

1. Méthodologie d'évaluation de la prédisposition d'effondrement localisé associé à des travaux miniers souterrains

1.1. Cas des galeries isolées, des croisements de galeries et des dépilages

Les principaux critères à prendre en compte lors d'une évaluation de la prédisposition à l'effondrement localisé en cas de rupture du toit d'une galerie peu profonde, descendrière ou carrefour de galeries et rupture d'un toit de chambre sont principalement (guide INERIS, DRS-05-55102/R02) :

- ▶ la géométrie des travaux et/ou vides souterrains
- ▶ l'ouverture des chantiers souterrains ;
- ▶ la méthode d'exploitation (présence de vides résiduels, de chantiers remblayés, taux de défructement, 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.

La méthodologie retenue pour qualifier la prédisposition consiste à (et en application du guide GEODERIS N2012-010DE de 2012) :

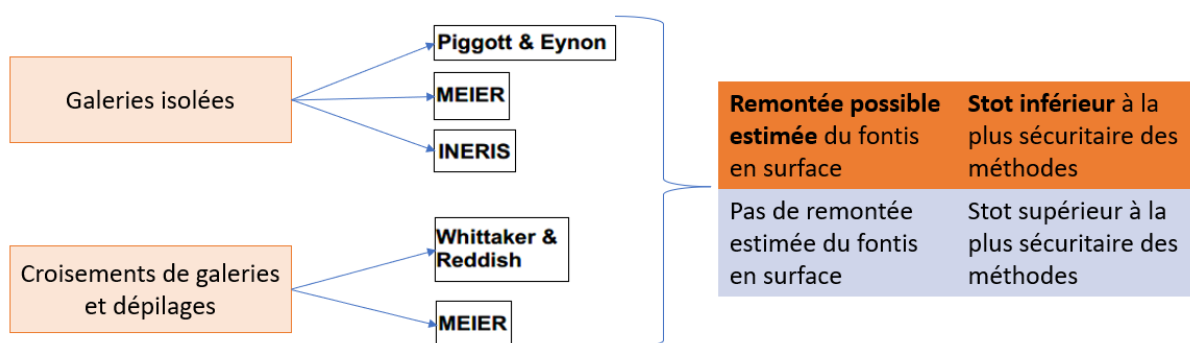
1. **évaluer par type d'ouvrage la hauteur limite de remontée de fontis** par croisement de méthodes analytiques selon le type d'ouvrage considéré (caractéristiques des méthodes décrites dans le tableau ci-dessous) :
 - Pigott et Eynon
 - Whittaker ;
 - Meier
 - Ineris

Tableau 1 : Caractéristiques des principales méthodes analytiques pour évaluer la hauteur prévisible d'un fontis (source GEODERIS 2012)

Nom	2D/3D	Paramètres utilisés	Formules	Forme de la cloche de fontis	Remarques
Piggott et Eynon	2D	w, hauteur de vide k, coefficient de foisonnement	$h_{cloche} = \frac{3w}{(k-1)}$	Forme non précisée	<ul style="list-style-type: none"> Ne prend pas en compte le rayon initiateur au toit Ne peut s'appliquer que dans une galerie sans pilier
Whittaker et Reddish	3D	w, hauteur de vide k, coefficient de foisonnement r, rayon initiateur au toit α , angle de talus du matériau l_p , largeur entre deux piliers	$h_{cloche} = \frac{4}{\pi r^2 (k-1)} (2l_p w^2 \cot \alpha + w l_p^2)$	Cylindre de rayon r	<ul style="list-style-type: none"> Ne prend pas en compte la présence de piliers Suppose un rayon égal à la diagonale d'un carrefour de chambres et piliers
Vachat*	3D	w, hauteur de vide k, coefficient de foisonnement r, rayon initiateur au toit α , angle de talus du matériau a, coefficient de forme b, coefficient de site	$h_{cloche} = \frac{aw}{k-1} \left(\frac{bw^2}{3r^2 \tan^2 \alpha} + \frac{bw}{r \tan \alpha} + 1 \right)$	Selon la valeur de α , cône, parabole ou cylindre	<ul style="list-style-type: none"> Utilise des coefficients empiriques pour déterminer l'influence de la présence de piliers et la forme de la cloche de fontis Valable uniquement dans le bassin parisien
Meier	2D	w, hauteur de vide k, coefficient de foisonnement r, rayon initiateur au toit α , angle de talus du matériau	- galerie isolée et forme cylindrique : $h_{cloche} = \frac{w}{k-1} \left(1 + \frac{w}{D \tan \theta} \right) (1)$ - galerie isolée et forme parabolique : $h_{cloche} = 1,274 \times (1)$	2 formules : une pour assimiler la cheminée de fontis à un cylindre, l'autre à une forme parabolique	Propose des formules distinctes selon que l'on est dans la situation d'une galerie isolée ou d'un carrefour de chambres et piliers
INERIS	3D	w, hauteur de vide k, coefficient de foisonnement r, rayon initiateur au toit α , angle de talus du matériau l_p , largeur entre deux piliers β , angle des piliers	- galerie isolée trapézoïdale $h_{cloche} = \frac{V_{c\acute{o}ne\ tronqu\acute{e}}}{\pi r^2 (k-1)}$	Cylindre de rayon r	<ul style="list-style-type: none"> Le volume réel des piliers encombrant le cône d'éboulis est approché. Un calcul rigoureux a montré peu de différence Formule plus complexe que les trois premières, nécessitant l'utilisation d'une feuille de calcul Propose des formulations distinctes pour des galeries isolées ou des carrefours de chambres et piliers

*La méthode de Vachat, qui utilise principalement des données empiriques est particulièrement basée sur des retours d'expérience qui se sont déroulées dans des contextes sédimentaires. Les présents calculs utilisent (à titre comparatif) la méthode de Vachat dans l'estimation de la remontée de fontis mais ils ne sont pas intégrés dans l'évaluation de la prédisposition de l'aléa d'effondrement localisé.

L'évaluation de la hauteur limite de remontée de fontis en surface est évaluée en croisant les différentes méthodes dans un objectif sécuritaire. A noter que les calculs de remontée de fontis sont considérés uniquement avec prise en considération des terrains foisonnants, c'est-à-dire le granite sain et la frange altérée mais non arénisée.



Seuls les ouvrages dont le stot présentant un **stot inférieur** à la plus sécuritaire des méthodes analytiques étudiée font par la suite l'objet d'une évaluation de la prédisposition et de l'intensité du phénomène effondrement localisé.

- préciser la prédisposition retenue ci-dessus en fonction des zones considérées, en intégrant les facteurs intrinsèques et extrinsèques :**
 - stot résiduel : spécifiquement, l'appréciation de la sensibilité de ce paramètre est évaluée suivant ce tableau :

Sensibilité liée au stot résiduel	Très sensible
	Stot inférieur à la valeur la plus sécuritaire des méthodes moyennées
	Sensible
	Stot compris entre la valeur sécuritaire et la moyenne des méthodes
	Peu sensible
	Stot compris entre la moyenne et la moins pénalisante des méthodes

- localisation connue des ouvrages
- largeur du vide
- niveau de remblaiement
- mouvement connu, état du vide
- fracturation/fissuration des terrains, pendage du filon
- niveau d'ennoyage des travaux miniers
- nature du recouvrement.

Cette analyse conduit à retenir une prédisposition spécifique par ouvrage ainsi que par secteur pertinents.

1.2. Cas des ouvrages verticaux (puits, montages verticaux, cheminées d'aérage, ...)

La prédisposition des ouvrages verticaux à débouurer et créer un fontis en surface est étudiée en utilisant le logigramme proposé par GEODERIS :

ORANO MINING
DOSSIER D'ARRET DES TRAVAUX MINIERs – CONCESSION DE LIGNOL
ANNEXE : METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'ALEA EFFONDREMENT LOCALISE

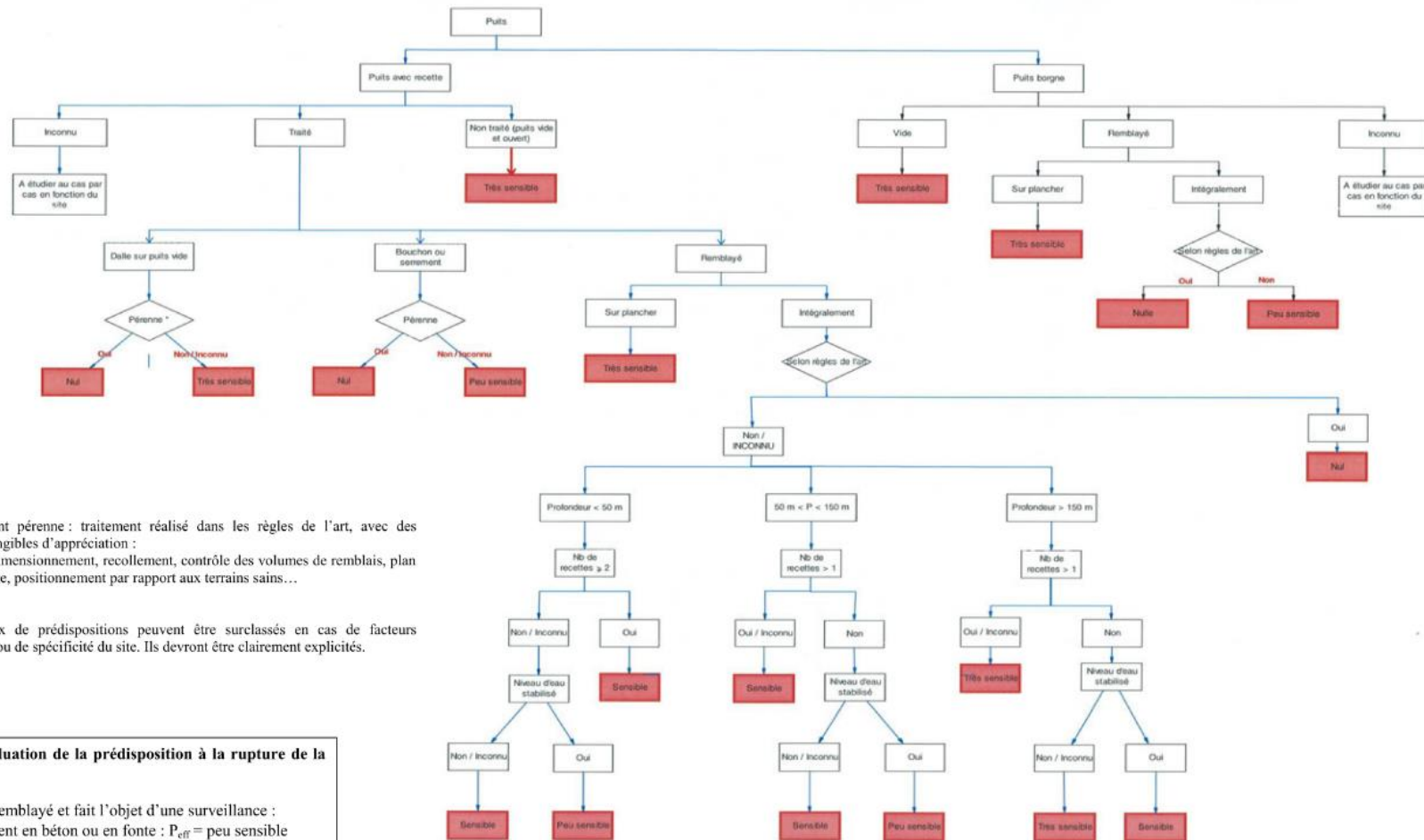
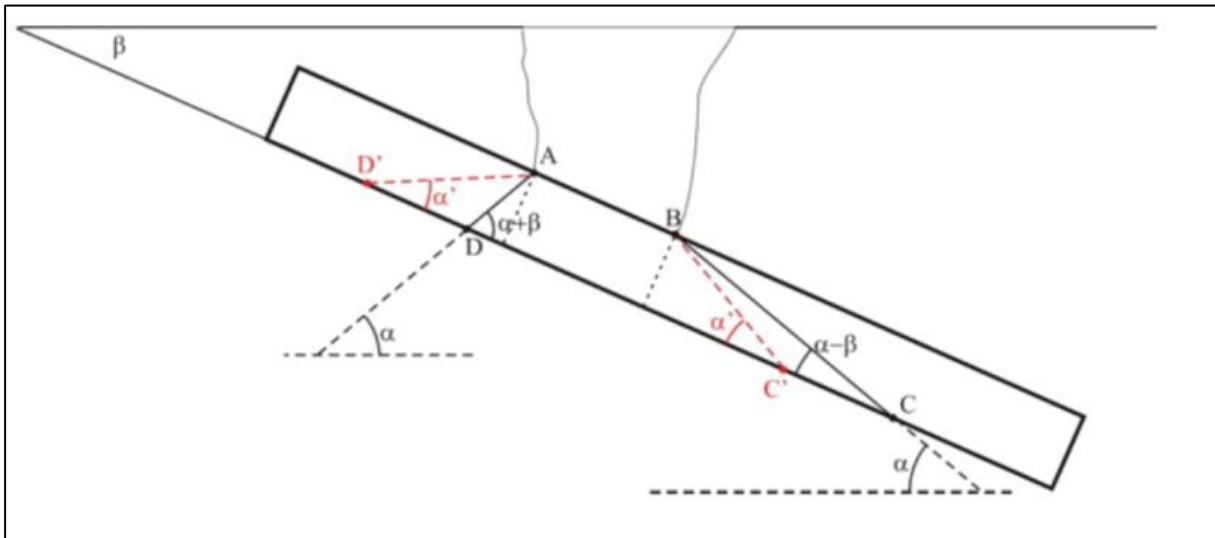


Figure 3 : Logigramme d'aide à l'évaluation de la prédisposition à l'apparition d'un effondrement localisé

La rétro-analyse d'évènements antérieurs survenus sur les ouvrages (débousses partiels, effondrements, ...) rentre donc en compte dans l'évaluation de la prédisposition.

1.3. Cas des ouvrages pentés (descenderies, montages inclinés, recoupes inclinées, ...)

Les estimations et calculs réalisés dans le cadre des études de prédisposition et d'intensité se basent généralement sur des ouvrages considérés plans. Or, les travaux miniers présentent parfois une pente suffisamment significative pour avoir une incidence sur le phénomène de remontée de voûte :



L'évaluation de la hauteur limite de remontée de fontis dans le cas de galeries inclinées est prise en compte dans la détermination de l'aléa effondrement localisé et reprend la méthodologie suivante (GEODERIS, 2012) :

- ▶ en première approximation : l'angle amont de glissement α est augmenté de la valeur de l'angle de la descenderie β (soit $\alpha + \beta$). Inversement, l'angle aval de glissement est diminué de la valeur de l'angle de la descenderie (soit $\alpha - \beta$)
- ▶ par simplification, un angle équivalent de talus α' est alors calculé. Il conserve le volume d'éboulement dans la galerie considérée comme étant horizontale, soit avec deux angles de talus α' (cf. figure ci-dessus). Dans cette configuration simplifiée, l'angle α' est alors déterminé par la relation suivante :

$$\alpha' = \text{Arctan} \left[\frac{\cos 2\beta}{\sin 2\alpha} - \cot 2\alpha \right]$$

Une fois la transformation faite, l'évaluation reprend la procédure d'évaluation de la prédisposition explicitée dans le cadre des galeries isolées.

2. Méthodologie d'évaluation de l'intensité d'effondrement localisé

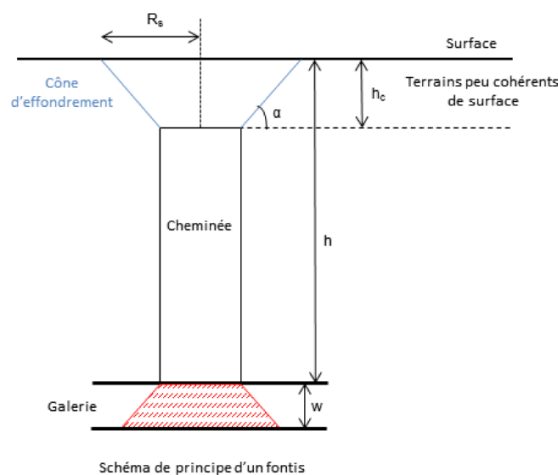
L'intensité de l'aléa d'effondrement localisé est déterminée en étudiant le **diamètre de l'effondrement** qui apparaîtraient en surface en cas d'effondrement localisé et qui influeraient sur les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes et des biens présents dans la zone d'influence du désordre. Les valeurs seuils pour classier l'intensité de l'aléa d'effondrement localisé sont reprises dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Classes d'intensité pour l'effondrement localisé (Source : Evaluation des aléas miniers, Ineris 17-164640-01944A, 2018)

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement (m)
<i>Très limitée</i>	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
<i>Limitée</i>	$\emptyset < 5$
<i>Modérée</i>	$5 < \emptyset < 10$
<i>Elevée</i>	$\emptyset > 10$

2.1. Cas des galeries isolées, des croisements de galeries et des dépilages

Le calcul **du rayon (Rs) d'un fontis** qu'il est possible de voir apparaître en surface dans le cas des galeries isolées, des croisements et des dépilages est issu de l'équation du guide de GEODERIS (2012) qui prend en compte l'épaisseur ainsi que l'angle de talus naturel des terrains en surface et la largeur de la galerie (ou de la cavité souterraine) :



$$R_s = 1/2 l_g + h_c \cotan(\alpha)$$

α = angle de talus naturel des terrains
 h_c = épaisseur des terrains peu cohésifs
 l_g = largeur de galerie ou à défaut de la cavité souterraine

2.2. Cas des ouvrages verticaux

Le calcul **du rayon d'un fontis (Rs)** généré par le débouillage d'un ouvrage vertical est calculé selon l'équation du guide de GEODERIS (2012) :

$$R_s = r_p + h_c \cotan(\alpha)$$

Avec :

R_s = le rayon du fontis migré en surface

R_p = le rayon de l'ouvrage

H_c = l'épaisseur des terrains peu cohésifs en surface

α = l'angle de talutage des terrains en surface

La formule est applicable dans le cas de l'existence d'un banc compétent proche de la surface (jusqu'à une vingtaine de mètres), ce qui est le cas sur l'ensemble des sites de la concession de Lignol et du site de Calerden, qui est majoritairement constituée par des bancs granitiques plurimétriques.

2.3. Cas des galeries pentées

Dans le cas des galeries pentées, il est donc nécessaire de connaître l'angle équivalent de talus α' calculé selon la méthode décrite dans le §1.3.

Une fois l'angle calculé, l'intensité de l'effondrement localisé à angle équivalent est estimée selon la méthode décrite dans le §2.1.