

# QUELQUES RETOURS D'EXPERIENCE D'INSTABILITES DE TERRAIN LIEES AUX EXPLOITATIONS PENTEES

Catherine LAMBERT, Frédéric POULARD

INERIS – Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Parc Technologique ALATA, B.P. 2, 60550 VERNEUIL-EN-HALATTE, [www.ineris.fr](http://www.ineris.fr), [catherine.lambert@ineris.fr](mailto:catherine.lambert@ineris.fr), [frederic.poulard@ineris.fr](mailto:frederic.poulard@ineris.fr)

**RÉSUMÉ** – Suite au recensement de plus de 1000 exploitations en gisements pentés ou filoniens français, des désordres caractéristiques liés à ce type d'exploitation sont passés en revue : effondrements localisés liés à une rupture de la couronne, à un débouillage, à une rupture du toit, affaissements dissymétriques... L'objectif est de caractériser ces désordres qui sont influencés par les méthodes d'exploitation et les caractéristiques géologiques propres à ce type de dépôt. Ce travail devra servir à une méthodologie d'évaluation des aléas en vue de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM).

## 1. Introduction

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

La plupart des régions françaises possèdent des mines ayant été exploitées, souvent avant le XX<sup>ème</sup> siècle, pour le fer, le plomb, le zinc, l'aluminium, l'uranium... dans des gisements à fort pendage. Un peu plus de 1000 sites ont été recensés à ce jour (figure I).

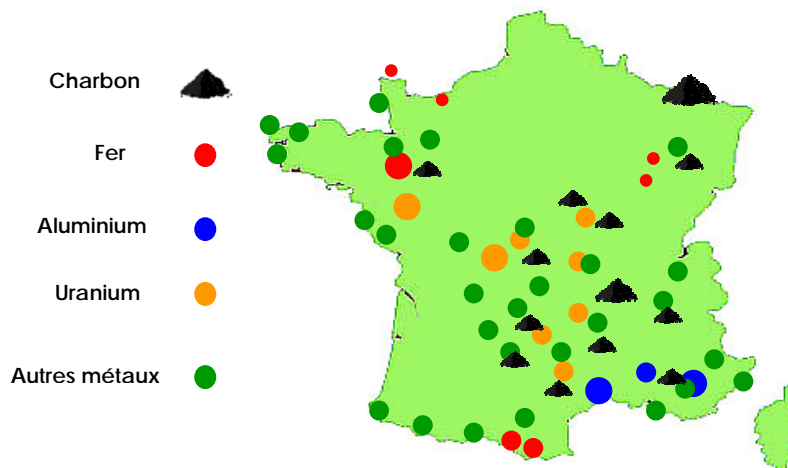


Figure I : Localisation géographique des principaux minerais, pentés ou filoniens, concessibles exploités en France métropolitaine

Comme les exploitations en plateaux, les exploitations pentées ou en contexte filonien sont soumises à des instabilités susceptibles d'affecter les terrains de recouvrement et la surface du sol. Ainsi, dès l'arrêt des travaux, mais parfois également beaucoup plus tardivement, de nombreux désordres ont été observés à l'aplomb des anciens sites miniers. Les méthodes d'exploitation spécifiques et les caractéristiques géologiques particulières, notamment le pendage, ont des effets sur le mécanisme, la géométrie et la localisation des désordres en surface qui les distinguent de ceux rencontrés en contexte de plateau.

Après avoir rappelé les principales caractéristiques de gisements pentés ou filoniens, cette communication décrit les désordres « types » liés aux exploitations pentées ou filoniennes et

propose d'identifier des critères pour évaluer le risque d'apparition de ces phénomènes en surface.

## **2. Principales caractéristiques des gisements pentés ou filoniens**

### **2.1. Caractéristiques géologiques**

Les sites miniers en gisements pentés ou filoniens sont pour la plupart d'anciennes exploitations (sauf les exploitations en dressants du bassin houiller de Lorraine par exemple). Les plans précis et complets des travaux sont souvent inexistantes et la géologie permet de donner des indices quant à la nature et les caractéristiques du minerai et de son encaissant, la position des affleurements et la localisation des zones exploitées.

Les données géologiques et d'exploitation (contours approximatifs des travaux, ouvrages débouchant en surface,...) sont utilisées afin de cartographier de manière plus complète l'étendue probable des travaux d'exploitation.

Les zones minéralisées peuvent prendre des formes très diverses suivant leur formation : inclusion dans des fractures ou des failles (filons), couche sédimentaire plissée (charbon lorrain), altération de granite (amas)... La géométrie du corps minéralisé influe très nettement sur les méthodes d'exploitation du minerai.

La direction et l'âge relatif des lignes de fractures et des miroirs de faille, aux environs du gîte, permettent dans une certaine mesure de reconnaître les accidents tectoniques qui ont pu affecter la zone minéralisée et limiter les travaux.

La recherche des affleurements apporte souvent des renseignements pour délimiter les zones potentiellement exploitées.

En présence d'une couche inclinée ou d'un filon exploité, il est indispensable de déterminer la direction du plongement du gisement. Le pendage influe fortement sur les méthodes d'exploitation et les désordres susceptibles de se produire en surface.

Les gisements sédimentaires sont toujours compris entre des épontes généralement bien identifiées. Dans les gisements non sédimentaires, la minéralisation peut être irrégulière, de sorte que les limites de l'exploitation sont souvent difficiles à connaître.

Les épontes des gisements non sédimentaires sont souvent de bonne qualité mécanique et ont permis aux exploitants de prendre certaines libertés avec le soutènement de cavités et même de le supprimer parfois totalement.

### **2.2. Méthodes d'exploitation**

A part quelques exceptions (mines d'aluminium en PACA, mine de plomb en Rhône-Alpes ou mine de zinc dans le Gard, par exemple), les réserves reconnues des mines non sédimentaires ne présentent que des tonnages faibles, ce qui explique la durée de vie réduite de la plupart de ces mines (10 à 20 ans pour beaucoup d'entre elles).

Les travaux préparatoires des mines en gisements filoniens ou en amas présentent des particularités en terme d'ossatures de travaux. En effet, l'emploi de puits inclinés et de galeries à flanc de coteau y est plus fréquent. Les puits inclinés permettaient d'exploiter au mur du gisement et de réduire ainsi le recours à des travers-bancs.

Les méthodes d'exploitation mises en place varient d'un point à l'autre de ces mines afin de prendre en compte les variations géologiques locales et de maintenir la rentabilité des travaux. Parmi les très nombreux facteurs qui modifient les conditions de travail, signalons particulièrement : la puissance, le pendage et l'irrégularité de la formation, la dureté, les propriétés mécaniques du minerai et la nature des épontes, les variations des teneurs en minerai, la stabilité de la couronne<sup>1</sup>, l'importance du gisement... Par ailleurs, le remblayage des vides n'était pas systématique.

---

<sup>1</sup> Stot laissé entre le toit de l'exploitation et la surface (son épaisseur est de 20 m en moyenne dans les exploitations ferrifères de l'Ouest).

Ainsi, la nature et la dimension des vides résiduels peuvent être variables dans un même gisement.

Mis à part les couches minces peu inclinées, les gîtes, en amas ou en filon, sont pris principalement par tranches successives montantes ou descendantes. La mine de La Plagne (73) et la plupart des mines d'uranium françaises se trouvent dans ce cas. Les tranches ont des épaisseurs variant de 2 à 5 m pour 10 à 150 m de large. Elles sont parfois remblayées. Dans d'autres cas, quelques piliers sont laissés en place pour garantir la stabilité du toit. La méthode des chambres magasins (figures 2 et 3) est également souvent employée lorsque le pendage est élevé (mines de fer de l'Ouest). La hauteur de ces chambres peut varier de 10 à 70 m pour une largeur comprise entre 30 et 200 m (Delaunay et Tritsch, 2004).

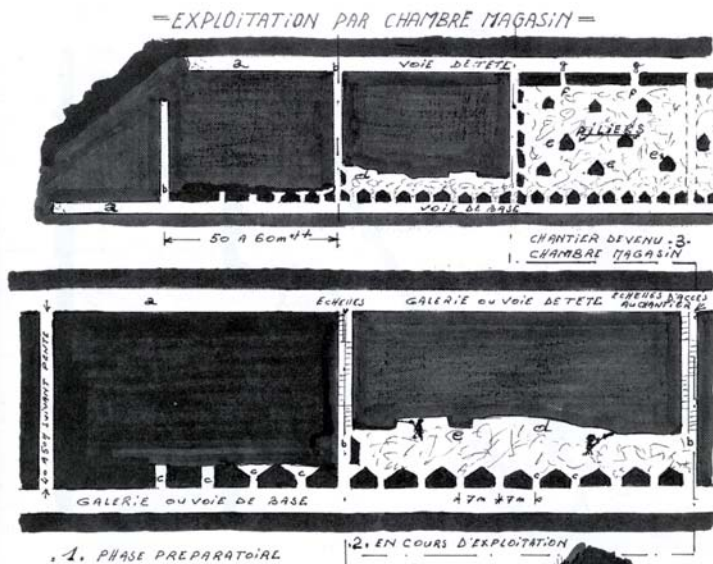


Figure 2 : Méthode d'exploitation par chambres-magasins dans les mines de fer de l'Ouest (Collège Paul Verlaine Evrecy et Amicale des anciens mineurs, 2002)

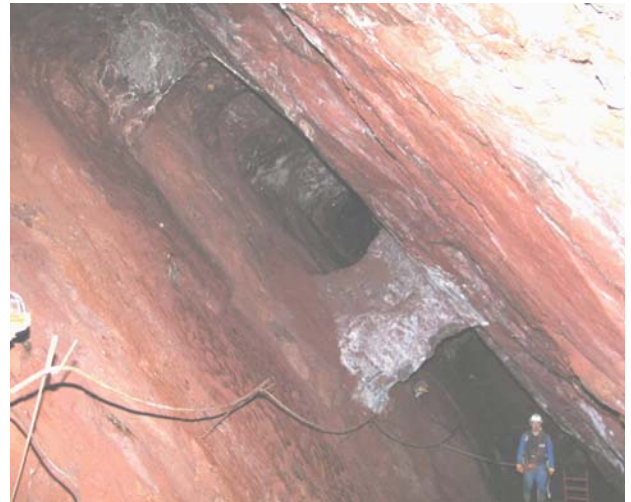


Figure 3 : Exploitation pentée par la méthode des chambres-magasins à May-sur-Orne (14)

### 3. Quelques exemples de désordres en gisement penté et/ou filonien

Les retours d'expérience de désordres au droit d'exploitations pentées ou filoniennes 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. Nous présenterons ci-dessous les principaux désordres rencontrés au droit de gisements pentés.

Aucun exemple de phénomène d'effondrement généralisé lié à des gisements pentés n'ayant été retrouvé dans nos recherches documentaires, cet aléa n'est donc pas traité ici.

#### 3.1. Effondrement localisé

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. L'effondrement localisé peut être induit par divers mécanismes :

- a) *la déstabilisation de la couronne en tête des chambres* qui conduit à la rupture des stots de protection de la surface (pilier couronne), lorsque l'exploitation s'est développée à de faibles profondeurs (figure 4) ;

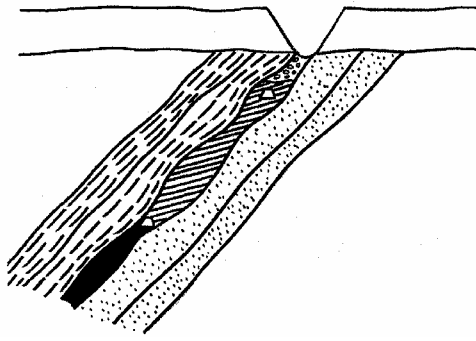


Figure 4 : Rupture d'une tête de veine pentée – effondrement en forme de « gouttière »



Figure 5 : Rupture d'une tête de veine pentée – effondrement en forme de « tiroir »

Un accident, reconnu par le Service des Mines de l'époque comme une rupture du stot de protection est, par exemple, apparu en 1930 dans le bassin ferrifère de Segré, là où ont été montées des tailles à moins de 25 m de la surface, à partir du niveau -68 m. Le pendage de la couche est de 70° environ. Les chambres dont les dimensions ont atteint 40 à 60 m de longueur et 50 à 75 m de hauteur ont permis un taux de défrêtement de 70 à 75 %. On peut également noter qu'il existe, en surface du sol, une zone d'altération de 30 à 40 m d'épaisseur au sein de laquelle la résistance mécanique de la roche est sensiblement diminuée. On a observé, en surface, une dépression du sol, allongée en forme de gouttière très profonde, de plus de 30 m de longueur sur 15 m de largeur environ. Le volume de vide créé a été estimé à 4 000 m<sup>3</sup>. Cet effondrement, remblayé rapidement, n'est plus visible actuellement.

On peut également rencontrer des désordres en forme de « tiroir » liés la nature très compétente des terrains de recouvrement (figure 5).

Une approche empirique, basée sur les retours d'expérience de site ou sur de bassins miniers analogues, permet de mieux appréhender le phénomène de rupture du stot de protection. 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 » dans les anciennes exploitations de fer) soit également à l'origine du phénomène.

- b) *la rupture de toit de chambre (fragilité des épontes) ou de pilier isolé* qui donne naissance au phénomène de fontis (figures 6 et 7) ;

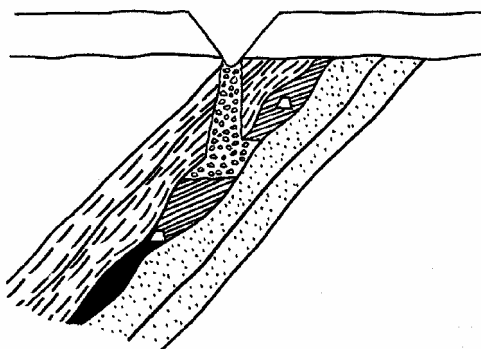


Figure 6 : Effondrement localisé de type fontis au droit de zone de travaux



Figure 7 : Dégradation d'un pilier dans une exploitation pentée à May-sur-Orne (14)

Un exemple intéressant est celui de La Fieffe sur la concession de La Ferrière-aux-Etangs (61). Il constitue le cas d'effondrement localisé le plus important connu dans les bassins ferrifères de l'Ouest en terme de dimensions. Il est associé à l'apparition de fractures dans un périmètre étendu (15 ha environ). Cet événement est à l'origine du détournement d'une route dont la stabilité était menacée. L'effondrement est apparu en mai 1974 à l'aplomb de vieux travaux, profonds d'une quinzaine de mètre où le pendage est estimé à 45°. D'après son positionnement sur les plans de mine, et aux incertitudes de calage près, il se situerait à l'aplomb d'un pilier de 3 m de côté. Le taux de défructement de cette zone était d'au moins 90 %.

L'apparition des fissures en surface semble cependant indiquer qu'un secteur important de travaux souterrains, situé entre quelques mètres et 140 m de profondeur, se soit éboulé. Dans ce cas, l'éboulement des travaux au fond a occasionné localement, là où les travaux étaient les moins profonds, un effondrement localisé et, à l'aplomb des travaux les plus profonds, un phénomène de type affaissement qui n'aurait été perçu que par les fissures.

Signalons enfin que cette zone de désordres se localise en bordure sud de la faille qui décale et redresse le gisement vers le nord et dont l'orientation est proche de celle du réseau principal de fissures. Cette situation peut être à l'origine de porte-à-faux de bancs au toit ou d'une simple fragilisation de celui-ci, affaiblissant la stabilité d'ensemble des travaux.

Ce type de désordre apparaît également pour les gisements en plateure. Toutefois, compte tenu du pendage des exploitations et 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 (taux de défructement, profondeur des travaux...). Des approches volumétriques permettent d'évaluer la hauteur de remontée d'un fontis à la surface en fonction du pendage.

- c) *la rupture d'un barrage d'arrêt<sup>2</sup> 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 similaires à celles décrites précédemment ;
- d) *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.

### **3.2. Affaissement**

L'exploitation de gisements pentés et/ou filoniens peut donner naissance à des phénomènes d'affaissement progressif en surface du sol. Quand la profondeur d'exploitation est importante, du fait du faible volume des vides résiduels (couches ou filons souvent de faible puissance), la répercussion en surface des désordres au fond 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 suivis de base de nivellement, effectués encore aujourd'hui pour les exploitations pentées de charbon en Lorraine, montrent des affaissements dissymétriques au droit de travaux, de 2 à 4 m d'ouverture, remblayés hydrauliquement.

L'une des incidences du pendage, reconnue unanimement par tous les auteurs et démontrée par toutes les mesures de terrain (Proust, 1964 ; Whittaker and Reddish, 1989), est le décalage (vers l'aval) du point d'affaissement maximal par rapport à ce que serait sa position dans le cas

---

<sup>2</sup> Bouchon créé au niveau de la voie de base afin d'éviter que les remblais coulés à partir de la voie de tête ne se répandent dans la galerie et les travaux sus-jacents et de limiter la déformation de la galerie durant l'exploitation. Ce barrage est mis en place au fur et à mesure de l'exploitation de la taille (Vinkler, 1999).

de couches en plateure. Ce décalage influe généralement sur la cuvette d'affaissement : profil de la cuvette, déformations et pentes. La forme de la cuvette d'affaissement est dissymétrique : coté amont-pendage les déplacements et les déformations augmentent sensiblement, tandis que côté aval-pendage les pentes sont plus faibles (figure 8).

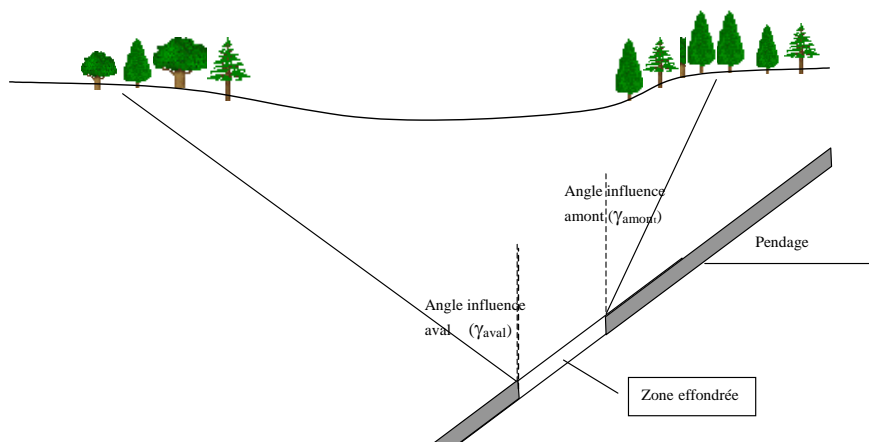


Figure 8 : Représentation schématique de la cuvette d'affaissement et des angles d'influence amont et aval en gisement penté

L'amplitude de l'affaissement maximal est, selon certains auteurs, fonction du cosinus de l'angle de pendage. Elle 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 (taux de défrètement) et de traitement des vides (foudroyage ou remblayage). Dans la majorité des cas, les amplitudes maximales observées sont d'ordre décimétrique à métrique.

#### 4. Evaluation des aléas– critères à prendre en considération

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 défrètement, 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 rendent difficile l'évaluation des aléas et des risques. La cartographie des zones d'aléa doit alors tenir compte de ces incertitudes par la définition, entre autre, d'une marge de sécurité plus ou moins large. Il en résulte que le zonage de l'aléa est, en grande partie, lié aux incertitudes plutôt qu'à l'influence du désordre redouté lui-même. Cette spécificité est souvent difficile à concevoir pour les populations et les institutions concernées par l'étude d'aléa.

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

Tableau I : Conditions d'apparition de désordres en surface relatifs à des exploitations pentées

		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 (débouillage)	effondrement situé à l'affleurement, allongé dans le sens de la couche (type gouttière ou tiroir)
	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 (débouillage)	effondrement circulaire
	Rupture d'ouvrage	0 à 90°	-	puits, descenderies	-
Affaissement		0 à 90°	toute	exploitations remblayées ou exploitations partielles à forte profondeur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cuvette d'affaissement dissymétrique</li> <li>• amplitude de l'affaissement (centre de la cuvette) plus faible</li> <li>• peut s'accompagner de crevasses</li> </ul>

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

\*\*épaisseur du stot de protection

Les valeurs données dans le tableau I sont indicatives. Elles peuvent varier selon les conditions géologiques du site (recouvrement résistant ou très altéré). En outre, certains facteurs aggravants comme l'eau ou le temps (agissant notamment sur le vieillissement des matériaux) doivent être pris en compte. Il est nécessaire de se baser sur les retours d'expérience recueillis sur le site étudié.

Diverses méthodes existent pour évaluer ce type 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).

Il convient de souligner ici que pour apprécier les facteurs de prédisposition et l'intensité d'un phénomène, l'approche globale d'évaluation des aléas « mouvements de terrain » présentée ici ne se substitue en rien à une étude particulière de site.

## 5. Conclusion

Les désordres de type « mouvements de terrain », relatifs aux exploitations menées en gisement penté ou filonien sont principalement :

- des effondrements localisés, de type « gouttière », « fontis » ou « tiroirs », de diamètre limité (maximum quelques mètres). Ce type de désordre est associé à une rupture de pilier couronne ou de pilier isolé ou de toit de chambre lorsque l'exploitation s'est développée à de faibles profondeurs. Le pendage joue un rôle important : il minimise le phénomène d'autocomblement à cause d'un écoulement vers l'aval du matériau éboulé ;
- des affaissements. Ce type de désordre est lié à des effondrements dans des zones de travaux profonds et d'extension importante. Le pendage a pour conséquence de modifier la géométrie de la cuvette d'affaissement en la rendant dissymétrique. Ainsi la zone amont-pendage sera concernée par des déformations et des déplacements plus importants que celle en aval-pendage.

L'évaluation de ces aléas en gisements pentés ou filoniens est souvent basée sur des extrapolations de résultats d'exploitations en plateure ou parfois, de manière plus précise, sur des modélisations spécifiques incluant les caractéristiques particulières du site étudié.

## 6. Références bibliographiques

- Collège Paul Verlaine Evrecy et Amicale des anciens mineurs (2002) *Histoire d'un pays minier - Autour de May-sur-Orne* - 2<sup>e</sup> édition, Editeur local, 175 pages.
- T. Delaunay, J.-J. Tritsch (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*, rapport référencé INERIS-DRS-04-42376/R03.
- INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB (2004) *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers - Guide méthodologique - Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa*. INERIS DRS-04-51198/R01 PROJET n° 2, en cours de finalisation.
- A. Proust (1964) Etude sur les affaissements miniers dans le bassin du Nord et du Pas-de-Calais, *Revue de l'Industrie Minérale*, juin-juillet 1964.
- B.N. Whittaker and D.J. Reddish (1989) *Subsidence – Occurrence, Prediction and Control*, ED Elsevier.
- F. Vinkler (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.