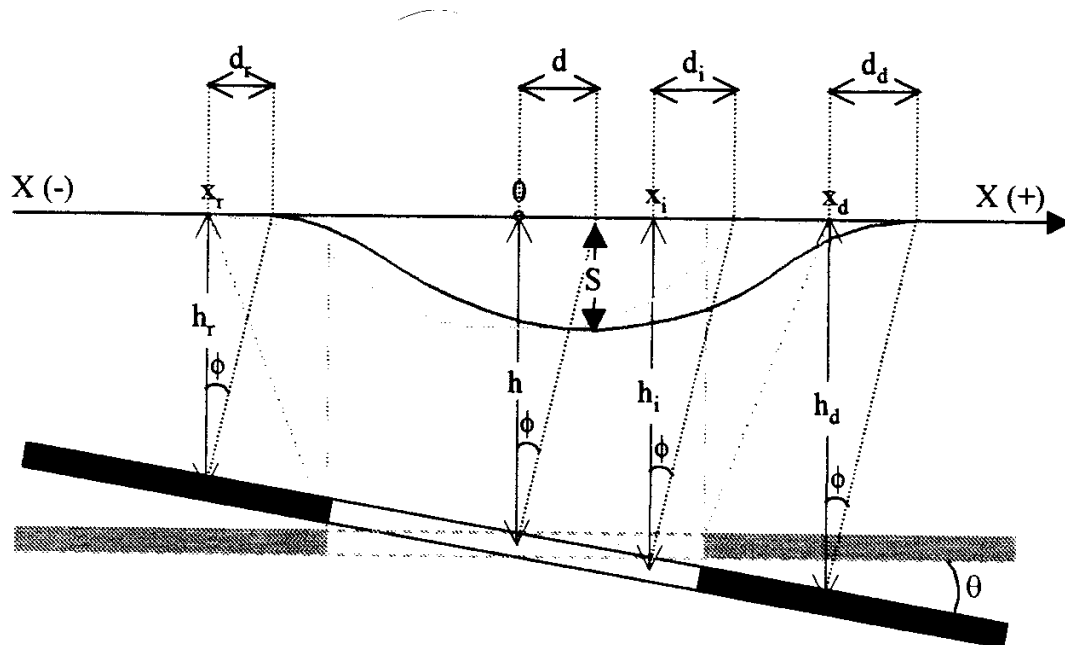


Figure 20 : Principe de prise en compte du pendage des couches [1]

La comparaison des résultats obtenus aux cas concrets des mines britanniques a révélé que les cuvettes données par l'approche de Aissaoui sont dans l'ensemble cohérentes lorsque les pendages sont inférieurs à 10° .

- Modélisations sur les mines de fer de l'Ouest de la France

Le phénomène d'affaissement a été analysé plus particulièrement dans les bassins ferrifères de l'Ouest par V. Renaud en 2003 [34]. De nombreux retours d'expérience sont référencés. L'analyse effectuée à l'aide de la modélisation numérique visait à évaluer les facteurs de prédisposition favorables à un affaissement (Renaud, 2004).

Les désordres dans les bassins ferrifères de l'Ouest sont la conséquence d'une rupture de plusieurs piliers abandonnés au sein de vastes secteurs exploités entre des stots de protection ou des bandes fermes suffisamment large.

Pour évaluer la stabilité à long terme des terrains sous-minés, il convient de tenir compte principalement :

- Des dimensions des panneaux ;
- Du pendage des couches ;
- Du taux d'exploitation (ou taux de « défrètement ») ;

- De l'ouverture (hauteur exploitée entre épontes) ;
- Des propriétés de résistance des ouvrages miniers laissés en place.

Une étude de stabilité des gisements ferrifères pentés de l'Ouest, menée par modélisation numérique montre que le déclenchement du processus d'affaissement s'opère par rupture en cisaillement des bancs jusqu'à la surface dans certaines conditions particulières (Renaud, 2004).

De ces modélisations portant sur des chantiers compris entre 30° et 90°, on retiendra, en particulier, que le phénomène d'affaissement n'est obtenu que pour des valeurs de pendage relativement faibles (30° à 50°) et qu'il devient négligeable pour des pendages supérieurs à 50°/55°, pour laisser place à des ruptures localisées dans la zone amont du chantier.

Les configurations d'exploitation qui permettent le déclenchement (ou non) du processus de rupture sont la combinaison des trois facteurs suivants :

- Le pendage des couches ;
- Le taux d'exploitation (ou taux de « défruitement ») ;
- L'ouverture (hauteur exploitée entre épontes).

L'influence de l'augmentation du pendage se manifeste par un déplacement des zones de rupture plus près de la surface (ou de l'affleurement) : plus on est penté, plus on affecte les terrains proches de la surface (points de ruptures ou points plastiques).

En plus de ces configurations d'exploitation, d'autres conditions doivent être prises en compte pour éventuellement minimiser l'aléa. Il a été défini, par exemple, pour les gisements ferrifères de l'ouest :

- Condition n° 1 : pour que l'affaissement se produise en totalité il faut que les dimensions des chantiers (largeur L) atteignent ou dépassent la profondeur (H) (soit : $L \geq H$). En dessous ($L < H$), les affaissements sont d'autant plus limités et l'aléa plus faible ;
- Condition n° 2 : on considère qu'il n'y a pas de répercussions en surface (affaissements non perceptibles) si le chantier présente une largeur $L < 0,4 H$;
- Condition n° 3 : si la profondeur limite des travaux est inférieure à 250 - 300 m (en fonction de la géométrie des chantiers), on considère que les zones en rupture ont peu de chances d'atteindre la surface.

Ces résultats sont valables pour les gisements ferrifères de l'Ouest, ils ne sont pas généralisables pour l'instant.

2.2.2 AFFAISSEMENT MAXIMAL ET DÉFORMATIONS

Signalons qu'en gisement penté, l'amplitude de l'affaissement maximal dépend, plus que tout autre facteur, de l'environnement géologique de la couche en exploitation. Pour un gisement en dressant par exemple, avec une veine de faible épaisseur, on peut constater des affaissements négligeables pour peu que l'exploitation soit remblayée partiellement et que des planches soient laissées entre les différents niveaux d'exploitation. Ainsi, aux Houillères du Bassin de Lorraine, en raison de la discordance stratigraphique du Permo-Trias au-dessus du faisceau plissé des flambants, et du remblayage des couches, l'affaissement maximal est calculé avec une règle très globale. Dans le cas de Merlebach par exemple, l'exploitation totale d'une relevée (§ 6) de 100 m correspond à un affaissement maximal de 0,7 m.

2.2.2.1 MÉTHODES EMPIRIQUES

Méthode de Proust [31] [3]

Grâce aux résultats de campagne de mesures analysées par Proust (1964), une proportionnalité a été établie entre les déplacements horizontaux et la pente du profil d'affaissement.

L'affaissement maximal est calculé comme pour les gisements en plateure par la formule :

$$A_m = O \times f_1 \times f_2$$

où O : ouverture de la veine (ouverture totale) ;

f_1 : facteur d'affaissement de l'ordre de 0,25 à 0,35 pour le remblayage hydraulique et 0,85 à 0,90 pour le foudroyage ;

f_2 : facteur de profondeur.

La courbe de déformation horizontale en gisement penté (ε) se déduit de la courbe de déformation horizontale en plateure par l'application d'un facteur correcteur k^2 qui dépend du pendage de la taille (Tableau 7) :

$$\varepsilon_{\max \text{ dressant}} = k^2 \times \varepsilon_{\max \text{ plateure}} = k^2 \times 0,75 \times \frac{A_m}{P_t}$$

où P_t (m) est la profondeur du point haut de la taille.

Pendage de la veine	Facteur correcteur k^2
0°	1
10°	1
15°	1
20°	1
25°	0,99
30°	0,86
40°	0,79
45°	0,77
50°	0,76
60°	0,74

Tableau 7 : Facteur d'influence k^2 pour une taille pentée, en fonction du pendage [31]

La Figure 21 montre la courbe de déformation, pour une largeur critique.

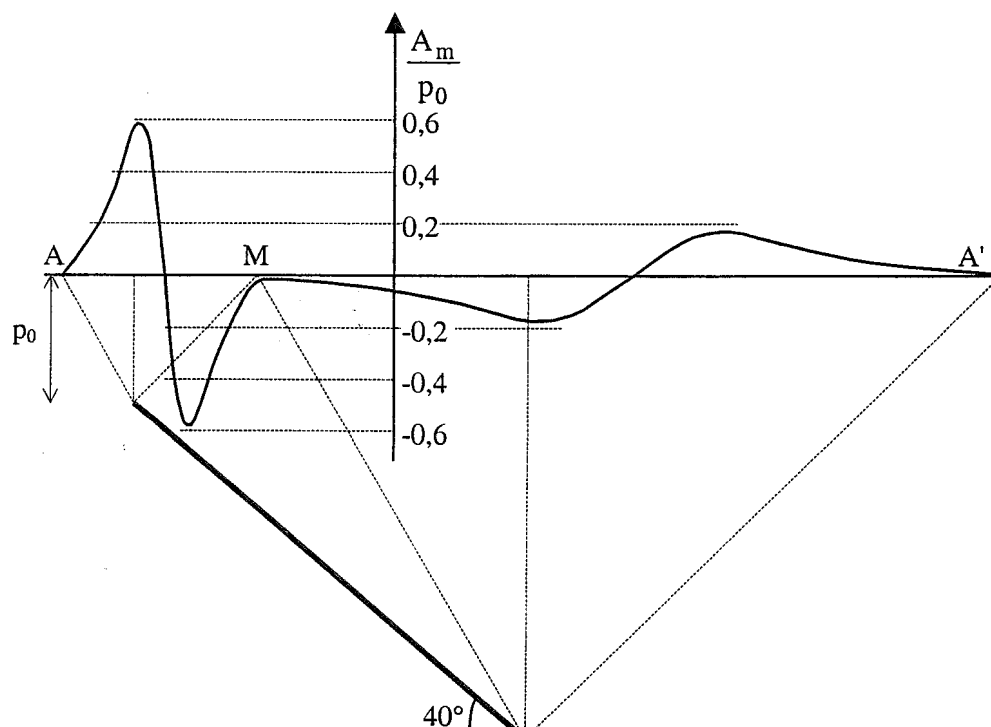


Figure 21 : Courbe de déformation horizontale théorique au-dessus d'une taille unique de largeur critique et pentée à 45° [31]

On déduit les courbes de déformations pour des tailles de largeur sous-critique ou surcritique de la même manière qu'en plateure.

Méthodes des abaques NCB [30]

Elle consiste simplement à lire les valeurs de l'affaissement maximal A_m (ou S) en fonction des caractéristiques de l'exploitation (profondeur moyenne (h), largeur de l'exploitation (w) et épaisseur de la couche (M)) sur les figures ci-dessous.

Rappelons que ces valeurs concernent des exploitations dont le pendage est au maximum de 30° et pour lesquelles le NCB ne signale aucune modification de valeur d'affaissement maximal en fonction du pendage.

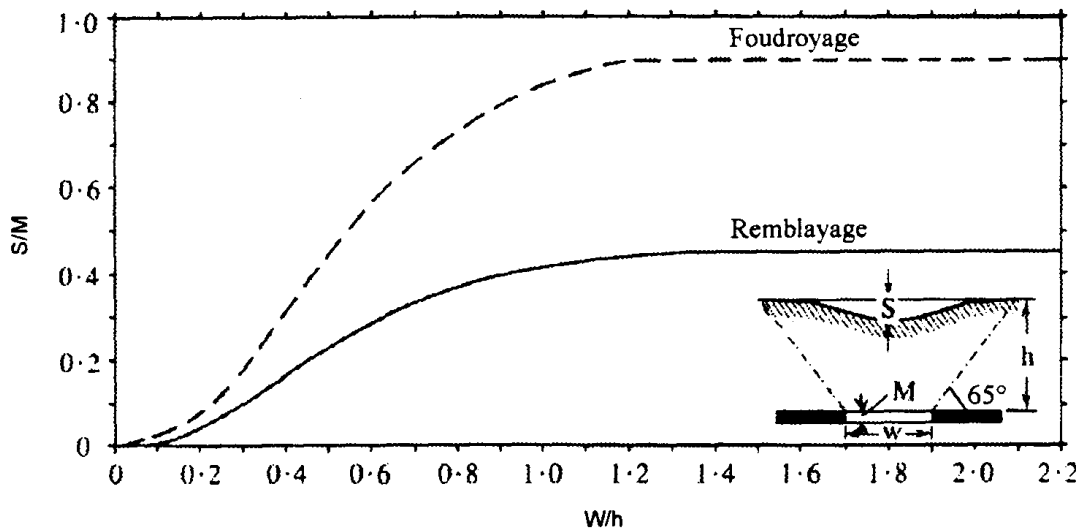


Figure 22 : Relation entre les ratios S/M et w/h (d'après SEH, 1965 [1])

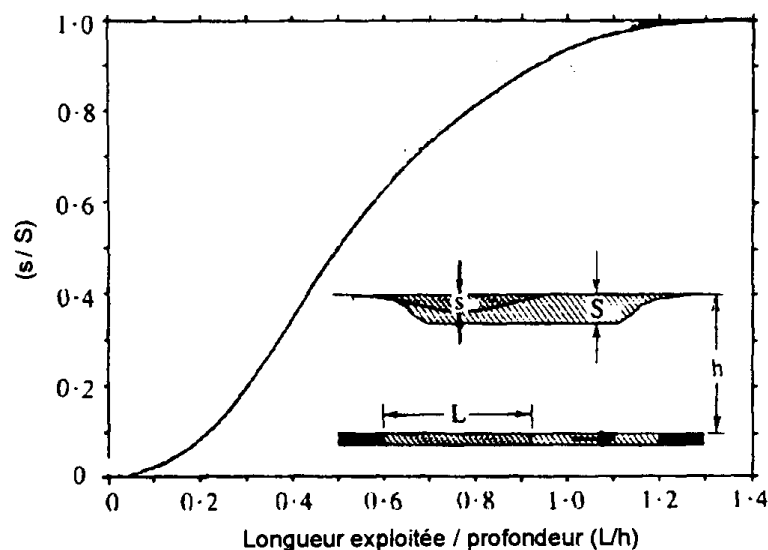


Figure 23 : Rapport s/S en fonction de la longueur exploitée (d'après SEH, 1965 [1])

D'autres auteurs avancent, eux, des différences entre l'affaissement maximal attendu A_{m0} à l'aplomb d'exploitation en plateure et celui, $A_{m\theta}$ attendu à l'aplomb d'exploitation présentant un pendage θ :

- $A_{m\theta} / A_{m0} = 1 / \cos(\theta)$, selon Reddish et al [46] et Lin et al [25] ;
- $A_{m\theta} / A_{m0} = \cos(\theta)$, selon Braüner dans les mines de Donetz en URSS [5]. Notons que cette relation s'est vue vérifiée par modélisation 2D dans le cadre des mines de charbon à l'unité d'exploitation de Provence [1].

Pour estimer les déformations horizontales, la méthode NCB propose deux étapes :

- a) Déduire depuis des abaques les valeurs attendues de déformations horizontales dans le cas d'exploitation en plateure. Les valeurs maximales de la pente, de la déformation horizontale en extension et de celles en compression sont proportionnelles au rapport A_m/P , où P est la profondeur moyenne de l'exploitation. Relation de la forme suivante : $K_i \times A_m/P$, et ce sont les coefficients K_i que l'on déduit de la lecture d'abaques (Figure 24) ;

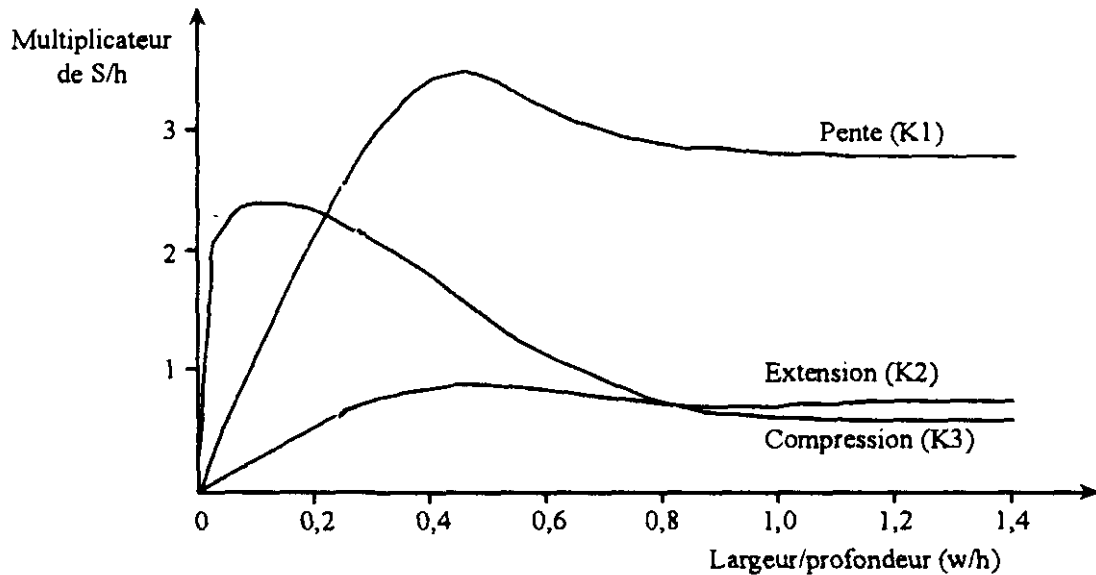


Figure 24 : Courbes pour la prévision de la pente et des déformations pour différents rapports largeur/profondeur (d'après SEH, 1965 [1])

- b) Le NCB propose ensuite d'appliquer une correction dépendant du pendage des exploitations (Tableau 8). Ces corrections sont basées, entre autres, sur l'hypothèse que la somme des déformations maximales en aval et en amont est égal au double de la déformation maximale en plateure.

Notons que le NCB précise que « les déformations horizontales ajustées à l'aide de cette table sont seulement des valeurs indicatives ».

Pendage des couches		Proportion de la déformation maximale en plateure	
		Amont	Aval
1 pour 1,5	66,7%	0,29	1,71
1 pour 2	50,0%	0,35	1,65
1 pour 2,5	40,0%	0,41	1,59
1 pour 3	33,3%	0,46	1,54
1 pour 3,5	28,6%	0,51	1,49
1 pour 4	25,0%	0,56	1,44
1 pour 4,5	22,2%	0,6	1,4
1 pour 5	20,0%	0,64	1,36
1 pour 5,5	18,2%	0,69	1,31
1 pour 6	16,7%	0,73	1,27
1 pour 6,5	15,4%	0,76	1,24
1 pour 7	14,3%	0,8	1,2
1 pour 7,5	13,3%	0,83	1,17
1 pour 8	12,5%	0,85	1,15
1 pour 8,5	11,8%	0,87	1,13
1 pour 9	11,1%	0,89	1,11
1 pour 9,5	10,5%	0,91	1,09
1 pour 10	10,0%	0,92	1,08

Tableau 8 : Corrections des valeurs de déformations horizontales maximales en fonction du pendage proposées par le NCB

2.2.2.2 MÉTHODES SEMI-EMPIRIQUES

Fonctions de profils :

Une fonction de profil d'affaissement est une relation exprimant l'affaissement en un point de la surface en fonction de la distance x prise horizontalement entre ce point et un point de référence. Généralement, ce point de référence est le centre de la cuvette ou le point d'inflexion du bord de la cuvette.

Parmi toutes les fonctions de profils listées dans la thèse de doctorat d'Aissaoui, soit environ une douzaine², aucune ne prend en compte le paramètre du pendage des couches.

² Donets, King et Whetton, Martos, Hoffamn, Kowalczyk, Niederhofer, Kumar et al, Kosterin, Bahuguna et al

Fonctions d'influence :

Ces fonctions utilisent le principe d'additivité (superposition) des mouvements de terrain en surface. Si un point de la surface est soumis à un affaissement s_1 relatif à un panneau exploité d'aire A_1 et un autre s_2 relatif à une aire A_2 , alors l'affaissement global en surface en ce point est $s_1 + s_2$.

Ainsi, dans cette approche, il suffit d'étudier l'affaissement élémentaire généré par un élément infinitésimal d'aire dA pour ensuite « le sommer » sur toute l'aire de l'exploitation pour obtenir l'affaissement global en surface. Dans la littérature il est possible de trouver des fonctions pour exprimer cet affaissement élémentaire, les principales listées par Aissaoui³, ne prennent pas en compte le pendage des exploitations.

Bien souvent, ces fonctions de profils ou d'influence considèrent la valeur de l'affaissement maximal comme une donnée d'entrée et elle est donc supposée connue. Il est donc difficile d'utiliser ces méthodes pour prévoir A_m . De plus, l'hypothèse d'additivité des mouvements revient à supposer un comportement élastique des terrains, ce qui n'est pas vérifié si les terrains sont très décomprimés (fracturés).

2.2.2.3 MÉTHODES NUMÉRIQUES

Les travaux de modélisation numérique 2D menés par Aissaoui dans son mémoire de synthèse [1], ont fourni une modification de l'affaissement maximal attendu en fonction du pendage du même ordre que celle avancée par Braüner sur les mines de Donetz en URSS ($A_{m\theta} / A_{m0} = \cos(\theta)$) (Tableau 9).

L'angle de déviation ϕ de l'affaissement maximum permet de déterminer la position de l'affaissement maximum par rapport au centre du bloc étudié. Il dépend à la fois de la nature des terrains en place et du pendage des couches (§ 1.3.3).

Paramètres	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4	Modèle 5
Pendage θ en °	0	8	10	15	25
Angle de déviation ϕ en ° (modélisation)	0	3,57	5	6,42	11,31
$A_{m\theta}$ en cm (modélisation)	11 = A_{m0}	10,75	10,70	10,58	10
$A_{m0} \times \cos(\theta)$ (modèle de Braüner)	-	10,89	10,83	10,62	9,97

Tableau 9 : Affaissement maximal calculé par modélisation 2D dans les mines de charbon à l'unité d'exploitation de Provence [1]

³ Bals, Keinhorst, Knothe, Beyer, Sann, Litwiniszyn, Braüner

3. APPLICATION AUX SITES DE LA BASE DE DONNÉES INERIS

Sur la base des analyses précédentes et dans le cas où les informations recueillies sont suffisantes, une évaluation rapide du type d'aléa retenu a été faite pour les sites introduits dans la base de données des gisements pentés ou filoniens fournis avec le rapport référencé INERIS DRS-05-55102/R01. Cette donnée a été incluse dans la colonne intitulée « Evaluation simplifiée – Aléa(s) retenu(s) » de la nouvelle version de la BD gisements pentés ou filoniens (cf. CDrom ci-joint).

Remarque : la BD gisements pentés ou filoniens a été modifiée depuis août 2005. Il s'agit donc de la seconde version.

4. CONCLUSION

Les retours d'expérience de désordres au droit d'exploitations pentées ou filoniennes que nous avons étudié mettent en évidence des caractéristiques liées à des mécanismes de rupture et à des répartitions de contrainte en relation avec le pendage élevé du gisement :

- Effondrement localisé lié à une rupture du stot de protection (pilier couronne) lorsque l'exploitation s'est développée trop proche de la surface ;
- Effondrement localisé lié à une rupture d'un barrage d'arrêt souterrain et à un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds (en particulier pendant la phase d'ennoyage) ;
- Affaissements dissymétriques.

Aucun phénomène d'effondrement généralisé n'a été retrouvé dans nos recherches documentaires.

Les principaux critères à prendre en compte lors d'une évaluation des aléas en gisements pentés et/ou filonien sont :

- La géométrie des travaux (largeur exploitée des panneaux) ;
- L'ouverture des chantiers souterrains ;
- La méthode d'exploitation (présence de vides résiduels, de chantiers remblayés, taux de défruitement, etc.) ;
- Le pendage des couches ;
- La profondeur des panneaux ;
- L'épaisseur du stot de protection en surface, quand il existe ;
- La nature des terrains de recouvrement, la présence de failles, la topographie de surface, etc.

Les gisements filoniens présentent toutefois des particularités. Les irrégularités de la minéralisation et les difficultés à définir la position des filons et de leurs affleurements entraînent un zonage de l'aléa prenant en compte ces incertitudes par l'ajout notamment d'une marge plus ou moins large.

Le Tableau 10 présente quelques conditions d'apparition de désordres en surface. Ils proviennent des retours d'expérience français que nous avons étudiés.

		Pendage du gisement	Profondeur de l'exploitation*	Méthodes d'exploitation	Remarques
Effondrement localisé	Rupture du stot de protection	45° à 90°	0 à 50 m**	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	effondrement situé à l'affleurement, allongé dans le sens de la couche (type gouttière)
	Eboulement du toit de la chambre ou de pilier isolé ou de galeries isolées	0 à 60°	0 à 80 m	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	effondrement circulaire
	Rupture d'ouvrage	0 à 90°	-	puits, descenderies	-
	Affaissement	0 à 90°	toute	exploitations remblayées ou exploitations partielles à forte profondeur	cuvette d'affaissement dissymétrique et amplitude de l'affaissement (centre de la cuvette) plus faible qu'en plateure peut s'accompagner de crevasses
	Effondrement généralisé	0 à 45°	-	toutes les méthodes où un vide subsiste après l'exploitation ou peut réapparaître suite à une vidange des remblais (débourrage)	aucun retour d'expérience de ce type de désordre en gisement penté ou filonien

*valeurs indicatives ne prenant pas en compte la présence de facteurs aggravants comme les phénomènes karstiques

**épaisseur du stot de protection

Tableau 10 : Conditions d'apparition de désordres en surface liés à des exploitations pentées ou filoniennes

Les valeurs données dans le tableau ci-dessus sont indicatives. Elles peuvent varier selon les conditions géologiques du site (recouvrement calcaire ou très altéré). La présence de facteurs aggravants comme l'eau ou le temps est à prendre en compte. Il est nécessaire de se baser sur les retours d'expérience recueillis sur le site étudié.

A ce jour, diverses méthodes existent pour évaluer ces types de désordres. Qu'elles soient numériques ou empiriques, elles sont toujours basées sur des exemples de désordres observés. Leur domaine d'application est souvent restreint mais peut s'élargir par extrapolation (cas des abaques d'affaissement).

Effondrement localisé

L'effondrement localisé peut être induit par divers mécanismes :

- Les ruptures d'ouvrage (descenderie, puits) et les ruptures de toit de galerie isolée sont des mécanismes qui ne sont pas spécifiques des gisements pentés ou filoniens. Ce type de rupture n'est pas nécessairement lié au pendage du gisement ;

- Les ruptures de toit de chambre ou de pilier isolé donnant naissance au phénomène de fontis. Ce type de désordre apparaît également pour les gisements en plateure. Toutefois, compte tenu du pendage des exploitations, la hauteur maximale de remontée d'un fontis est supérieure à celle attendue dans un gisement en plateure, toutes choses égales par ailleurs. Des approches volumétriques existent pour évaluer la hauteur de remontée d'un fontis à la surface en fonction du pendage. A ce stade, les conditions du tableau 10 restent indicatives ;
- La déstabilisation de la couronne en tête des chambres qui conduit à la rupture des stots de protection de la surface (pilier couronne). Ce mécanisme se produit lorsque les chambres montantes partant de la voie de base sont exploitées trop près de la surface. Une approche empirique basée sur les retours d'expérience trouvés sur le site ou sur des bassins analogues permet de mieux appréhender le phénomène de rupture du stot de protection. Là encore, à ce stade, les conditions du tableau 10 restent indicatives. La rétroanalyse fait apparaître que l'intensité des désordres augmente avec le pendage de la couche. On peut raisonnablement penser qu'une plus grande inclinaison de la couche facilite l'écoulement des éboulis dans les chambres et minimise le processus de blocage des éboulis plus en profondeur. Elle favorise ainsi l'extension du désordre en surface (effondrement de type « gouttières »). Il semble, en outre, très probable que la présence d'anciennes tranchées creusées à ciel ouvert (désignées « minières ») soit également à l'origine du phénomène ;
- La rupture d'un barrage d'arrêt souterrain, pour les couches fortement pentées, lorsque l'exploitation s'est développée jusqu'en surface et a donné lieu à un remblayage des vides. Il peut induire un débouillage des produits de comblement vers des vides plus profonds. Cet écoulement induit l'apparition de vides proches de la surface et peut entraîner des ruptures des types précédents.

Affaissement

L'une des incidences du pendage que reconnaisse unanimement tous les auteurs et que démontre les mesures de terrain est le décalage (vers l'aval) du point d'affaissement maximal par rapport à ce que serait sa position dans le cas de couches en plateure. Ce décalage influe généralement la cuvette d'affaissement : profil de la cuvette, déformations et pentes. La forme de la cuvette d'affaissement est dissymétrique.

Lorsque la profondeur d'exploitation devient importante, l'influence de l'angle aval se traduit généralement par une large extension de la cuvette d'affaissement mais, en contrepartie, par des amplitudes d'affaissement vertical et des déplacements différentiels horizontaux plus faibles. En revanche, coté amont les déplacements augmentent sensiblement.

L'amplitude de l'affaissement maximal dans le cas de gisements pentés est plus faible que celle attendue pour des gisements en plateure. Elle est, selon certains auteurs, fonction du cosinus de l'angle de pendage. L'amplitude maximale de l'affaissement est directement proportionnelle à l'ouverture des travaux souterrains. Le coefficient de proportionnalité dépend notamment de la profondeur des travaux, de la méthode et des caractéristiques de l'exploitation (défruitement)

et de traitement des vides (foudroyage ou remblayage). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées sont d'ordre décimétrique à métrique.

Plusieurs abaques ont été proposés pour déterminer les angles de la cuvette d'affaissement et la déformation maximale attendue en fonction du pendage du gisement.

Avant toute chose, nous tenons à préciser que pour apprécier les facteurs de prédisposition et l'intensité d'un phénomène, l'approche globale d'évaluation des aléas « mouvement de terrain » présentée dans ce rapport ne se substitue en rien à une étude particulière de site.

5. RÉFÉRENCES

- [1] AISSAOUI K. (1999) *Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques*, Mémoire de thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy ;
- [2] ALEJANO L. R., RAMIREZ-OYANGUREN P., TABOADA J. (18 février 1999) FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* n°36, février 1999, pp 475-491 ;
- [3] ARCAMONE J. (1980) *Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle*, Mémoire de thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy ;
- [4] Association Française de Normalisation (AFNOR) (mai 2000) Commission française « Terminologie de la gestion du risque », CF/ISO/TMB WG N 42 ;
- [5] BRAUNER G. (1973) Calculation of ground movement in european coalfields, *Proc. Symp. Subsidence in mines, Australian Inst. Min, Met* 10/1-10/8 ;
- [6] CAUVIN L. (17 février 2005) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise des concessions d'Estrées-la-Campagne, Cinglais, Urville et Gouvix – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, référencé INERIS-DRS-05-55973/R01 ;
- [7] CAUVIN L. (8 décembre 2004) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain dans l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, référencé INERIS-DRS-04-44270/R02bis ;
- [8] DAUPLEY X. (16 décembre 2002) *Avis sur les risques de mouvements de versant potentiels liés à l'ancienne exploitation de fer de la mine du Rancié*, référencé INERIS-DRS-02-38827/R01 ;
- [9] DAUPLEY X., LOISEAU C. (7 janvier 2005) *Bassin ferrifère de La Ferrière-aux-Etangs – Etude préliminaire à la réalisation d'un plan de prévention des risques Miniers sur le territoire des concessions de La Ferrière-aux-Etangs et de Mont-en-Gérôme*, référencé INERIS-DRS-05-56323/R01 ;
- [10] DEGIRMENCY N., WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (mai 1988), A study of surface subsidence behaviour arising from longwall mining of steeply pitching coal seams, *6th Coal Congress*, Zonguldak, Turkey ;
- [11] DELAUNAY T. (27 juin 2003) *Participation à l'élaboration de la phase informative du PPRM sur l'emprise des concessions de Cinglais, Barbery, Soumont et Perrières - Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, référencé INERIS-DRS-03-44270/R01 ;
- [12] DIDIER C. (avril 2001) *Guide méthodologique pour l'arrêt des exploitations minières souterraines*, référencé INERIS-DRS-01-25750/R01 ;

- [13] DIDIER C., TRITSCH J.-J. (1996) Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risques de mouvements de terrains, référencé INERIS SSE-JTr-CDi/CS-95-21EP37/R01 ;
- [14] FOUCAULT A., RAOULT J.-F. (1988) *Dictionnaire de géologie – 3^{ème} édition*, Masson Edition, Paris, Milan, Barcelone, Mexico ;
- [15] GONZALES NICIEZA C., ALVAREZ FERNANDEZ M.I., MENENDEZ DIAZ A., ALVAREZ VIGIL A.E. (22 décembre 2004) The new tree-dimensional subsidence influence function denoted by n-k-g, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* n°42, Avril 2005, pp 372-387 ;
- [16] HEITFELD M., ROSNER P., KLUNKER J., SAHL H., WELZ A. (2002), Bewertung des Gefährdungspotentials und Sicherungsmassnahmen in Altbergbaubereichen des Aachener Steinkohlenreviers, *Berichte 2. Altbergbau Kolloquium, Clausthal-Zellerfeld* ;
- [17] HEITFELD M., ROSNER P., MUHLENKAMP M. (2004), Bergschäden in Erkelenzer Steinkohlenrevier, *Berichte 4. Altbergbau Kolloquium* ;
- [18] HOLLMANN F., NURENBERG R. (décembre 1972), Der « Tagesnahe Bergbau » als technisches Problem bei der Durchführung von Baumassnahmen im Niederrheinisch-Westfälischen Steinkohlengebiet., *Mitt. D. Westf. Berggewerkschaftskasse, Heft 30, 39p* ;
- [19] HUTCHINSON J., PHILLIPS C. et CASCANTE G. (2002) Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning, *Geotechnical and Geological Engineering*, p.41-63 ;
- [20] INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB, *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa*, référencé INERIS DRS-04-51198/R01 PROJET n° 2, en cours de réalisation à la date de rédaction du présent rapport ;
- [21] JOSIEN J.P. (1985) *Analyse d'un effondrement survenu au-dessus de l'exploitation des Houillères du Dauphiné*, Rapport CERCHAR ;
- [22] KRATSCH H. (1983) *Mining subsidence Engineering*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg ;
- [23] LAMBERT C. (29 juillet 2005) *Inventaire et principales caractéristiques des gisements pentés et filoniens en France - Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens*, référencé INERIS DRS-05-55102/R01 ;
- [24] LABONDE J.P (1996) *Fermeture des mines en France*, Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris ;
- [25] LIN S., WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (1992) *Application of asymmetrical influence Functions for subsidence prediction of gently inclined seam extractions*, Ed Elsevier, Amsterdam ;

- [26] MARTINET V., NACHBAUR A. (30 septembre 2005) *Bassin houiller du Dauphiné – Concessions de la Motte d’Aveillans, du Majeuil, des Boines, du Peychagnard, de la Jonche, du Marais de la Mure, de Pierre-Châtel et Saint Théoffrey, de Comberamis et de Puteville – Contribution à la réalisation d’un PPRM – Phase informative (version projet)*, référencé INERIS-DRS-05-68070/R01PROJET ;
- [27] MEIER G. (2001), Numerische Abschätzung von Tagenbruchgefährdungen in Altgerbaugebieten, *Berichte 13. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie*, PP. 95-100 ;
- [28] Ministère de l’aménagement du territoire et de l’environnement, LCPC, INERIS (juin 2002) *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, Collection Environnement - Les risques naturels ;
- [29] MOREAU G. (1925), *Etude industrielle des gîtes métallifères*, Librairie Polytechnique Ch. BERANGER, 2^{ème} édition, 562p ;
- [30] NCB (1965-1975) Subsidence Engineers Handbook, *National Coal Board, London* ;
- [31] 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 ;
- [32] RAGUIN E. (1949), *Géologie des gîtes minéraux*, Edition MASSON et Cie, 633p ;
- [33] REN G., WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (1987) Mining subsidence and displacement prediction using influence function methods, *Mining Science and Technology* 5, pp 89-104 ;
- [34] RENAUD V. (7 juin 2004) *Contribution à l’analyse des conditions d’effondrement des gisements pentés des bassins ferrifères de Soumont, May-sur-Orne et Segré (Calvados, Maine-et-Loire)*, référencé INERIS-DRS-04-50864/RN01 ;
- [35] ROM H. (1964) Grenzwinkel-Systematik, *Mitteilungen Markscheidewessen* 71, pp 197-199 ;
- [36] SALMON R. (15 février 2005) *Concession de Trémuson – Mines de plomb, zinc et argent des Côtes-d’Armor - Evaluation des aléas mouvements de terrain*, référencé INERIS-DRS-05-56321/R01 ;
- [37] SENFAUTE G., BENNANI M. (4 novembre 1997) *Bassin Houiller du Dauphiné - Site de La Mure Analyse des effets en surface des travaux miniers souterrains*, Houillères de Bassin du Centre et du Midi - Unité de Gestion des Sites Arrêtés, référencé INERIS SSE-GSe-MBe/DMi/BS-97-26EE94/RN01ter ;
- [38] TATARINOV P.M. (1955), *Conditions de formation des gisements de minerais (métallique et non métalliques)*, Annales du service d’information géologique du BRGM, numéro 36 de janvier 1959, 215p ;
- [39] TINCELIN E. et VOUILLE G. (1991) *Mine de Soumont – Définition des zones à risques et de la nature des risques*, Rapport de l’Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris – Centre de géotechnique et d’exploitation du sous-sol ;

- [40] TORANO J., RODRIGUEZ R., RAMIREZ-OYANGUREN P. (26 juin 2000) Probabilistic analysis of subsidence-induced strains at the surface above steep seam mining, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* n°37, juin 2000, pp 1161-1167 ;
- [41] TRITSCH J.J. (7 janvier 2005) *Etude préliminaire à la réalisation d'un plan de prévention des risques miniers sur le territoire des communes de La-Chapelle-sur-Oudon, Saint-Gemmes-d'Andigné, Segré, Chazé-Henry et Pouancé (49) – Bassin ferrifère de d'Anjou - Bretagne*, référencé INERIS-DRS-05-55971/R01 ;
- [42] TRITSCH J.J., DELAUNAY T. (25 juin 2004) *Evaluation et cartographie des aléas mouvements de terrain sur le bassin minier de May-sur-Orne – Bassin ferrifère de Normandie (Calvados)*, référencé INERIS-DRS-04-48514/R02bis ;
- [43] TRITSCH J.-J., DELAUNAY T. (25 mars 2004) *Étude préliminaire à la réalisation d'un Plan de Prévention des Risques Miniers sur les Communes de Nyoiseau, Combrée, Noyant-la-Gravoyère et Bouillé-Ménard (Maine-et-Loire) - Bassin ferrifère d'Anjou – Bretagne, Secteur dénommé Segré zone 1. Phase informative et évaluation des aléas mouvements de terrain*, référencé INERIS-DRS-04-42376/R03 ;
- [44] TROUMBATCHEV V.F., MEL'NIKOV E.A. (?) Répartition des contraintes dans les piliers entre les chambres pour des gisements moyennement inclinés ou en dressant, *Institut Skotchinsky des Mines*, Moscou, Union des Républiques socialistes soviétiques, pp 337-344 ;
- [45] VINKLER F. (1999) *Couplages hydromécaniques dans les massifs rocheux : du stockage de déchets radioactifs à la stabilité des mines abandonnées*, Mémoire de thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Ecole des Mines de Nancy ;
- [46] WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (1989) *Subsidence – Occurrence, Prediction and Control*, ED Elsevier ;
- [47] YAO X.L., WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (1993) Non linear finite element analysis of surface subsidence arising from inclined seam extraction, *Int J Rock Mech. Min. Sci and Geom. Abstract Vol. 30 n°4*.

6. GLOSSAIRE

Affaissement : Fléchissement, souple et progressif, des terrains sus-jacents à une exploitation souterraine, et, par extension, dépression topographique en forme de cuvette due à ce mouvement. 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 pourcentages de l'amplitude de l'affaissement final et qui correspond à la part de l'affaissement observé en un point après l'arrêt définitif des travaux d'extraction dans l'aire qui influence ce point.

Affleurement : partie d'un terrain visible à la surface de la terre. Sur les cartes, les affleurements sont généralement limités par des traits fins qui sont les contours géologiques [14].

Aléa : phénomène de probabilité d'occurrence et d'intensité données. Par exemple : aléa « mouvements de terrain ».

Amas : corps minéralisé isométrique dont les 3 dimensions sont à peu près égales.

Angle limite : permet de déterminer, à partir des chantiers exploités au fond, la position en surface de la zone d'affaissement. Les valeurs de l'angle limite que l'on retrouve dans la littérature oscillent entre 30 et 40° dans l'hémisphère nord [1]. En gisements pentés, l'affaissement est dissymétrique et est caractérisé par un angle limite amont et un angle limite aval, variables avec la pente.

Angle de déviation : permet de déterminer la position en surface du début de la zone où l'affaissement maximum est atteint. Il dépend de la nature des terrains de recouvrement de la profondeur moyenne de la zone exploitée et du pendage des couches.

Arrière-taille : partie de l'exploitation souterraine située juste en arrière de la dernière ligne de soutènement en place par rapport à l'avancée des travaux.

Chambre : dans l'expression chambres et piliers, on appelle chambres, les galeries tracées qui séparent les piliers. Dans l'expression exploitation par chambres, rencontrée généralement pour les gisements pentés ou filoniens, le terme de chambre désigne une excavation souterraine dont les parois délimitent le volume occupé par le minerai enlevé.

Colonne métallifère : lieu de concentration des minerais primaires dans le corps de minerai filonien. Ce corps est rarement également riche sur toute son extension.

Couche : corps minéralisé en forme de dalle, d'origine sédimentaire, qui est séparé des autres roches par les surfaces planes de stratification. Les couches sont des formations qui se sont constituées en même temps que les roches qui les contiennent, ce qui les différencie des filons.

Densité : rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau (ou d'air pour les gaz).

Désordres : effets négatifs, directs et indirects, d'un phénomène sur l'intégrité et le fonctionnement des milieux. Les désordres sont caractérisés par différents

indicateurs : physiques (désordres hydrauliques, géologiques, aux infrastructures, etc.), socio-économiques (dysfonctionnements liés aux atteintes aux services publics), population (population isolée...).

Direction : un gîte est rapporté à un plan vertical et à un plan horizontal. Son intersection avec le plan horizontal est appelée sa direction. Ce sera une ligne droite, courbe ou ondulée pour un filon ou une couche mince inclinée. Pour un amas, cette intersection affectera la forme d'une surface limitée par deux lignes irrégulières. Dans le premier cas, on déterminera l'orientation de la ligne ou de chaque portion de ligne, dans le second cas, on pourra relever les contours ou établir une direction moyenne [29].

Dureté : résistance opposée par un corps à l'action d'un autre corps glissant à sa surface et pressé contre celle-ci. Un corps rayé par un autre est le moins dur des deux : échelle de Mohs de 1 (moins dur) à 10 (très dur).

Eboulement (ou écoulement) : chute de masses rocheuses rapide, discontinue et brutale résultant de l'action de la pesanteur.

Effondrement : abaissement brutal de la surface qui se traduit par une rupture franche des terrains de surface. On parle d'effondrement localisé lorsque cette rupture ne concerne qu'une zone d'extension limitée en surface (les effondrements localisés peuvent être le résultat de la rupture du toit d'une cavité souterraine, de la rupture d'un pilier, ou de la rupture de la tête d'un puits) et d'effondrement en masse ou généralisé lorsqu'il concerne, au contraire, une zone étendue en surface.

Enjeux : personnes, animaux, biens, activités, moyens, infrastructures, patrimoines, etc. susceptibles d'être affectés par un phénomène. Les enjeux peuvent être exprimés sous forme d'une densité de population, d'un trafic autoroutier...

Éponte : chacune des surfaces limitant un filon et bordure de la roche encaissante. L'éponte sous le filon est le mur, celle sur le filon est le toit [14]. Paroi d'un gîte [29].

Filon : masse minérale qui remplit une fente de roche. Si le filon est oblique, les roches qui reposent au-dessus s'appellent le toit et celles qui viennent au-dessous, le mur. Les filons sont des formations encaissées dans des roches formées antérieurement au phénomène de remplissage de la fente par la matière minéralisée.

Filons hydrothermaux : filons qui résultent du remplissage de fissures ou de cavités par une précipitation de substances amenées par une circulation d'eaux thermales [31].

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 fontis se manifeste de manière soudaine en surface.

Foudroyage : action de laisser ébouler ou tomber volontairement le toit de l'exploitation, en supprimant le soutènement par exemple.

Gangue : dans un gisement, ensemble des minéraux, qui sont sans valeur, et entourant des minerais. Les gangues les plus fréquentes sont : le quartz, les carbonates, des sulfates, la fluorine, l'apatite, les silicates [31] [14].

Gisement (de minerai) : accumulation de matière minérale dans l'écorce terrestre, formée sous l'influence de divers processus géologiques et qui peut être exploitée, au point de vue quantité et qualité, dans des buts industriels [38]. Le principe servant de base est que tout gisement de minerai est une concentration locale exceptionnelle de substances qui sont diffusées ailleurs dans l'écorce terrestre, généralement à faible teneur [31].

Instabilité : état d'un système qu'une faible perturbation modifie de manière irréversible.

Intensité : expression d'un phénomène, évaluée ou mesurée par ses paramètres physiques. 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 (c'est le cas pour l'intensité macrosismique par exemple).

Lavabilité d'un minerai : aptitude d'un minerai au lavage, c'est-à-dire à la concentration gravimétrique (pour améliorer sa qualité).

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'exerce sur lui(eux). Dans le cadre des mouvements de terrain, il peut s'agir par exemple, de la rupture du toit, d'un pilier... Notons qu'un mécanisme de rupture d'un ouvrage souterrain ne mène pas nécessairement à une manifestation en surface (exemple : auto-comblement lors du mécanisme de fontis).

Méthode des chambres-magasins : méthode d'exploitation qui consiste à abattre la roche entre deux niveaux, à laisser la chambre remplie durant toute la phase d'abattage puis à effectuer la vidange de la chambre en phase finale. La chambre est alors laissée vide.

Méthode des sous-niveaux abattus : méthode d'exploitation du minerai qui consiste à abattre la roche entre deux niveaux distants de plusieurs mètres. En général tout le minerai est abattu entre ces deux niveaux. Après exploitation, la chambre est donc entièrement vide. Il est cependant fréquent de laisser du minerai en place lorsqu'on craint un effondrement. Ce minerai prend la forme de piliers répartis de façon irrégulière.

Méthode des tranches montantes remblayées : méthode d'exploitation qui consiste, par niveau de 50 m environ, à exploiter depuis le bas vers le haut des tranches de 3 à 3,5 m d'épaisseur en moyenne, qui sont ensuite remblayées. Le remblai peut-être constitué de stériles provenant de travaux d'infrastructures, de résidus provenant du traitement du minerai ou de produits provenant de carrière à ciel ouvert. Une dalle flottante (non ancrée dans les épontes, la dalle étant maintenue par boisage) en béton est parfois coulée dès la première tranche du

niveau. Elle permet en fin de niveau, d'exploiter intégralement le minerai dans le niveau sous-jacent, tout en étant protégé du remblai du niveau supérieur.

Méthode par tranches descendantes sous remblai : méthode d'exploitation qui consiste à creuser une galerie horizontale, à remblayer (totalement ou partiellement) cette galerie avec un produit cimenté de sorte à constituer des dalles parfois renforcées par des fers à béton ou produits assimilés, puis à poursuivre l'exploitation en creusant une galerie sous la précédente. A la fin de l'exploitation, les chambres sont donc partiellement remblayées.

Minerai : formation minérale qui peut être immédiatement utilisée, ou bien dont on peut extraire des métaux ou des minéraux utilisables dans l'économie nationale [38].

Mur : (terme minier) surface inférieure d'une formation, ou bien les terrains situés immédiatement sous elle [14].

Pendage : angle entre le plan horizontal et le plus grand plan inscriptible dans le gisement de minerai. Le pendage d'une exploitation représentera l'angle entre le plan horizontal et le plan moyen du mur de l'exploitation.

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

Pilier couronne : dalle de terrain en place séparant la surface et la galerie ou chambre la moins profonde.

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. Dans le domaine des mouvements de terrain, on lui préfère 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.

Puissance : épaisseur du gîte comptée suivant une perpendiculaire aux parois. Dans le cas d'une lentille, la perpendiculaire doit être élevée sur le plan moyen.

Relevée : hauteur verticale entre les voies de base et de tête.

Remblayage : action de remplir tout ou une partie du vide résultant de l'enlèvement du minerai.

Risque : expression des dommages potentiels en vies humaines, en biens et en activités consécutifs à la survenance d'un phénomène d'occurrence et d'intensité données. Combinaison des composantes d'un aléa (probabilité d'occurrence et intensité) avec celles des enjeux et/ou de la vulnérabilité pour une période donnée, sur un site donné.

Sole : paroi inférieure de l'exploitation.

Stockwerks : petits champs de filons entrecroisés, particulièrement nombreux et rapprochés [31]. Un champ de filons est un ensemble de filons disposés de manière parallèle, curviligne, rectangulaire ou radiale.

Taille : panneau où l'on extrait, où l'on « taille », un minerai.

Tassement : abaissement (déplacement vertical) de la surface du sol 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 ou au poids propre des terrains.

Taux de défrètement : coefficient adimensionnel qui s'applique à une exploitation en couche et qui est défini par le rapport de la surface exploitée sur la surface totale initiale avant exploitation.

Teneur d'un minerai : quantité de minéral utile dans chaque tonne de minerai, exprimée en onces troy par tonne ou en grammes par tonne pour les métaux précieux et en pourcentage pour les autres métaux.

Terrain encaissant : ensemble de roches dans lesquelles s'est mis en place un massif intrusif ou un filon [14].

Toit : (terme minier) surface supérieure d'une formation ou bien les terrains la surmontant immédiatement [14].

7. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Exemples de mouvements de terrain liés aux exploitations pentées et/ou filoniennes	16 A4
Annexe 2	Liste des désordres au droit de gisements pentés ou filoniens (non exhaustive)	1 A4 + 5 A3
Annexe 3	Tableau comparatif de différents bassins ferrifères de l'Ouest	3 A4
Annexe 4	Approche analytique du problème d'autocomblement des galeries	8 A4
Annexe 5	Abaque des angles d'influence des exploitations en fonction du pendage des couches (HBL)	1A4 + 1 A3

ANNEXES